



T.C.
NIĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SİLİSYUM HETERO-EKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİNDE ÖN YÜZ
METALİZASYON OPTİMİZASYONU VE ALTERNATİF ÖN YÜZ
METALİZASYON YÖNTEMİ

TOLGA ALTAN

Haziran 2018

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

SİLİSYUM HETERO-EKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİNDE ÖN YÜZ
METALİZASYON OPTİMİZASYONU VE ALTERNATİF ÖN YÜZ
METALİZASYON YÖNTEMİ

TOLGA ALTAN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Doç. Dr. Mahmut ALKAN

İkinci Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN

Haziran 2018

Tolga ALTAN tarafından Doç. Dr. Mahmut ALKAN ve Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN danışmanlığında hazırlanan “Silisyum Hetero-eklem Güneş Hücrelerinde Ön Yüz Metalizasyon Optimizasyonu ve Alternatif Ön Yüz Metalizasyon Yöntemi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğretim Üyesi Mustafa AKYOL, Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Sefa YILDIRIM, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Mahmut ALKAN, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Selahattin ÇELİK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN, 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.



Tolga ALTAN

ÖZET

SİLİSYUM HETERO-EKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİNDE ÖN YÜZ METALİZASYON OPTİMİZASYONU VE ALTERNATİF ÖN YÜZ METALİZASYON YÖNTEMİ

ALTAN, Tolga

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Mahmut ALKAN

İkinci Danışman : Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN

Haziran 2018, 135 sayfa

Güneş hücre teknolojileri alanında maliyeti düşürmek ve verimliliği artırmak başlıca çalışma konuları arasındadır. Bu tezde, güneş hücresi üretiminde alttaştan sonra en etkili maliyet unsuru olan metalizasyon işlemi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, güneş hücrelerinin ön yüz metalizasyon tasarımının optimize edilmesi ile yüksek verimli ve maliyet etkin a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş hücrelerinin üretilmesi amaçlanmıştır. Hâlihazırda yüksek verimli olan bu güneş hücrelerine optimizasyonu yapılmış ön yüz metalizasyon tasarımları uygulanmış ve elde edilen verim değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca ön yüz metalizasyon yöntemleri içerisinde en yaygın kullanılan serigrafik baskı yöntemine alternatif olarak fiziksel buhar kaplama (PVD) yöntemi maske yardımı ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Güneş hücresi, HIT, metalizasyon, ön yüz metalizasyon, ince akım toplayıcı, kalın akım toplayıcı, Serigrafik baskı, PVD

SUMMARY

FRONT METALLIZATION OPTIMIZATION AND ALTERNATIVE FRONT METALLIZATION METHOD IN SILICON HETERO-JUNCTION SOLAR CELLS

ALTAN, Tolga

Nigde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mahmut ALKAN

Co-Advisor : Assist. Prof. Dr. Ayşe SEYHAN

June 2018, 135 Pages

Reducing costs and increasing the efficiency of solar cells are the main research topics in photovoltaic field. With this thesis, we studied on metallization process which is the most expensive element after the substrate on the solar cell production. In this context, the front side metallization design of solar cells was optimized to produce high-efficient and cost-effective a-Si: H/ c-Si heterojunction (HIT) solar cells. The optimized front side metallization designs have been applied to c-Si HIT solar cells which are already highly efficient, and the efficiencies were compared. In addition, as an alternative to the screen printing, which is the most commonly used method in the front side metallization, the Physical Vapor Deposition (PVD) was carried out for front side metallization with the help of a mask and the results obtained were interpreted.

Keywords: solar cell, HIT, metallization, front side metallization, finger, busbar, Screen printing, PVD

ÖN SÖZ

Fosil yakıtların her geçen gün rezervlerinin azalmasının yanında çevreye ve insan sağlığına olan zararları ile yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerjiler içerisinde güneş enerjisinin konumu tartışmasız ön plana çıkmaktadır. Güneş enerjisi sistemlerinin verim değerinin artırılması ve maliyetinin düşürülmesi başlıca çalışma konularıdır. Bu tez kapsamında da düşük maliyetli ve yüksek verimli olarak üretilen HIT (Heterojunction with intrinsic thin-layer / katkılanmamış ince tabakalı heteroeklem) güneş hücrelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca maliyet üzerinde alttaşı maliyetinden sonra en etkili maliyet unsuru olan metalizasyon işlemi tez kapsamında incelenen konu olmuştur. Ön yüz metalizasyon dizaynının maliyet ve performans açısından optimizasyonu yapılmış ve optimize edilmiş metalizasyon dizaynları HIT güneş hücrelerine uygulanmıştır.

Çalışmamın başından sonuna kadar bana destek olan Doç. Dr. Mahmut ALKAN'a ve laboratuvar çalışmalarında her konuda özgürlük tanımlarının yanı sıra değerli tavsiye ve yardımları ile beni yönlendiren Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Sık sık tecrübelerine başvurduğum Doç. Dr. Recep ZAN'a ve deneylerimin tamamlanmasında önemli katkıda bulunan çalışma arkadaşlarım Ömer Can ECER'e ve Emre KARTAL'a müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Ayrıca tez çalışmalarım sırasında gösterdiği sabır ve sevgisi ile sürekli bana destek olan kıymetli nişanlım Derya VURAL'a teşekkür borç bilirim.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi koruyuculuğumu üstlenen annem Gülcan DEMİR'e ve babam Kazım ALTAN'a ithaf ediyorum.

Ayrıca Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Laboratuvarı çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR V.B. MALZEMELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Giriş (Güneş Enerjisi)	1
1.2 Güneş Hücreleri	3
1.2.1 Tarihçe.....	3
1.2.2 Çalışma prensibi.....	5
1.2.2.1 Yarı iletkenler	6
1.2.3 Güneş hücresi parametreleri.....	8
1.2.3.1 I-V eğrisi.....	9
1.2.3.2 Kısa devre akımı (I_{sc}).....	9
1.2.3.3 Açık devre gerilimi (V_{oc}).....	10
1.2.3.4 Dolum faktörü (FF).....	10
1.2.3.5 Verim (η)	11
1.2.4 Sınıflandırma ve pazar payı.....	13
1.3 Motivasyon ve Amaç	16
1.4 Tez İçeriği	18

BÖLÜM II FİZİKSEL VE TEKNOLOJİK LİMİT KISITLAMALARI (KAYIPLAR)	19
2.1 Temel (Ana) Kayıplar	19
2.2 Teknik Kayıplar	21
2.2.1 Tutulamayan fotonlar nedeniyle kayıp	22
2.2.2 Yansıma kayıpları	23
2.2.3 Gölgeleme kayıpları (Alan kayıpları)	25
2.2.4 Direnç kayıpları	26
2.2.4 Rekombinasyon kayıpları	28
2.2.4.1 Radyatif (Işımalı) rekombinasyon	28
2.2.4.2 Auger rekombinasyonu	29
2.2.4.3 Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu	29
2.2.4.4 Yüzey rekombinasyonu	30
2.2.6 Teknik kayıplara genel bir bakış	31
BÖLÜM III HIT GÜNEŞ HÜCRESİ	33
3.1 Homoeklem – Heteroeklem Yapı	33
3.2 HIT Güneş Hücresi için Tarihçe ve Verimsel Gelişim	34
3.3 HIT Üretim Adımları	45
3.3.1 Yüzey desenlendirme işlemi	47
3.3.2 Yüzey temizliği	49
3.3.3 Katkısız (i) ve katkılı (n)-(p) a-Si:H tabakaların kaplanması	51
3.3.4 TCO (Transparent conductive oxide) tabakaların kaplanması	57
3.3.5 Arka ve ön yüzey metalizasyon işlemi	61
3.3.6 Fırınlama	61
BÖLÜM IV METALİZASYON	63
4.1 Metalizasyona Giriş	63
4.2 Metalizasyon Yöntemleri	65

4.2.1 Serigrafik baskı yöntemi	65
4.2.2 PVD sıçratma	70
4.3 Seri Direnç Bileşenlerinin Modellenmesi ve Metalizasyon Optimizasyonu	72
BÖLÜM V DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇ.....	96
5.1 NÖHÜNAM’da HIT Güneş Hücresi Üretimi.....	96
5.1.1 Yüzey desenlendirme işlemi ve ıslak kimyasal yüzey temizliği.....	99
5.1.2 PECVD yardımıyla a-Si:H tabakaların kaplanması	100
5.1.3 ITO tabakalarının PVD ile kaplanması	102
5.1.4 Arka yüz metalizasyonun PVD ile kaplanması.....	102
5.1.5 Ön yüz metalizasyon işleminin serigrafik baskı yöntemi ile uygulanması... ..	104
5.1.6 Fırınlama işlemi.....	106
5.2 Optimizasyonu Gerçekleştirilen Ön Yüz Metalizasyon Dizaynlarının Uygulanması	107
5.3 PVD Yönteminin Ön Yüz Metalizasyon İşleminde Kullanımı	110
5.4 Sonuç ve Gelecek Çalışmalar	114
KAYNAKLAR	116
ÖZGEÇMİŞ	134
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	135

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Hücre ve modül bazında maksimum verim değerleri (Fraunhofer ISE, 2017; Green vd., 2017)	15
Çizelge 2.1. Yansıma önleyici kaplama ve yüzey desenlendirme uygulanmış hücrelerin yüzde olarak yansıtma değerleri	24
Çizelge 2.2. Kayıplar ve doğrudan etkiledikleri güneş hücresi parametreleri.....	32
Çizelge 3.1. n-tipi alttaş kullanılan HIT uygulamaları	43
Çizelge 3.2. p-tipi alttaş kullanılan HIT uygulamaları (Willeke ve Weber, 2013).....	44
Çizelge 3.3. RCA ve HF temizliği (Kern, 1990; Angermann, 2008)	49
Çizelge 4.1. Hesaplamalarda kullanılan referans hücre parametreleri	84
Çizelge 4.2. 90-150 mikron aralığındaki finger genişlikleri için toplam güç kaybı değişimi	85
Çizelge 4.3. Fingerlar arası mesafe ve finger sayısının değişimine göre hesaplanan değerler	87
Çizelge 4.4. Aynı busbar genişliğine (0,13 cm) sahip 3, 4 ve 5 busbarlı dizaynlar için hesaplanan değerlerin değişimi	90
Çizelge 4.5. Aynı gölgeleme oranına sahip 3, 4 ve 5 busbarlı dizaynlar için hesaplanan değerler	92
Çizelge 4.6. Aynı gölgeleme oranına sahip 3, 4 ve 5 busbarlı dizaynlar için hesaplanan değerler	94
Çizelge 5.1. 13,56 MHz frekans RF PECVD ile kaplanan a-Si:H tabakalar için kaplama koşulları	100
Çizelge 5.2. PVD yöntemi ile gerçekleştirilen ITO ve arka yüzey Ag kaplama koşulları	103

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Güneş enerjisi potansiyeli ve diğer enerjilerin kıyaslanması (Greenpeace, 2011).....	2
Şekil.1.2. Vanguard 1 uydusu (NASA, 2018)	4
Şekil 1.3. c-Si güneş hücrelerinin yıllara göre verim gelişimi (Kalogirou, 2017).....	5
Şekil 1.4. Bir güneş hücresinin kesiti ve çalışma prensibi.....	6
Şekil 1.5. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken maddelerin yasak enerji bant aralıklarının gösterimi (Mertens, 2013)	6
Şekil 1.6. n-tipi katkılamada kristal yapı (a) p-tipi katkılamada kristal yapı (b) (Mertens, 2013).....	7
Şekil 1.7. Her iki yapı elektriksel olarak nötr, (a) bölgeler birleştirildiğinde yük taşıyıcıların akımı (b) p-n eklem (c) (Mertens, 2013)	8
Şekil 1.8. Karakteristik akım-gerilim (I-V) eğrisi	9
Şekil 1.9. Güneş hücresi türlerine göre ulaşılmış maksimum verim değerleri (NREL, 2017).....	12
Şekil 1.10. Güneş hücrelerinin sınıflandırılması	13
Şekil 1.11. Birinci, ikinci ve üçüncü nesil güneş hücreleri için verimlilik ve maliyet projeksiyonları (Green, 2006; Conibeer, 2007).....	13
Şekil 1.12. Üretim teknolojilerine göre pazar payı ve yıllık üretim miktarı (GWp) (Fraunhofer ISE, 2017).....	14
Şekil 1.13. Hücreden modüle dönüşüm esnasındaki kayıplar ve kazançlar (Haedrich vd., 2014).....	15
Şekil 1.14. 1974 yılından günümüze watt başına c-Si hücre fiyatları (Solanki ve Singh, 2017).....	16
Şekil 1.15. Altaş kalınlığı ve silisyum kullanımının yıllara göre değişimi (Fraunhofer ISE, 2017).....	17
Şekil 1.16. Hücre başına gümüş kullanım miktarı eğilimi ve beklentiler (ITRPV, 2017)	18
Şekil 2.1. Kristal silisyum bir güneş hücresi için ($E_g=1.12$) AM1.5 spektrumun kullanılabilir enerjiye dönüştürülebilen kısmı (Jäger vd., 2014).....	19

Şekil 2.2. SQ limiti ve temel kayıpların dağılımı (Jäger vd., 2014) ve oranları (Solanki, 2015; Dupré vd., 2016).....	21
Şekil 2.3. Bir güneş hücresindeki teknik kayıplar (Lai, 2014)	22
Şekil 2.4. Farklı dalga boylarına göre soğurma katsayısı ve ışığı tamamen soğurmak için gereken uzunluk (Solanki ve Singh, 2017).....	23
Şekil 2.5. Yüzey desenlendirme işleminin farklı türleri; rasgele piramit yapısı (a) ters piramit yapısı (b) bal peteği benzeri yapı (c) (Honsberg ve Bowden, 2015) ..	23
Şekil 2.6. Yansıma kayıplarını önlemede kullanılan yansıma önleyici kaplama	24
Şekil 2.7. ITO için dalga boyuna göre yansıtma oranlarının değişimi (Ali vd., 2014) ..	25
Şekil 2.8. 2 ve 3 busbara sahip hücreler için gölgeleme ve direnç değerleri değişimi (Burgers, 2005).....	26
Şekil 2.9. Şönt direncinin güneş hücresi karakteristik eğrisine etkisi: dolum faktörü R_{sh} ile önemli ölçüde azalır (Mertens, 2013)	27
Şekil 2.10. Seri direncin güneş hücresi karakteristik eğrisine etkisi: dolum faktörü R_s ile önemli ölçüde azalır (Mertens, 2013).....	27
Şekil 2.11. Rekombinasyon türlerinin şematik gösterimi; radyatif (a), Auger (b), SRH (c) ve yüzey (d).....	30
Şekil 2.12. Kimyasal pasivasyon (a) (Lai, 2014) ve alan etkili pasivasyonun iki türü olan BSF (b) (Lai, 2014) ve yüklü dielektrik malzeme kullanımı (c) (Ryu, 2015).....	31
Şekil 3.1. Homoeklem yapı (a) heteroeklem yapı (b) ve katkılanmamış (i) ince tabakalı heteroeklem (HIT) yapısı (c)	33
Şekil 3.2. HIT güneş hücresinde yıllara göre verim rekorları (NREL, 2017)	34
Şekil 3.3. Sanyonun bildirdiği ilk a-Si:H / c-Si heteroeklem güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve p-tipi a-Si:H kalınlığının bir fonksiyonu olarak güneş hücresi parametreleri (b) (Wakisaka vd., 1991; Tanaka vd., 1992).....	35
Şekil 3.4. HIT güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve katkısız (i-tipi) a-Si:H tabakasının kalınlığının bir fonksiyonu olarak güneş hücresi parametreleri (b) (Wakisaka vd., 1991; Tanaka vd., 1992).....	36
Şekil 3.5. Yüzey desenlendirme uygulanmış HIT güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve I-V eğrisi (b) (Wakisaka vd., 1991).....	37
Şekil 3.6. Yüzey desenlendirme ve BSF uygulanmış HIT güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve I-V eğrisi (b) (Wakisaka vd., 1991; Tanaka vd., 1992)	38

Şekil 3.7. Her iki yüzeye katkısız a-Si:H uygulanmış HIT güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve I-V eğrisi (b) (Sawada vd., 1994)	39
Şekil 3.8. Büyük ölçekli (>100 cm ²) hücre üretimi: oldukça simetrik bir yapıda tasarlanan HIT hücresi (a) (Sakata vd., 2000; Taguchi vd., 2000; Tanaka vd., 2003) ve I-V eğrisi (b) (Tanaka vd., 2003).....	40
Şekil 3.9. Yüksek verimli bir güneş hücresi için optimize edilmesi gereken başlıklar ve etkileyeceği güneş hücresi parametreleri (Taguchi vd., 2014)	41
Şekil 3.10. Sanyo'nun 200 µm üzeri ve 100 µm altı hücreler için verim gelişimi (Taguchi vd., 2014)	41
Şekil 3.11. HIT güneş hücresi alanında rekora sahip hücrenin yapısı (a) ve I-V eğrisi (b) (Yoshikawa vd., 2017b).....	44
Şekil 3.12. HIT güneş hücresinin detaylı yapısı	46
Şekil 3.13. 80 °C'de ağırlıkça %20 KOH + %3 IPA solüsyonunda aşındırma sonrası Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri 20 dk (a), 30 dk (b) ve 40 dk (c) (Mahmoud Al ve Lahlouh, 2017)	48
Şekil 3.14. 40 dakika ve 80 °C'de, ağırlıkça %20 KOH (a), %24 KOH (b) ve %28 KOH (c) + %3 ağırlık oranında IPA karışım çözeltisi ile aşındırmadan sonra Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri (Mahmoud Al ve Lahlouh, 2017).....	48
Şekil 3.15. 60 °C (a), 70 °C (b) ve 80 °C (c) gibi farklı yüzey sıcaklıklarında 40 dakika boyunca %20 KOH + %3 IPA ağırlık oranında çözelti uygulandıktan sonra Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri (Mahmoud Al ve Lahlouh, 2017)	48
Şekil 3.16. Farklı temizleme işlemlerinin performansı (van Sark vd., 2012).....	50
Şekil 3.17. c-Si bir alttaş için HF daldırma sürenin uzunluğunun (a) ve HF sonrası havaya maruz kalma süresinin (b) etkin ömür üzerindeki etkisi (Fahrner, 2013).....	51
Şekil 3.18. Atomik yapılar: tek c-Si (a), a-Si (b) ve a-Si:H (c) (Kasap, 2006).....	52
Şekil 3.19. a-Si:H ve µc-Si:H yapıları arasında silan yoğunluğuna göre geçiş rejimi (Street, 1991)	55
Şekil 3.20. Hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğunun RF gücüne göre değişimi (Street, 1991)	56
Şekil 3.21. Sıcaklık değerinin hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğu üzerine etkisi (Street, 1991).....	56

Şekil 3.22. Uygulanan güç değerinin değişimi ile taşıyıcı hareketliliği (a), taşıyıcı yoğunluğu (b), direnç (c), geçirgenlik (d) ve yansıma (e) değerlerinin değişimi (Her ve Chang, 2016).....	58
Şekil 3.23. Oksijen gazı akış oranı ile taşıyıcı hareketliliği, direnç, taşıyıcı yoğunluğu (a) ve geçirgenlik (b) değerlerinin değişimi (Hussain vd., 2014).....	59
Şekil 3.24. Alt malzeme sıcaklığının değişimi ile taşıyıcı yoğunluğu (a) taşıyıcı hareketliliği (b) direnç (c) ve geçirgenlik (d) değerlerinin değişimi (Boonyopakorn vd., 2010).....	60
Şekil 3.25. Tavlama sıcaklığına göre direnç (a) taşıyıcı yoğunluğu ve taşıyıcı hareketliliği (b) değişimi (Balasundaraprabhu vd., 2009).....	60
Şekil 3.26. Değişik sıcaklıklarda fırınlama süresinin Ag elektrot ve ITO filmi arasında ki temas direnci (ρ_c) üzerine etkisi (Lee vd., 2014).....	62
Şekil 3.27. Farklı fırınlama sıcaklıkları için HIT güneş hücrelerinin seri direnci, dolum faktörü ve verimliliği (Lee vd., 2014)	62
Şekil 4.1. Güneş hücrelerinde ön yüz metalizasyonu	63
Şekil 4.2. Gölgeleme ve dirençler arasındaki ilişki, ince akım toplayıcı genişliği (a) ve ince akım toplayıcılar arasındaki mesafenin (b) gölgeleme ve dirence etkileri (Jäger vd., 2014)	64
Şekil 4.3. Serigrafik baskı yöntemi.....	67
Şekil 4.4. Serigrafik baskı yönteminde kullanılan elektteki emülsiyon ve örgü yapısının SEM görüntüsü (Hilali, 2005)	68
Şekil 4.5. Gümüş pasta bileşenleri (a) ısı ile buharlaşma (b) ideal şartlarda oluşacak yapı (c) aşırı ısının sebep olduğu polimerde bozukluk (d) (Lee vd., 2014)	69
Şekil 4.6. Düşük en-boy oranına sahip metalizasyon (a) ve istenilen yüksek en-boy oranına sahip metalizasyon (b)	69
Şekil 4.7. Arka yüz metalizasyonunda kullanılan PVD sıçratma yöntemi	71
Şekil 4.8. Yakın gelecekte kullanılması beklenen yöntemler (Schubert vd., 2016)	71
Şekil 4.9. Metalizasyon optimizasyonunda kullanılan birim hücre yönteminin şematik gösterimi	73
Şekil 4.10. Bir güneş hücresindeki seri direnç bileşenleri	74
Şekil 4.11. BBR değerinin ölçülmesi.....	76
Şekil 4.12. R_{bus} değerinin ölçülmesi	78
Şekil 4.13. R_{sheet} ve ρ_c değerinin ölçümünde kullanılan yöntemin şematik gösterimi....	81

Şekil 4.14. Levha direnci ve temas direncinin hesaplanmasında kullanılan ladder (merdiven) metodu grafiği.....	81
Şekil 4.15. 90-150 mikron aralığı için finger genişliğine göre gölgeleme ve seri direnç kayıplarının değişimi	86
Şekil 4.16. 90-150 mikron aralığı için finger genişliğine göre toplam güç kaybının değişimi	86
Şekil 4.17. 30-130 adet finger sayısı aralığı için gölgeleme ve seri direnç sebebiyle olan güç kayıplarının ve toplam güç kayıplarının değişimi	88
Şekil 4.18. 70-105 adet finger sayısı aralığı için gölgeleme ve seri direnç sebebiyle olan güç kayıplarının ve toplam güç kayıplarının değişimi	88
Şekil 4.19. Marjinal maliyetin finger sayısına göre değişimi	89
Şekil 4.20. Aynı busbar genişliğine (0,13 cm) sahip 3, 4 ve 5 busbarlı dizaynlar için 4.20. finger sayısının değişimine göre toplam güç kaybı değişimi	91
Şekil 4.21. Gölgelemenin sabit olduğu busbar kalınlığına göre güç kaybı değişimi.....	93
Şekil 4.22. Farklı busbar kalınlığına sahip 5 busbarlı dizaynlar için güç kaybı değişimi.	95
Şekil 5.1. NÖHÜNAM’da bulunan temiz oda üretim hattı	96
Şekil 5.2. NÖHÜNAM’da üretilen yüksek verimli HIT güneş hücrelerinin standart üretim adımları	97
Şekil 5.3. HIT güneş hücresi üretim adımları c-Si alttaş (a) yüzey desenlendirilmiş ve temizlenmiş alttaş (b) i tipi a-si:H tabakanın kaplanması (c) n tipi a-si:H tabakanın kaplanması (d) p tipi a-si:H tabakanın kaplanması (e) ITO tabakalarının kaplanması (f) arka yüzey metalizasyonun kaplanması (g) ön yüzey metalizasyonun uygulanması (h)	98
Şekil 5.4. Yüzey desenlendirme işlemi sonucunda elde edilen alttaş yüzeyinin SEM görüntüsü	100
Şekil 5.5. PECVD sisteminin şematik gösterimi	101
Şekil 5.6. Desenli yüzeyler üzerine kaplanan ince filmelerin uniform dağılımı (Seyhan vd., 2017).....	102
Şekil 5.7. PVD sisteminin detaylı şematik gösterimi	103
Şekil 5.8. Tasarım-I (a), Tasarım-II (b) ve Tasarım-III (c) için I-V eğrileri	109
Şekil 5.9. PVD sisteminde maske kullanımının detaylı şematik gösterimi	111
Şekil 5.10. Maske yardımıyla gerçekleştirilen PVD ön yüz metalizasyon işlemi ile üretilen hücrelerin EL görüntüleri; ilk üretilen %17,7 verim değerine sahip hücre (a) son üretilen %3,9 verim değerine sahip hücre (b).....	111

Şekil 5.11. Maske yardımıyla gerçekleştirilen PVD ön yüz metalizasyon işlemi ile üretilen hücrelerin I-V eğrileri: ilk üretilen %17,7 verim değerine sahip hücre (a) son üretilen %3,9 verim değerine sahip hücre (b).....	112
Şekil 5.12. PVD yöntemi ile kaplanan kesikli finger	112



FOTOĞRAFLAR V.B. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. %6 verime sahip ilk c-Si güneş hücresi ile yapılmış olan mini modül (a) (Mertens, 2013) HIT güneş hücresinde %26,6 verim değerine sahip hücre (b) (Kaneka, 2017) ve tüm güneş hücreleri içerisinde %46 ile en yüksek verime sahip hücre (c) (Fraunhofer ISE, 2014)	4
Fotoğraf 5.1. Kimyasal işlemlerin yapıldığı ıslak kimyasal tezgâh (wet-bench)	99
Fotoğraf 5.2. Çoklu odalı ince film üretim istasyonu	103
Fotoğraf 5.3. PVD ile arka yüzeyi tamamen gümüş kaplanmış hücre	104
Fotoğraf 5.4. Ön yüz metalizasyon işleminde kullanılan serigrafik baskı cihazı (a) ve gümüş pasta (b)	105
Fotoğraf 5.5. Ön yüz metalizasyon işleminde finger tasarımının basılması için kullanılan eleğin örnek görüntüsü	105
Fotoğraf 5.6. Ön yüz metalizasyon işleminde kullanılan elekler (a) 3 busbar (b) 5 busbar	106
Fotoğraf 5.7. Fırınlama adımıında kullanılan fırın	106
Fotoğraf 5.8. 3 Busbarlı ve 75 adet fingerlı dizaynın uygulandığı hücre	107
Fotoğraf 5.9. 3 Busbarlı ve 87 adet fingerlı dizaynın uygulandığı hücre	108
Fotoğraf 5.10. 5 Busbarlı ve 75 adet fingerlı dizaynın uygulandığı hücre	108
Fotoğraf 5.11. Maske yardımıyla gerçekleştirilen PVD ön yüz metalizasyon işleminde kullanılan metal maske.....	110
Fotoğraf 5.12. Maske yardımıyla gerçekleştirilen PVD ön yüz metalizasyon işlemi ile üretilen hücredeki gölgeleme sorunları	114

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Açıklama

KWh	Kilowatsaat
eV	Elektonvolt
mV	Milivolt
W	Watt
m ²	Metrekare
nm	Nanometre
g	Gram
mg	Miligram
µm	Mikrometre
°C	Santigrat derece
TL	Türk lirası
mm ²	Milimetrekare
Pa	Pascal
MHz	Megahertz
sccm	Dakikada standart kübik santimetre
Å	Angstrom

Kısaltmalar

Açıklama

Mtep	Milton Ton Petrol Eşleniği
c-Si	Kristal Silisyum
PV	Fotovoltaik
NASA	Amerikan Havacılık ve Uzay Dairesi
MINP	Metal-Insulator-NP Junction
PESC	Passivated Emitter Solar Cell
PERC	Passivated Emitter and Rear Contacts

PERL	Passivated Emitter Rear Locally-Diffused
a-Si	Amorf Silisyum
HIT	Katkılanmamış İnce Tabakalı Heteroeklem
FF	Dolum Faktörü
η	Verim
I-V	Akım-Gerilim
AM	Air Mass (Hava Kütlesi)
STC	Standart Test Koşulları
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
ARC	Yansıma Önleyici Kaplama
CIGS	Bakır İndiyum Galyum (di) Selenyum
a-Si:H	Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum
SQ	Shockley Queisser
ITO	İndiyum Kalay Oksit
SRH	Shockley-Read-Hall
CZ	Czochralski
FZ	Float Zone
BSF	Back Surface Field
TCO	Geçirgen İletken Oksit
HBC	Hetero-eklem Arka Kontak
IBC	İnterdijite Arka Kontak
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
TMAH	Tetrametilamonyum Hidroksit
KOH	Potasyum Hidroksit
IPA	İzopropil Alkol
HWCVD	Sıcak Tel Kimyasal Buhar Biriktirme
PLD	Darbeli Lazer Biriktirme
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
TMB	Trimetil Boran
RF	Radyo Frekans
μ c-Si:H	Hidrojenlendirilmiş Mikro-Kristal Silisyum

AZO	Alüminyum Katkılı Çinko Oksit
GZO	Galyum Katkılı Çinko Oksit
ATO	Antimon Katkılı Kalay Oksit
DC	Doğru Akım
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
NÖHÜNAM	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi



BÖLÜM I

GİRİŞ

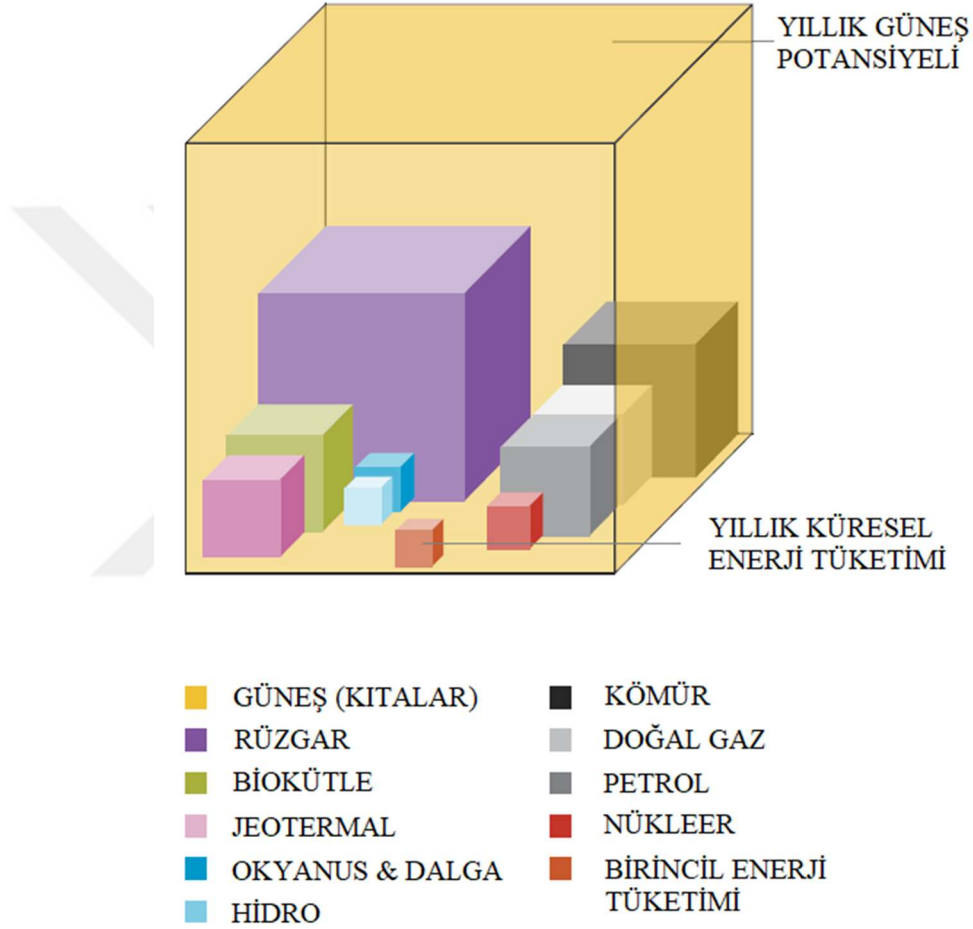
1.1 Giriş (Güneş Enerjisi)

Dünyada nüfusun artması ve teknolojinin gelişmesi ile enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Enerji ülkelerin gelişmesinde ve var olmasında stratejik bir öneme sahiptir. Dünyada kullanılmakta olan enerjinin çoğu birincil enerji kaynaklarından elde edilmektedir. 2016 yılsonu verilerine (Petroleum, 2017) göre dünyada birincil enerji kullanım miktarı 13.276 Mtep olarak gerçekleşmiştir. Birincil enerji kullanımında en büyük paya sahip olan kaynaklar sırasıyla: petrol (%33), kömür (%28) ve doğal gaz (%24) olduğu görülebilmektedir. Dolayısıyla birincil enerji kullanımında %85 gibi bir oran fosil kaynaklıdır. Ayrıca bu kaynakların kalan ömürleri: petrol 50,6 yıl, doğal gaz 52,5 yıl ve kömür 153 yıldır. Fosil yakıtlar sınırlı rezervlere sahip olmasının yanında atmosferi kirletici etkisi ile küresel ısınma ve sağlık problemlerine sebep olmaktadır (Spellman, 2014). Gelecekte fosil kaynaklı yenilenemeyen bu kaynaklar bittiğinde enerji ihtiyacının karşılanacağı kaynaklar temiz ve yenilebilir enerji kaynakları olacaktır.

2017 yılında dünya genelinde yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi bir önceki yıla göre %14,1 artış göstermiştir (Petroleum, 2017). Yenilenebilir enerji kaynakları Güneş, rüzgâr, biyokütle, jeotermal, gelgit enerjisi gibi kaynaklardır (Spellman, 2014). Yaşamın kaynağı olan Güneş temel enerji kaynağıdır ve fosil yakıtlar dâhil tüm enerji kaynakları aslında güneş enerjisinin türevleridir (Akova, 2003) Diğer tüm alternatif enerji kaynakları dünyanın farklı jeolojik bölgelerinde bulunsa da Güneş, dünyanın her yerine her gün doğmaktadır. Güneş enerjisi bolluğu, bulunabilirliği ve temiz olması nedeniyle dikkat çekmektedir. Güneş enerjisi alternatif yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en çok umut vadeden, sürdürülebilir büyük bir potansiyele sahiptir. Teknolojik gelişmelerle birlikte maliyetlerin azalması ve verimliliğin artması ile birlikte güneş enerjisi insanlığın geleceği için daha da umut verici hale gelecektir.

Dünyada enerji taleplerini karşılamak için yeterli miktarda güneş ışması mevcuttur. Ortalama olarak, dünya üzerindeki her metrekare arazi, günümüz mevcut teknolojisini

kullanarak her yıl 1700 kWh enerji üretmek için yeterli güneş ışığına maruz kalmaktadır. Dünya yüzeyine ulaşan toplam güneş enerjisi mevcut küresel enerjinin 10.000 kat fazlasını karşılayabilir (Greenpeace, 2011). Şekil 1.1’de görüldüğü gibi yıllık dünyaya ulaşan güneş ışınımı, yıllık küresel enerji ihtiyacını fazlasıyla karşılayabilmektedir. Şekilde gösterilenler fosil yakıtların toplam rezervi olup yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllık potansiyelidir.



Şekil 1.1. Güneş enerjisi potansiyeli ve diğer enerjilerin kıyaslanması (Greenpeace, 2011)

Güneşin enerjisinden değişik şekillerde yararlanılır ve temelde güneş enerjisi teknolojileri iki ana kategoriye ayrılabilir: ısı uygulamalar ve fotovoltaik uygulamalar. Isıl güneş teknolojileri güneşin ısı enerjisi ile ilgilenirken, fotovoltaik sistemler güneşin ışınım (ışık) enerjisi ile ilgilidir. Bu tez kapsamında fotovoltaik kısım ile ilgilenilecektir. Fotovoltaik sistemler yarı iletken malzemelerden yapılmış, değişik boyutlarda üretilen güneşten gelen ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirebilen sistemlerdir.

1.2 Güneş Hücreleri

Güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen güneş hücrelerinin tarihçesi, çalışma prensibi, önemli parametreleri ve sınıflandırılması bu bölümün alt başlıklarında verilmiştir.

1.2.1 Tarihçe

Fotovoltaik etki ilk kez 1839 yılında Edmond Becquerel tarafından asidik çözelti içine daldırılan elektrotlarla yaptığı deney esnasında gözlenmiştir (Becquerel, 1839). 1877’de W.G Adams ve R.E Day selenyum ile yaptığı deneylerde katılarda fotovoltaik etkinin olabileceğini göstermiştir (Adams ve Day, 1877). Kristal silisyumun (c-Si) fotovoltaik özellikleri 1941’de Bell Laboratuvarlarında keşfedilmiş ve silisyum esaslı PV cihazlar için ilk konseptler tanımlanmıştır (Ohl, 1941). 1954 yılına gelindiğinde, aynı tesislerde p-n eklem kullanılarak %6’lık enerji dönüşüm verimliliğine sahip bir c-Si güneş hücresi geliştirilmiştir (Chapin vd., 1954). Fotoğraf 1.1 (a)’da gösterilmiş olan bu hücreler ilk modern güneş hücresi olarak kabul edilebilir. Bu teknoloji Hoffman Electronics tarafından ticarileştirilmiş ve Hoffman’ın %9 verimlilikteki c-Si hücreleri 1958’de NASA’nın Şekil 1.2’de gösterilen Vanguard 1 uydusu üzerinde yer almış ve daha sonraları birçok uzay uygulamasında kullanılacak olan güneş hücreleri için öncü olmuştur. Fotovoltaik sistemler için mihenk taşı olan bu yıldan sonra uygulamalar uzay araçlarında kullanılmaya başlanmıştır.

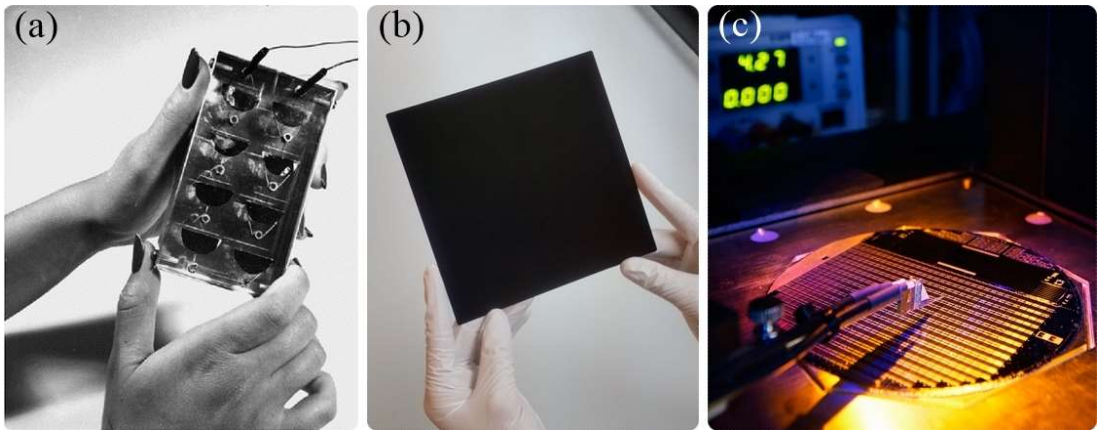
1970’li yıllarda petrol fiyatlarındaki artış fotovoltaik teknolojiye ilgiyi daha da artırmış ve yeryüzü kullanımı için çalışmalar hız kazanmıştır. 1970’lerin başında kısa dalga boyuna duyarlı silisyum mor hücre (violet cell) adı verilen %16’ya yakın verim değerine sahip hücreler geliştirilmiştir (Lindmayer ve Allison, 1973). 1974 yılına gelindiğinde silisyum yüzeyinin, kimyasal bir aşındırma işlemi ile ön yüzey yansıtması büyük ölçüde azaltılmıştır. Yansıma önleyici kaplamaların uygulanmasıyla siyah bir görünüm kazanan bu hücrelerin geliştirilmesi ile yeryüzü hücrelerinde ilk kez %17 verim değerinin üzerine ulaşılmıştır (Haynos vd., 1974). %18’lik kilometre taşı olan MINP (Green vd., 1984) hücrelerinin ardından silisyum hücre teknolojisi sırasıyla PESC, PERC ve PERL hücreler ile gelişerek ilerlemiş ve %25 verimliliğe ulaşmıştır (Green, 2009). HIT güneş hücreleri üzerine yapılan çalışmalar ile c-Si tabanlı hücrelerdeki verim değeri %25 üzerine

çıkıştır. Gelişen teknoloji ve yoğun çalışmalar sonucunda güneş hücreleri günümüz verim değerlerine ulaşmıştır. Şekil 1.3 c-Si hücrelerinin yıllara göre verimsel gelişimini göstermektedir.

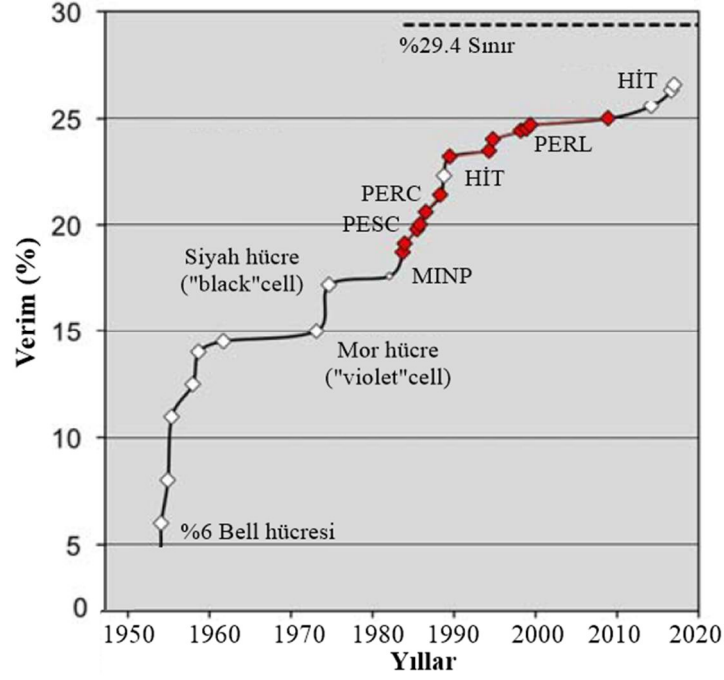
Bütün güneş hücreleri içinde çok eklemli ve yoğunlaştırıcı mercekli (konsantratör) güneş hücresi ile en yüksek verim değeri %46 olup (FraunhoferISE, 2014) bu tez kapsamında kullanılacak olan HIT güneş hücresi teknolojisinde ulaşılan en yüksek verim değeri %26,6'dır (Yoshikawa vd., 2017b). Fotoğraf 1.1(b) ve Fotoğraf 1.1(c)'de hücrelerin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil.1.2. Vanguard 1 uydusu (NASA, 2018)



Fotoğraf 1.1. %6 verime sahip ilk c-Si güneş hücresi ile yapılmış olan mini modül (a) (Mertens, 2013) HIT güneş hücresinde %26,6 verim değerine sahip hücre (b) (Kaneka, 2017) ve tüm güneş hücreleri içerisinde %46 ile en yüksek verime sahip hücre (c) (FraunhoferISE, 2014)

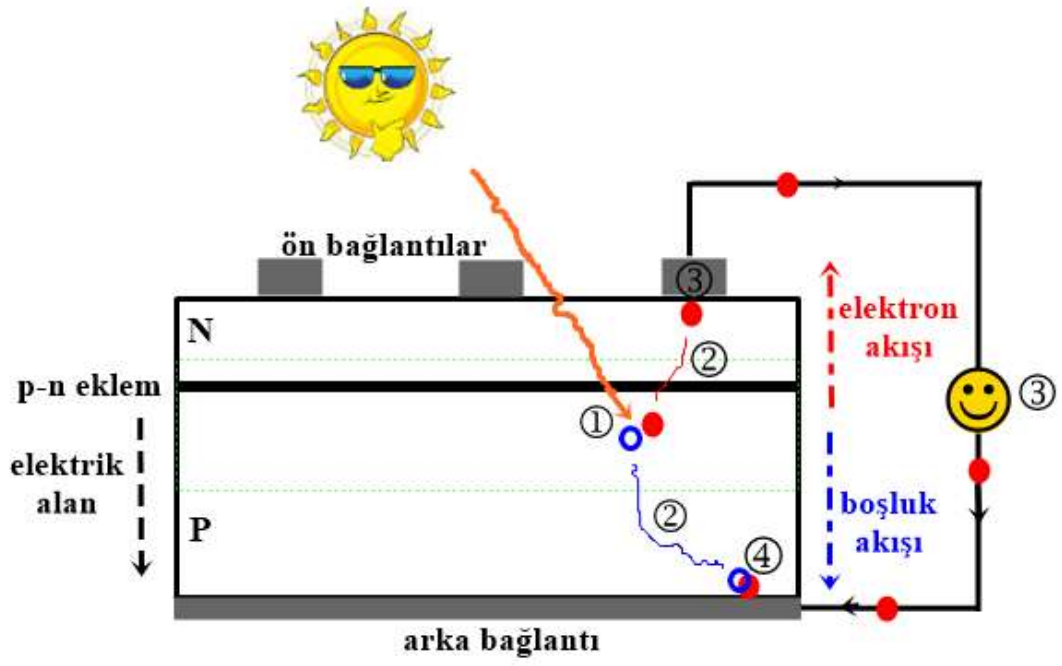


Şekil 1.3. c-Si güneş hücrelerinin yıllara göre verim gelişimi (Kalogirou, 2017)

1.2.2 Çalışma prensibi

Güneş hücreleri güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürebilen elektronik cihazlardır. Güneş hücresi üzerine düşen ışıktan elektrik enerjisi elde etmek için gerilim ve akım üretir. Bu enerji dönüşümü p tipi ve n tipi katkılanmış yarı iletken malzemeler aracılığıyla gerçekleşir. Basit çalışma prensibi Şekil 1.4'de gösterildiği gibi şu adımlardan oluşur:

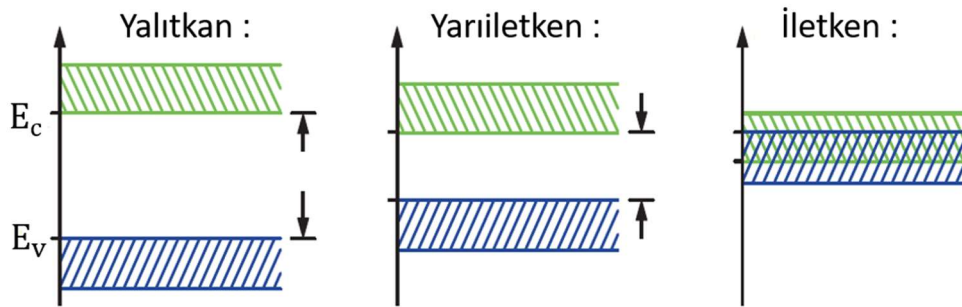
- 1- Güneş ışığının (fotonun) hücre tarafından emilmesi ve yük taşıyıcıların (elektron-boşluk çifti) oluşması,
- 2- Elektron-boşluk çiftinin elektrik alan etkisiyle ayrılması,
- 3- Elektronların metal bağlantılar aracılığıyla toplanması ve harici devreden geçerek güç üretmesi,
- 4- Devrede güç üreten elektronların hücreye geri dönmesi ve elektron-boşluk çiftlerinin yeniden birleşmesidir.



Şekil 1.4. Bir güneş hücresinin kesiti ve çalışma prensibi

1.2.2.1 Yarı iletkenler

Değerlik bandı (E_c) ile iletim bandı (E_v) arasındaki bölgeye yasak enerji bandı (E_g) denir ve bu bölgede elektron bulunamaz. Değerlik bandında bulunan bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için yasak enerji bandı kadar bir ek enerjiye sahip olması gerekir. Silisyumun yasak enerji bandı 1,12 eV'dur. Yasak enerji bandı yalıtkan, yarı iletken ve iletken maddeler için Şekil 1.5'de verildiği gibidir. Yarı iletkenler koşullara göre yalıtkan ve iletken olarak davranabilir. Yarı iletkenlerin sahip olduğu bu özellik onları güneş hücresi teknolojisinde kullanıma yatkın hale getirmiştir.



Şekil 1.5. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken maddelerin yasak enerji bant aralıklarının gösterimi (Mertens, 2013)

Yarı iletkenlerde katkılama

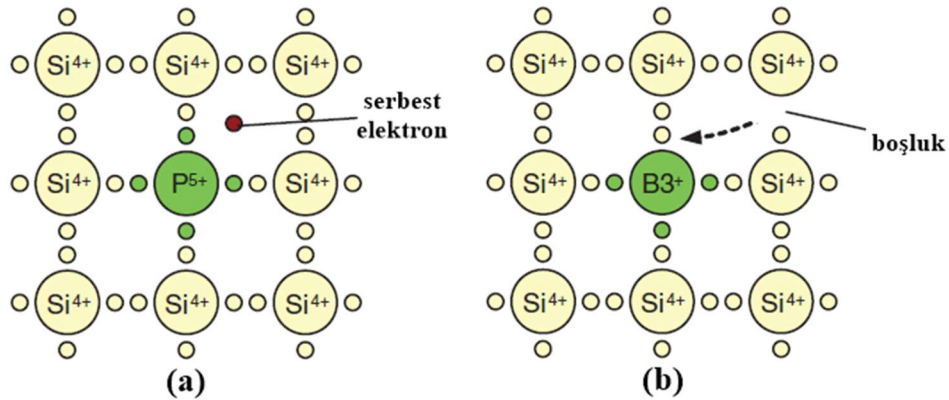
Yarı iletken bir maddenin istenilen şekilde elektriksel özelliklerini değiştirmek için yarı iletken kristaline yabancı atomlar katılır, bu işleme katkılama denir. Örneğin IVA grubu elementlerinin kristal yapısı içerisine IIIA ve VA grubu element atomlarının katılması ile p-tipi ve n-tipi yarı iletkenler üretilir.

n-tipi

Silisyum elementi periyodik tabloda 4A grubunda yer alır ve dört değerlik elektrona sahiptir. Silisyuma 5A grubu elementi olan fosfor (P) ile katkılama yapıldığında, fosforun beş değerlik elektronu silisyumun dört değerlik elektronu ile bağ yapar, açıkta kalan bir elektron bağ yapamaz ve kristal yapı içerisinde serbest elektron olarak dolaşabilir (Şekil 1.6 (a)). n-tipi yarı iletkenlerde elektron fazlalığından dolayı elektronlar çoğunluk taşıyıcı, boşluklarda azınlık taşıyıcıdır. Bu durum kristal yapının iletkenliğini artırır ve yarı iletken neredeyse bir iletken haline gelir.

p-tipi

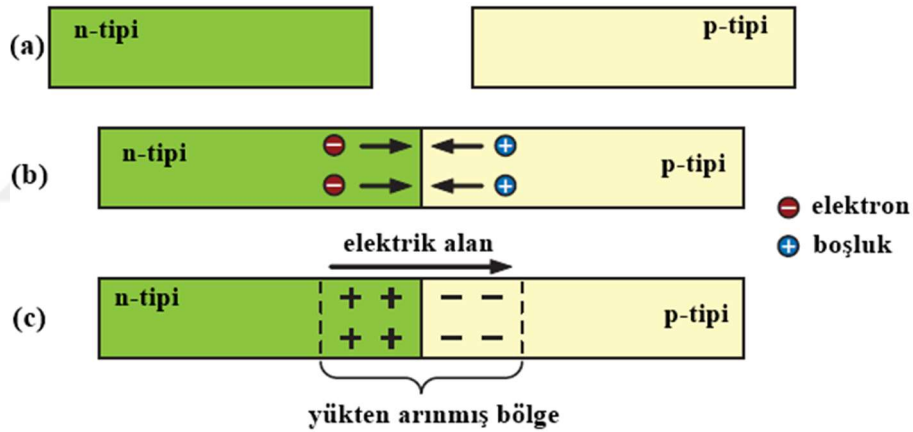
Silisyum elementine 3A grubunda yer alan bor (B) elementi katılanırsa, borun üç değerlik elektronu silisyumun dört değerlik elektronu ile bağ yapar. Açıkta kalan bağa komşu bir elektron hareket eder komşu elektronun ayrıldığı yerde bir boşluk oluşur. Bu yapıda boşluklar çoğunluk taşıyıcı iken elektronlar azınlık taşıyıcı durumdadır.



Şekil 1.6. n-tipi katkılamada kristal yapısı (a) p-tipi katkılamada kristal yapısı (b) (Mertens, 2013)

p-n eklem

P-tipi yarı iletken ile n-tipi yarı iletkenin bir araya getirilmesiyle p-n eklem oluşturulur. Bir araya getirilmeden önce Şekil 1.7 (a)'da her iki yapıda elektriksel olarak nötr durumdadır. Şekil 1.7 (b)'deki gibi bölgeler birleştirildiğinde n-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk taşıyıcı durumda olan elektronlar p-tipi bölgeye, p-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk taşıyıcı durumda olan boşluklarda n-tipi bölgeye doğru akmaya başlar. Şekil 1.7 (c)'de gösterildiği gibi elektronların p tipi bölgeye akmasıyla geride artı, boşlukların n-tipi bölgeye akmasıyla geride eksi yükler kalır ve eklem bölgesi bu durumdan etkilenir. Bu durum yük dengeleninceye kadar sürer ve p-n eklemde yükten arınmış bölge oluşur. Denge kurulduktan sonra akışlar durur ve eklem bölgesinde bir elektrik alan oluşur. Bu durumdayken elektron-boşluk çifti oluşursa elektrik alan elektronları sola boşlukları sağa iter.



Şekil 1.7. Her iki yapı elektriksel olarak nötr, (a) bölgeler birleştirildiğinde yük taşıyıcıların akımı (b) p-n eklem (c) (Mertens, 2013)

Bir güneş hücresinin çalışmasını anlayabilmek için ayrıca hücre parametrelerini anlamak önemlidir. Sonraki adımda güneş hücresi parametreleri incelenmiştir.

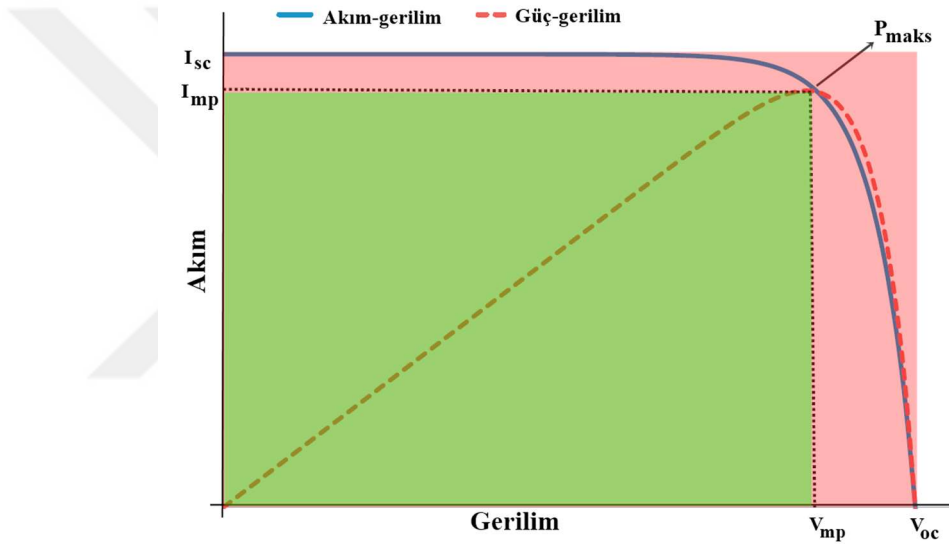
1.2.3 Güneş hücresi parametreleri

Güneş hücrelerini karakterize etmek için kullanılan bazı temel ve önemli parametreler vardır. Bunlar: kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve dolum faktörü (FF) olarak sayılabilir ve verim (η) bu parametreler yardımıyla hesaplanır. Tüm bu parametreler I-V eğrisi kullanılarak belirlenebilir.

1.2.3.1 I-V eğrisi

Güneş hücreleri temelde bir diyot yapısına sahiptir ve elektriksel özellikler açısından benzer davranış gösterirler. İdeal durumda Denklem (1.1) standart diyot formülünde yapılan bazı değişikliklerle güneş hücrelerinin akım ve gerilim ilişkisini göstermede kullanılabilir (Pearsall, 2016). Karakteristik akım-gerilim (I-V) eğrisi Şekil 1.8’de verildiği gibidir.

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



Şekil 1.8. Karakteristik akım-gerilim (I-V) eğrisi

1.2.3.2 Kısa devre akımı (I_{sc})

Kısa devre akımı güneş hücresinin sağlayabileceği maksimum akıp olup güneş hücresinin elektrotları kısa devredeyken harici devre içinden akan akımdır. Bu durumda Denklem (1.1)’de $V=0$ için kısa devre akımı elde edilir. Böylece kısa devre akımı fotoakıma eşit olur ($I_{sc} = I_L$).

Kısa devre akımı, güneş hücresine gelen foton akı yoğunluğuna bağlıdır. Foton akı yoğunluğu gelen ışığın spektrumu ile belirlenir. Standart bir güneş hücresi için ölçümler, AM1.5 spektrumu olarak standartlaştırılmıştır. Buna ek olarak I_{sc} , güneş hücresinin alanına bağlıdır. Güneş hücresi alanının I_{sc} üzerindeki etkisini gidermek için, bir güneş

hücresi tarafından verilen maksimum akımı tanımlamak için kısa devre akımından ziyade kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) sıklıkla kullanılır. Ayrıca, güneş hücresinin sağlayabileceği maksimum akım, hücrenin optik (soğurma, yansıtma ve gölgeleme) özelliklerine bağlıdır (Jäger vd., 2014). Kristal silisyum güneş hücreleri AM1.5 spektrumu altında maksimum $46 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$ akım yoğunluğu sağlayabilir. Laboratuvar ortamında c-Si güneş hücrelerinde ölçülen J_{sc} değeri $42 \text{ (mA/cm}^2\text{'}$ nin üstündeyken, ticari güneş hücresinin J_{sc} değeri $35 \text{ (mA/cm}^2\text{'}$ yi aşmaktadır (Jäger vd., 2014).

1.2.3.3 Açık devre gerilimi (V_{oc})

Açık devre gerilimi, harici devre üzerinden herhangi bir akım akmadığı durumda ölçülen ve bir güneş hücresinin verebileceği maksimum gerilimdir. Denklem (1.1) kullanılarak güneş hücresi çıkış akımına sıfır yazıldığında ($I=0$) V_{oc} elde edilir.

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

Bu denklem V_{oc} 'nin I_L ve I_0 a bağlı olduğunu göstermektedir. Foto akım (I_L) tipik olarak küçük bir değişime sahipken, ana etki doyma akımıdır (I_0). Doyma akımı, güneş hücresinde rekombinasyona bağlıdır. Bu açıdan düşünülürse açık devre gerilimi cihazdaki rekombinasyon miktarının bir ölçüsüdür. Laboratuvar koşullarında kristal silisyum güneş hücreleri, standart koşullarda 720 mV 'a kadar bir V_{oc} değerine sahipken, ticari güneş hücrelerinde 600 mV dolaylarındadır (Jäger vd., 2014).

1.2.3.4 Dolum faktörü (FF)

Dolum faktörü V_{oc} ve I_{sc} ile bağlantılı olarak bir güneş hücresindeki maksimum gücü belirlemeye yarayan bir parametredir ve hücre kalitesinin bir ölçüsüdür. Denklem (1.3)'de verildiği gibi maksimum güç, bu noktadaki maksimum güç gerilimi (V_{mp}) ve maksimum güç akımının (I_{mp}) çarpımı ile bulunur. Denklem (1.4)'de verilen dolum faktörü maksimum gücün V_{oc} ve I_{sc} çarpımına oranı ile bulunur.

$$P_{maks} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (1.3)$$

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

Dolum faktörü I-V eğrisi üzerinden hesaplanacak olursa, Şekil 1.8'deki köşelerini V_{mp} ve I_{mp} 'nin oluşturduğu yeşil dikdörtgenin alanının, köşelerini I_{sc} ve V_{oc} 'nin oluşturduğu pembe dikdörtgenin alanına oranı ile bulunabilir.

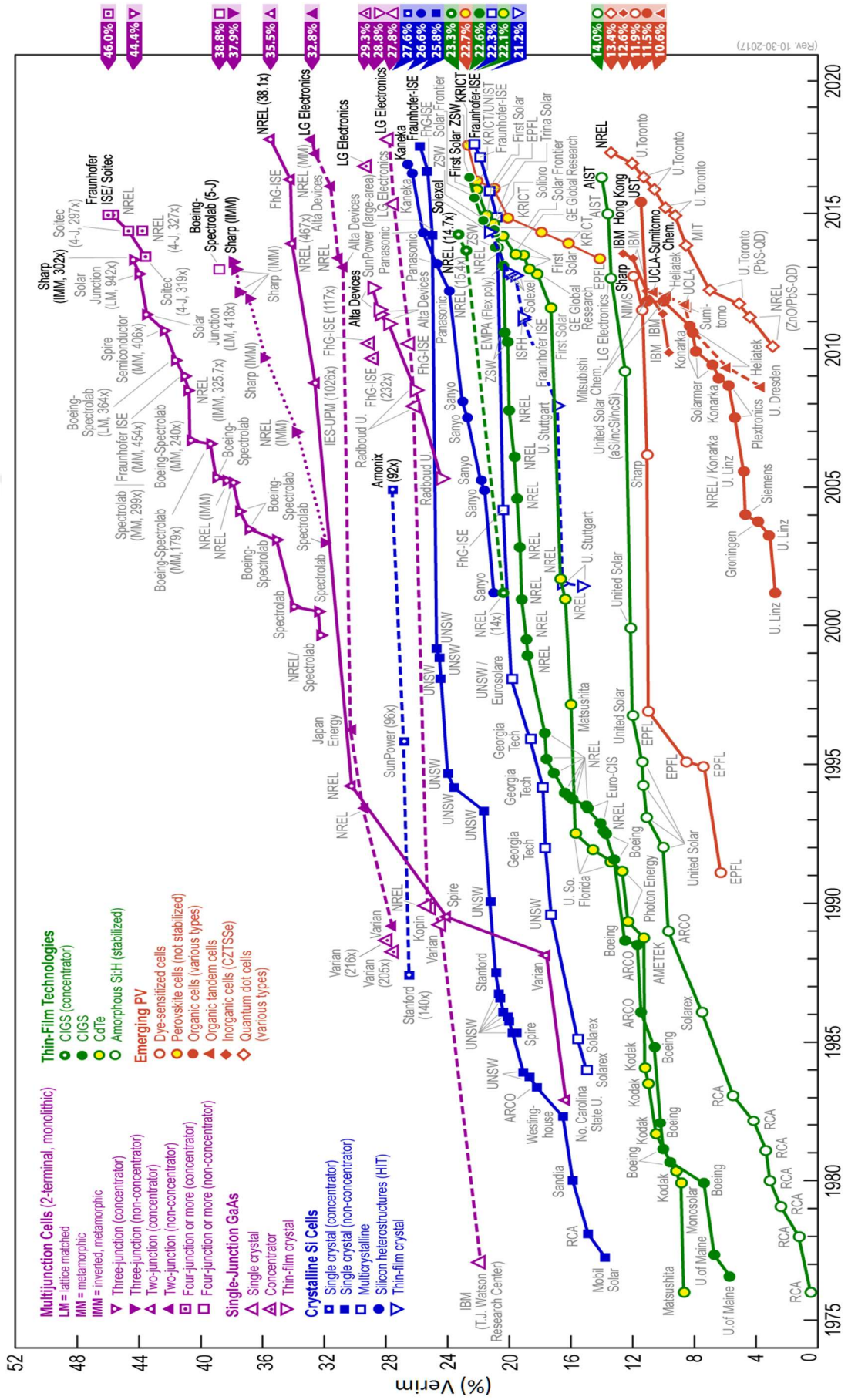
1.2.3.5 Verim (η)

Verimlilik basitçe hücrede üretilen enerjinin güneşten gelen enerjiye oranı olarak tanımlanabilir. Verimlilik güneş hücresinin performansını yansıtır ve bir güneş hücresini diğerine kıyaslamak için en sık kullanılan parametredir. Buna ek olarak güneş ışığının yoğunluğu, spektrumu ve hücrenin sıcaklığı gibi koşullar hücrenin performansını dolayısıyla ölçülen verimi etkiler. Bu yüzden bir hücrenin diğeriyle kıyaslanabilmesi için aynı şartlar altında ölçüm yapılmış olmasına dikkat edilmelidir (Rosa-Clot ve Tina, 2017). Yeryüzünde kullanılan hücreler için temel ölçüm prensiplerinin belirlendiği standartlara (ASTM, 2003; IEC, 2008) göre standart test koşulları (STC): AM1.5 spektrumu, 1000 W/m^2 ışıma ve $25 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktır. Uzay kullanımına yönelik güneş hücreleri için bu standart geçerli olmayıp bu hücreler AM0 koşullarında ölçülür. Bir güneş hücresinin verimini hesaplarken hücre üzerine gelen ışık gücünün (P_{gelen}) ne kadarının elektrik enerjisine (hücreden ölçülen en yüksek güç değeri (P_{maks})) dönüştürüldüğü bulunur ve Denklem (1.6) kullanılır.

$$P_{gelen} = 1000 \text{ W/m}^2 \times \text{hücre alanı} \quad (1.5)$$

$$\eta = \frac{P_{maks}}{P_{gelen}} = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{P_{gelen}} \quad (1.6)$$

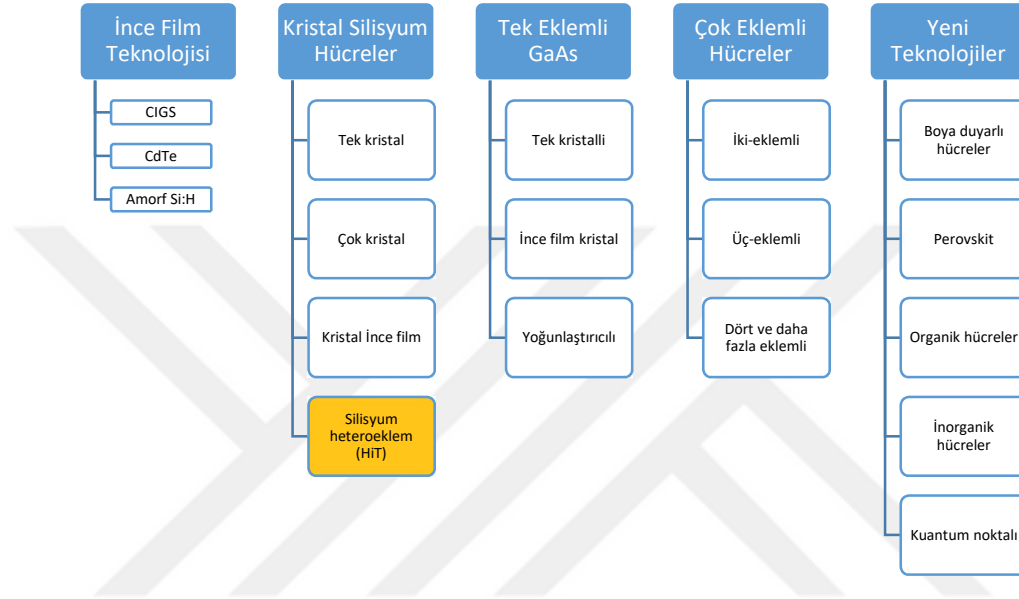
Şekil 1.9 geçmişten günümüze farklı güneş hücresi tipleri için ulaşılmış maksimum verim değerlerini göstermektedir (NREL, 2017).



Şekil 1.9. Güneş hücresi türlerine göre ulaşılmış maksimum verim değerleri (NREL, 2017)

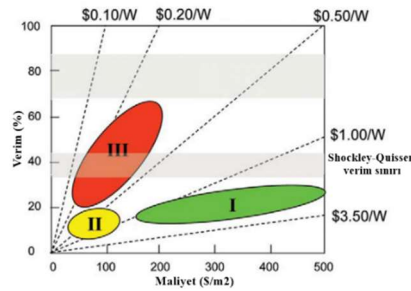
1.2.4 Sınıflandırma ve pazar payı

Güneş hücreleri için birçok farklı sınıflandırma yapılabilir. Şekil 1.10’da verilmiş olan sınıflandırma NREL’nin verim grafiğinde kullanmış olduğu sınıflandırmayı baz alarak yapılmıştır. Bu tez kapsamında kullanılacak olan HIT hücreleri şekilde görüldüğü gibi kristal silisyum hücreler sınıflandırması altında yer almaktadır.



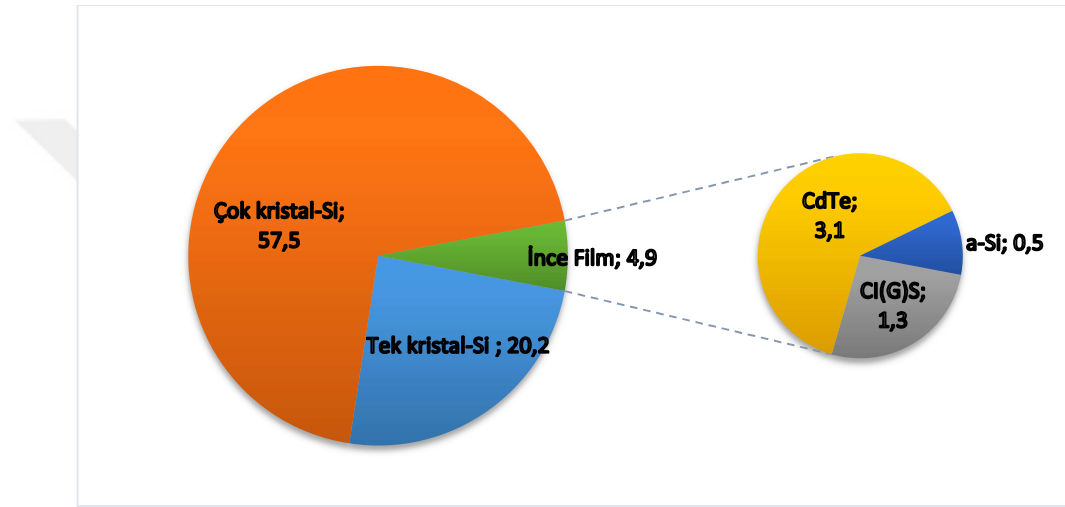
Şekil 1.10. Güneş hücrelerinin sınıflandırılması

Ayrıca güneş hücrelerinde teknolojik gelişim, maliyet ve verim açısından bir başka sınıflandırma şekli nesillere göre sınıflandırmadır: 1. nesil, 2. nesil ve 3. nesil. Şekil 1.11 nesillere göre hücre verimliliği ve maliyet projeksiyonlarını göstermektedir. 1. nesil silisyum tabanlı teknolojiler olup kısmen maliyetli ve verimli, 2. nesil ince film teknolojileri olup düşük maliyetli ve daha az verimli, 3. nesil ileri teknoloji hücreler olup düşük maliyetli ve daha verimli hücre üretilmesini amaçlar.



Şekil 1.11. Birinci, ikinci ve üçüncü nesil güneş hücreleri için verimlilik ve maliyet projeksiyonları (Green, 2006; Conibeer, 2007)

Mevcut piyasada fotovoltaik teknolojilerinin küresel yıllık üretiminde kristal silisyum en yüksek pazar payına sahiptir. Son yayınlanan PV raporuna (Fraunhofer ISE, 2017) göre 2016'da çok kristalli %69,6 ve tek kristal %24,4 olmak üzere PV pazarının yaklaşık %94'ünü c-Si teknolojisi oluşturmaktadır. Diğer ticari teknolojiler olan kadmiyum tellürid (CdTe), bakır indiyum galyum diselenid (CIGS) ve amorf silisyumdan (a-Si) oluşan ince film teknolojisi pazar payının geri kalanını oluşturur. Diğer hücre türleri güç pazarında henüz kullanılmamaktadır (Fraunhofer ISE, 2017). Şekil 1.12 tüm bu ticari ürünlerin yıllık üretim miktarlarını ve yüzdesel dağılımı göstermektedir.



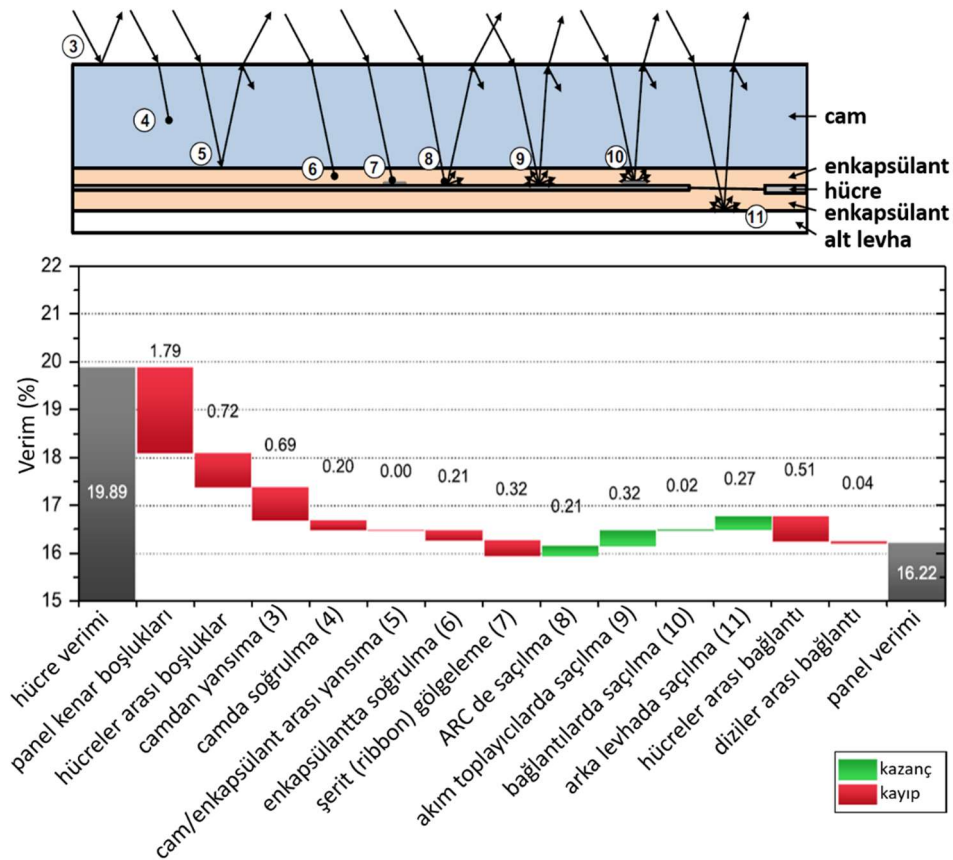
Şekil 1.12. Üretim teknolojilerine göre pazar payı ve yıllık üretim miktarı (GWp)
(Fraunhofer ISE, 2017)

Pazar payı içerisinde (ticarileşmiş) yer alan teknolojilerin hücre ve modül bazında ulaşılmış en yüksek verim değerlerini Çizelge 1.1 göstermektedir. Tek kristal silisyum hücrelerdeki en yüksek verim değeri %26,6 olup bu değere HIT güneş hücresi teknolojisi sayesinde ulaşılmıştır. Çizelgede de görüldüğü gibi hücre ve modül verimleri arasında fark vardır. Hücrelerin modüle göre daha yüksek verime sahip olması beklenen bir durumdur. Genel olarak aktif olmayan modül alanı, yansıma ve emme gibi optik etkiler ve elektriksel etkiler sebebiyle modül verimi hücre verimine göre daha düşüktür. Hücreden modüle dönüşme esnasındaki kayıplar ve kazançlar yapılan bir çalışma (Haedrich vd., 2014) ile detaylı incelemiştir. Bu kayıplara genel bir bakış Şekil 1.13'de verilmiş olup %19,89 verime sahip hücrelerle üretilmiş bir modülün veriminin %16,22 değerine düşüşüne etki eden kayıplar ve kazançlar görülmektedir.

Çizelge 1.1. Hücre ve modül bazında maksimum verim değerleri (Fraunhofer ISE, 2017; Green vd., 2017)

Teknolojiler	η (%)	Alan (cm ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} /J _{sc} (A)	FF (%)
Tek kristal-Si (hücre)	26,7	79	0,738	42,65	84,9
Tek kristal-Si (modül)	24,4	13177	79,5	5,04	80,1
Çok kristalli-Si (hücre)	21,9	4	0,6726	40,76	79,7
Çok kristalli-Si (modül)	19,9	15143	78,87	4,795	79,5
CIGS (hücre)	21,7	1	0,718	40,70	74,3
CIGS (modül)	19,2	841	48	0,456	73,7
CdTe (hücre)	21,0	1	0,8759	30,25	79,4
CdTe (modül)	18,6	7038,8	110,6	1,533	74,2
a-Si (hücre)	14,0	1,045	1,922	9,94	73,4
a-Si (modül)	12,3	14322	280,1	0,902	69,9

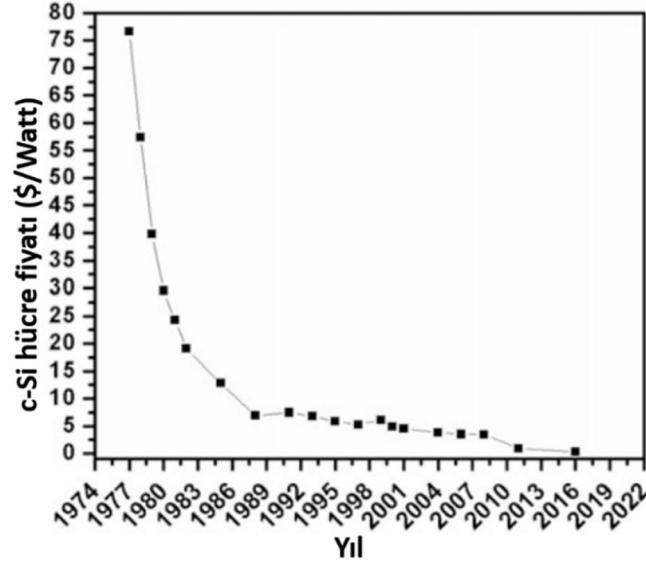
*Çizelgedeki akım değerlerinde hücreler için J_{sc} (mA/cm²) değeri, modüller için I_{sc} (A) değeri kullanılmıştır.



Şekil 1.13. Hücreden modüle dönüşüm esnasındaki kayıplar ve kazançlar (Haedrich vd., 2014)

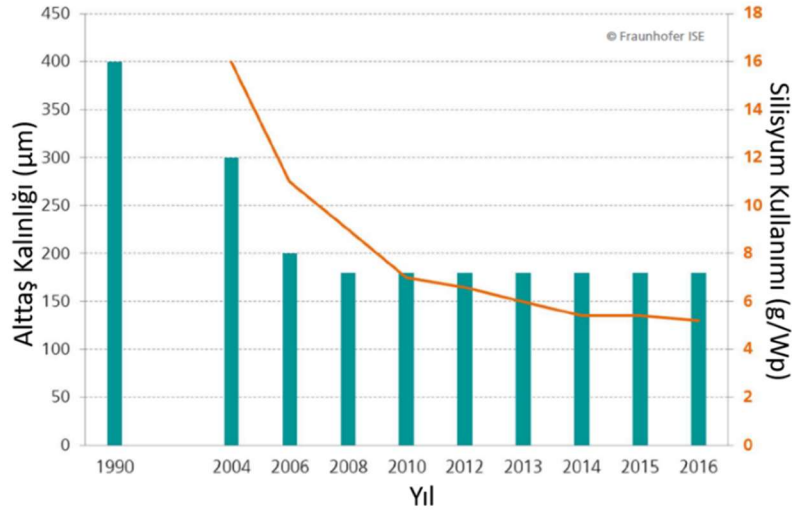
1.3 Motivasyon ve Amaç

Kristal silisyum bir hücrenin maliyeti Şekil 1.14’de görüldüğü gibi 1977’de watt başına 76,67 \$ iken 2000’li yıllarda 5 \$ altına düşmüştür. Günümüzde, c-Si güneş hücrelerinin ortalama maliyeti, diğer herhangi bir teknoloji ile rekabet gücü olan, watt başına 0,22 \$’dır (Energytrend, 2017).



Şekil 1.14. 1974 yılından günümüze watt başına c-Si hücre fiyatları (Solanki ve Singh, 2017)

c-Si hücre maliyetini daha da azaltmak için çalışmalar dünya çapında sürmektedir. c-Si alttaş kalınlığının inceltilmesi ile malzeme kullanımını ve dolayısıyla maliyeti azaltmak hedeflenen amaçlardan biridir. Şekil 1.15’de görülebileceği gibi silisyum hücreler için malzeme kullanımı, son 10-15 yıllık dönemde artan verimlilik ve daha ince alttaş kullanımıyla 16 g/Wp’den 5-6 g/Wp seviyelerine indirilmiştir (Fraunhofer ISE, 2017). Günümüzde kullanılan standart alttaş kalınlığı 180 μm olup bu da güneş hücresi üretim maliyetinin %40’ını oluşturmaktadır (ITRPV, 2017).



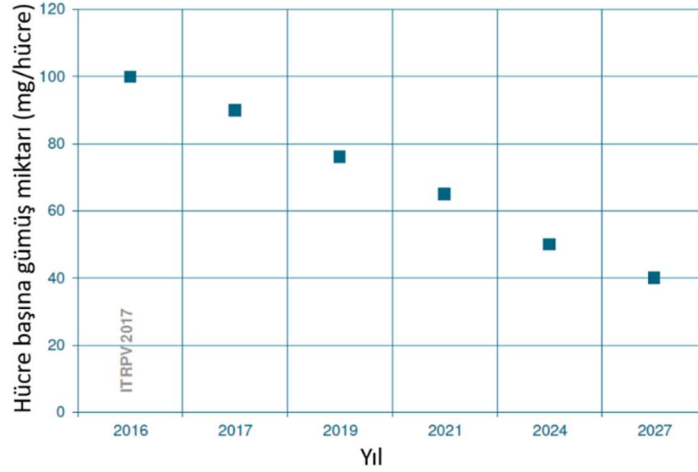
Şekil 1.15. Alttas kalınlığı ve silisyum kullanımının yıllara göre değişimi (Fraunhofer ISE, 2017)

180 µm'den daha ince kalınlıklarda hücre üretmek için bazı sorunlarla başa çıkılması gerekir. Alttas kalınlığı incelidikçe V_{oc} ve I_{sc} dolayısıyla verimde düşüşler olacağı gibi daha ince alttas mekanik dayanımın zayıf olması nedeniyle mekanik ve termal gerilimlerle bükülür. HIT güneş hücresinde ise bu sorunlarla başa çıkılabileceği gösterilmiş ve 100 µm altındaki kalınlıklarda %22'nin üzerinde verim değerine sahip hücreler üretilmiştir (Inoue vd., 2009; Taguchi vd., 2009; Fujishima vd., 2010; Taguchi vd., 2014). Daha ince malzeme kalınlığı için HIT bu anlamda umut vadeden bir teknolojidir.

Alttas maliyetinin yanında hücre üretiminin diğer adımları kalan %60'lık maliyet kısmını oluşturur. Standart hücrelerde hücre üretim proseslerinin çok yüksek sıcaklıklarda yapıldığı bilinmektedir. Fakat HIT güneş hücrelerinin 200 °C altında üretilmesi standart hücrelere göre daha az bir maliyet gerektirir. Bu açıdan bakıldığında halihazırda yüksek verimlilik vaadeden HIT güneş hücreleri maliyet olarak daha uygun bir imkan sağlamaktadır. Bölüm 3 HIT güneş hücrelerinin detaylı bir incelemesini içermektedir.

Bir güneş hücresinin üretiminde alttas maliyetinden sonra en pahalı ikinci adım metalizasyon işlemidir. Metalizasyonda kullanılan gümüş pasta miktarı ve fiyatı değişkendir. Şekil 1.16 hücre başına gümüş kullanım miktarının yıllara göre eğilimini ve gelecek yıllar için beklentileri göstermektedir (ITRPV, 2017). 2017 yılı için hücre başına ortalama 90 mg gümüş kullanımı söz konusudur (ITRPV, 2017). 2017 yılı gümüş fiyatı 548 \$/kg (2.500 TL/kg)'dır (ITRPV, 2017). Buda şuan için hücre başına yaklaşık 0,05

\$/hücre değerine denk gelmektedir. Metalizasyonun optimizasyonu ve/veya farklı daha ucuz bir metalizasyon tekniğinin kullanılması ile bu maliyet düşürülebilir. Bölüm 4 metalizasyon işleminin detaylı inceleneği kısım olacaktır.



Şekil 1.16. Hücre başına gümüş kullanım miktarı eğilimi ve beklentiler (ITRPV, 2017)

1.4 Tez İçeriği

Tez çalışmasının birinci bölümünde güneş enerjisi ve güneş hücrelerine genel bir bakış yapılmış, temel tanımlar kısa ve öz bir şekilde verilmiştir. İkinci bölümde bir güneş hücresinin performansı üzerinde etkili olan kayıp mekanizmalarının anlaşılması adına hücrede etkili olan temel ve teknolojik kayıplar incelenmiştir. Üçüncü bölümde c-Si güneş hücreleri içerisinde hem verim değeri hem de maliyet açısından dikkat çeken HIT güneş hücreleri detaylı bir incelemeye tabi tutulmuştur. HIT güneş hücrelerinin geçmişten günümüze gelişimi ve bir HIT hücresinin üretim adımlarının literatür kapsamında incelenmesi yapılmıştır. Dördüncü bölümde maliyet ve verim üzerinde önemli bir etkiye sahip olan metalizasyon konusu üzerinde durulmuş ve ön yüz metalizasyon dizaynının optimizasyonu yapılmıştır. Beşinci bölümde deneysel çalışmalara yer verilmiş olup, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde silisyum alttaştan başlanarak tüm üretim adımlarının uygulanması ile HIT güneş hücresi üretiminin detayları verilmiştir. Üretilen hücreler üzerine optimizasyonu yapılan ön yüz metalizasyon dizaynlarının uygulanması üzerinde durulmuş ve yakın bir zamanda ön yüz metalizasyon tekniği olarak kullanılması beklenen PVD yönteminin maske yardımı ile ön yüz metalizasyon işleminde kullanımının detayları verilmiştir. Tez çalışmasından elde edilen sonuçlarda yine beşinci bölüm sonunda verilmiştir.

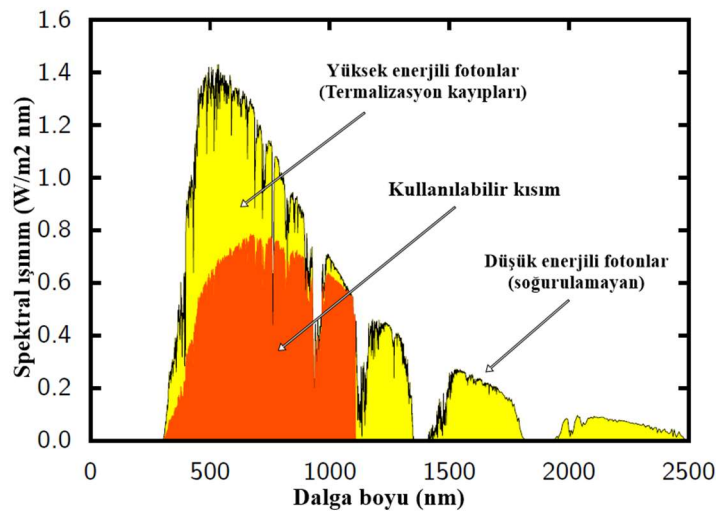
BÖLÜM II

FİZİKSEL VE TEKNOLOJİK LİMİT KISITLAMALARI (KAYIPLAR)

Bir güneş hücresinin gelen ışığı neden %100 oranında elektriğe çeviremediğini anlamak önemlidir. %100 verime ulaşılmasının önünde birçok farklı verim kısıtlaması (limit) mevcuttur. Örneğin en temel limit, termodinamik verim limitidir. Güneş ışınımının elektriğe çevrilmesindeki fiziksel limiti belirtir ve %85 (Jäger vd., 2014) dolaylarındadır. Bu bölümün sonraki kısımlarında güneş hücresindeki diğer verim kısıtlamaları incelenecek olup günümüz verim değerlerinin %20'li seviyelerde (tek eklemli hücreler için) oluşunun nedeni de anlaşılabilecektir. Verimin bu seviyelerde olmasında etkili önlenemeyen temel (ana) kayıplar ve teknolojik gelişmelerle önlenebilecek teknik (teknolojik) kayıplar üzerinde durulacaktır.

2.1 Temel (Ana) Kayıplar

Tek eklemli ve 1 güneş aydınlatması koşulları altında güneş hücresinin ulaşabileceği maksimum teorik verim değeri %29-30'dur (Shockley ve Queisser, 1961). Güneş hücresinin doğası gereği belli bir sınırın ötesinde önlenemeyen veya azaltılamayan kayıplar vardır. Bu kayıplara temel (ana) kayıplar denir. Şekil 2.1 c-Si güneş hücreleri için güneş spektrumunun kullanılabilen kısmını göstermektedir.



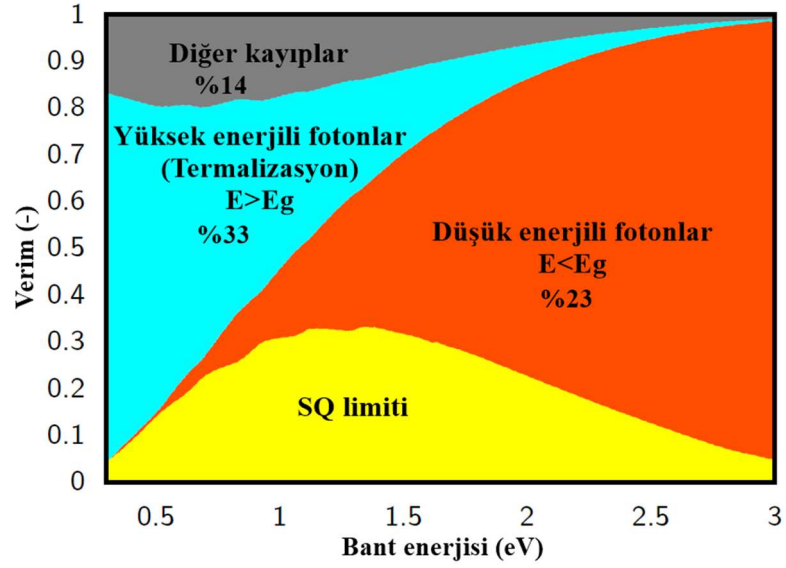
Şekil 2.1. Kristal silisyum bir güneş hücresi için ($E_g=1.12$) AM1.5 spektrumunun kullanılabilir enerjiye dönüştürülebilir kısmı (Jäger vd., 2014)

Şekilde de belirtildiği gibi güneş spektrumu tam olarak soğurulamaz ve kullanılabilir kısım sınırlıdır.

Temel kayıplar aşağıda sıralandığı gibi ifade edilebilir (Solanki, 2015):

1. Düşük enerjili fotonlar sebebiyle kayıp ($E < E_g$): Malzemenin yasak bant aralığının altında enerjiye sahip fotonlar hücre tarafından soğurulamaz ve dolayısıyla elektron-boşluk çifti oluşturulamaz.
2. Yüksek enerjili fotonlar sebebiyle kayıp - Termalizasyon ($E > E_g$): Malzemenin yasak bant aralığından daha yüksek enerjiye sahip fotonların $E - E_g$ kadarlık fazla enerjisi hücrede ısıya dönüşür. Buna termalizasyon kaybı denir. Kayıplar içerisinde etkisi en yüksek olan termalizasyon sebebiyle olan kayıplardır. 1 ve 2 numaralı kayıplara spektral uyumsuzluk kaybı denir ve bu durum verimi kısıtlayan en önemli etkidir.
3. Voltaj kayıpları ($V_{oc} < E_g/q$): Bir güneş hücresinde ulaşılacak maksimum gerilim değeri V_{oc} 'dir. V_{oc} değeri önlenemeyen bazı rekombinasyon kayıpları nedeniyle yasak bant aralığı voltajından her zaman daha düşüktür. Bu duruma voltaj kaybı denir.
4. Dolum faktörü kayıpları ($FF < 1$): İdeal bir güneş hücresinde $FF=1$ ve I-V eğrisi kare bir biçimde olacaktır. Fakat gerçekte önlenemeyen bazı parazit dirençler sebebiyle I-V eğrisi kare şeklinden sapma gösterir ve $FF = 1$ olamaz.

3. nesil güneş hücrelerinin ana araştırma konusu bu temel kayıplar üzerinedir (Green, 2006). Şekil 2.2 SQ limitinin temel kayıplarla birlikte farklı dalga boylarına göre değişimini göstermektedir. Şekilde geçen diğer kayıplar voltaj kayıpları ve dolum faktörü kayıplarını ifade etmektedir. Şekilde verilen oranlar tek eklemlili c-Si güneş hücresi içindir.



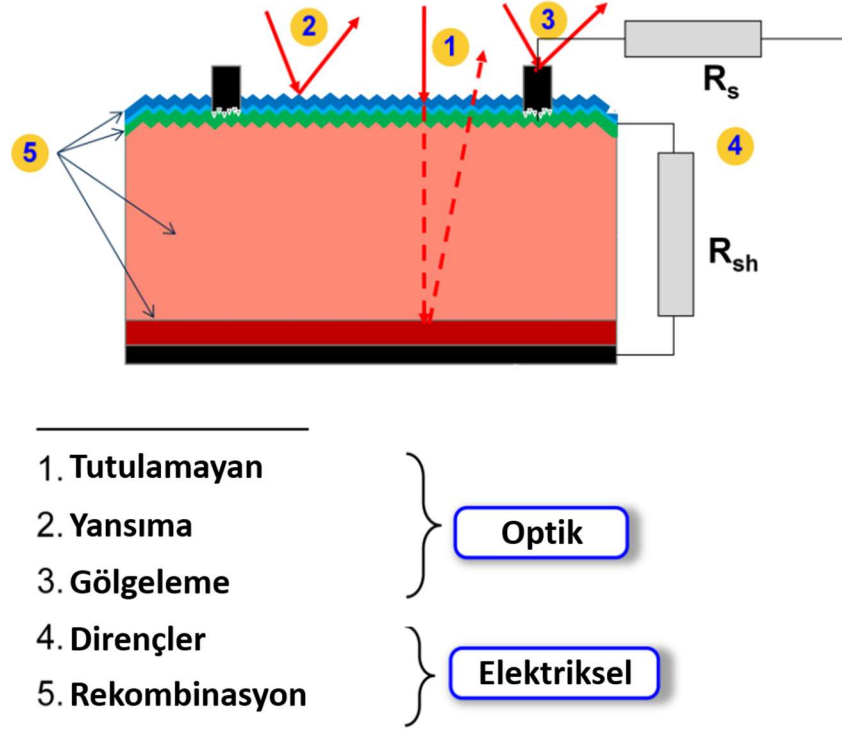
Şekil 2.2. SQ limiti ve temel kayıpların dağılımı (Jäger vd., 2014) ve oranları (Solanki, 2015; Dupré vd., 2016)

2.2 Teknik Kayıplar

Kristal silisyum güneş hücreleri için teorik verim sınırı yapılan çalışma ile %29,43 bulunmuştur (Richter vd., 2013). Bu teorik verim değeri ile gerçek hücrelerde ulaşılan verim değeri arasında fark vardır. Uygulamada elde edilen verimler birçok kayıp mekanizması nedeniyle bu teorik verimin altındadır. Güneş hücresi verimini kısıtlayan bu kayıpları anlamak ve analiz etmek önemlidir. Bunlar teknik (teknolojik) kayıplardır ve önlenemezler. Teknik kayıplar optik ve elektriksel kayıplar olarak sınıflandırılabilir.

Optik kayıplar, soğurulması durumunda hücrede elektron-boşluk çifti oluşturabilecek fotonların kaybıdır ve bu durum kısa devre akımını düşürür. Bu kayıplar; yüzeyde fotonların yansıması, hücre yüzeyindeki metalizasyonun sebep olduğu gölgeleme kayıpları ve kısıtlanmış hücre kalınlığı nedeniyle tutulamayan fotonları içerir.

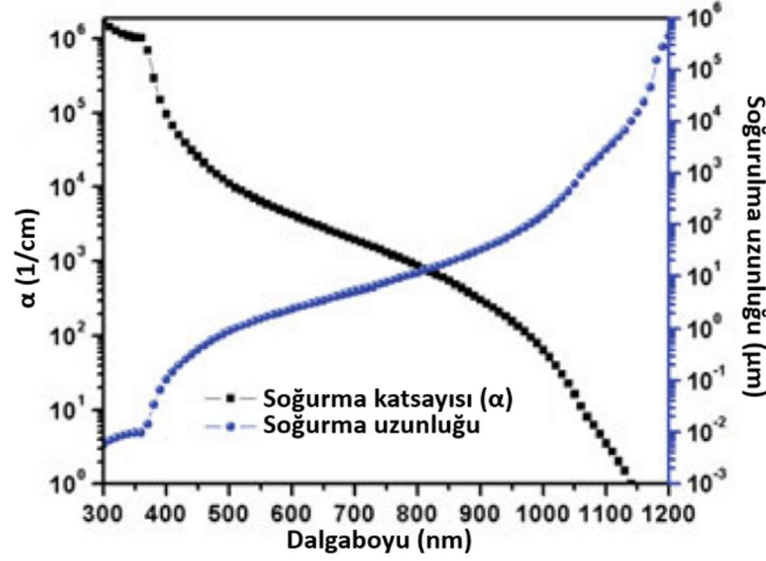
Elektriksel kayıplarda ise fotonlar hücre tarafından soğurulmuş fakat güç üretimine katkıda bulunamamıştır. Elektriksel kayıplar rekombinasyon kayıpları ve direnç kayıplarıdır. Bu kayıplar hem kısa devre akımını hem de açık devre voltajını düşürürler. Şekil 2.3’de teknik kayıplar gösterilmiştir (Lai, 2014).



Şekil 2.3. Bir güneş hücresindeki teknik kayıplar (Lai, 2014)

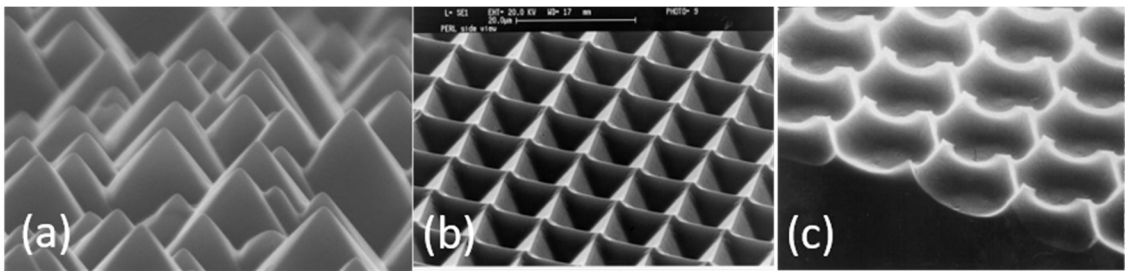
2.2.1 Tutulamayan fotonlar nedeniyle kayıp

Bu kayıp elektron-boşluk çifti oluşturmak için yeterli enerjiye sahip fakat hücredeki optik yol uzunluğunun (hücre kalınlığı) yetersiz olması nedeniyle soğurulamayan uzun dalga boylu fotonların kaybıdır. Silisyum sahip olduğu bant enerjisi sebebiyle 300 nm-1120 nm dalga boyu aralığını soğurabilir. Fakat bu olayda silisyum malzemenin kalınlığı çok önemli bir etkidir. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi 100 μ m kalınlığındaki bir silisyum dilimi 950 nm dalga boyuna kadar olan ışığı soğurmaya yetebilir. Bununla birlikte 950 nm-1120 nm aralığındaki uzun dalgalar için çok daha kalın malzeme gerekir. Örneğin 1150 nm dalga boyu için gerekli malzeme kalınlığı yaklaşık 10 mm’dir. Bu şekilde kalın bir malzeme özellikle maliyet açısından uygulanabilir değildir (Solanki ve Singh, 2017). Bununla birlikte, ışık güneş hücresinde birçok kez ileri geri hareket ettirilebilirse, güneş hücresinin geometrik kalınlığı aynı kalırken optik kalınlığı artırılabilir. Bu durum uygun şekilde optimize edilmiş ışık tutma yapısı (light-trapping) ile elde edilebilir. Işık tutma yapısı için aynı zamanda yansıma önlemede kullanılan yüzey desenlendirme (texturing) işlemi kullanılır. Böylece çok kalın bir malzeme kullanımı ve dolayısıyla maliyet artışı önlenir (Solanki ve Singh, 2017).



Şekil 2.4. Farklı dalga boylarına göre soğurma katsayısı ve ışığı tamamen soğurmak için gereken uzunluk (Solanki ve Singh, 2017)

Işık tutma yapısı ile amaç ışığın malzeme içerisinden geçip gitmeden birden çok kez yansıtılarak ışığı daha uzun süre malzemede tutmak böylece optik kalınlığın artırılması ile ışığın soğurulmasına yardımcı olmaktır. Bu yapıda kullanılan yüzey desenlendirme işleminin farklı türleri Şekil 2.5’de (Honsberg ve Bowden, 2015) gösterilmiştir. Şekil 2.5 (a) tek kristalli silisyum hücrelerde kullanılan rasgele piramit yapısını, Şekil 2.5 (b) PERL hücrelerde kullanılan ters piramit yapısını ve Şekil 2.5 (c) çok kristalli silisyum hücrelerde kullanılan bal peteğine benzeyen yapıyı göstermektedir (Honsberg ve Bowden, 2015).

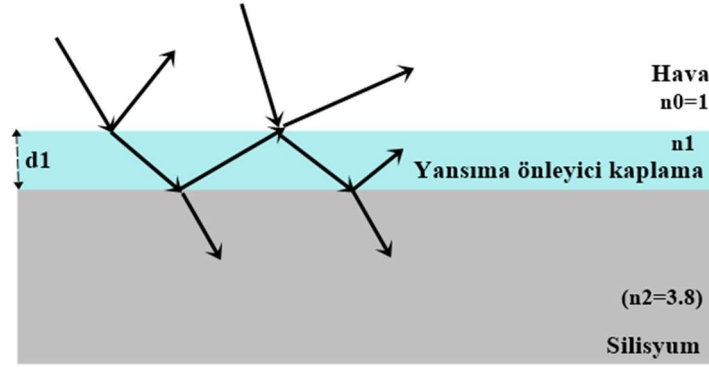


Şekil 2.5. Yüzey desenlendirme işleminin farklı türleri; rasgele piramit yapısı (a) ters piramit yapısı (b) bal peteği benzeri yapı (c) (Honsberg ve Bowden, 2015)

2.2.2 Yansıma kayıpları

Yansıma kayıpları, gelen fotonların güneş hücresi yüzeyinden yansması ve soğurulamamasıdır. Bu durum yansıma önleyici kaplama (ARC) ve yüzey desenlendirme

işlemi ile minimize edilebilir. Silisyum malzeme herhangi bir yansımaya önleyici işlem uygulanmamışsa gelen ışığın %30-%35 kadarını yansıtır (Green, 1982; Goetzberger vd., 1998). Yansımaya önleyici kaplama (Şekil 2.6) ve yüzey desenlendirme işlemi ile bu oran Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi düşürülebilir. Yansımaya önlem olarak sadece ARC ya da sadece yüzey desenlendirme işlemi kullanılacağı gibi her iki yöntemin birlikte kullanılması çizelgede de görüleceği gibi en iyi sonucu verecektir.



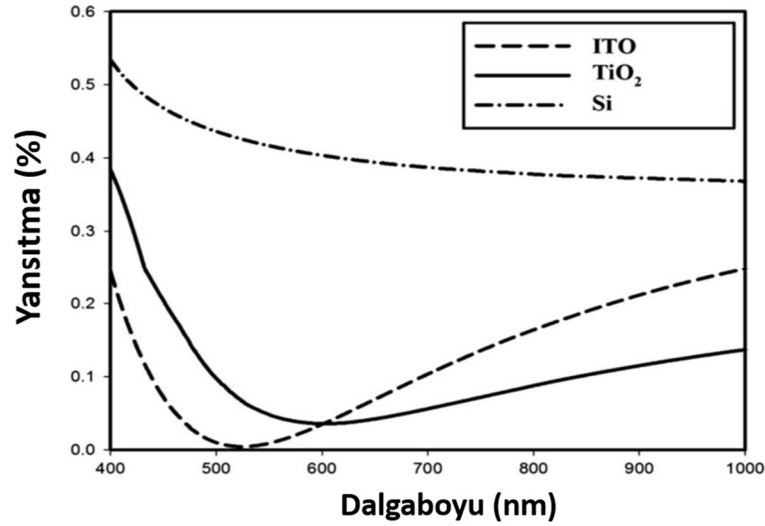
Şekil 2.6. Yansımaya kayıplarını önlemede kullanılan yansımaya önleyici kaplama

Çizelge 2.1. Yansımaya önleyici kaplama ve yüzey desenlendirme uygulanmış hücrelerin yüzde olarak yansıtma değerleri

	(Green, 1982)	(Goetzberger vd., 1998)
Silisyum	%30	%35-%50
Silisyum + Y*	%10	-
Silisyum + ÇY	%4	%3-%4
Silisyum + D	%11	%10
Silisyum + D + Y	%3	%3

* Kısaltmalar: Yansımaya önleyici kaplama (Y), çift katman yansımaya önleyici kaplama (ÇY), yüzey desenlendirme (D)

Ayrıca tez kapsamında kullanılan HIT güneş hücresinde ITO yansımaya önleyici kaplama görevi gören katman olacaktır. ITO’nun farklı dalga boylarına göre yansıtma oranlarının değişimi ve yaygın olarak kullanılan yansımaya önleyici TiO_2 ile kıyaslanması Şekil 2.7’de gösterildiği gibidir (Ali vd., 2014).



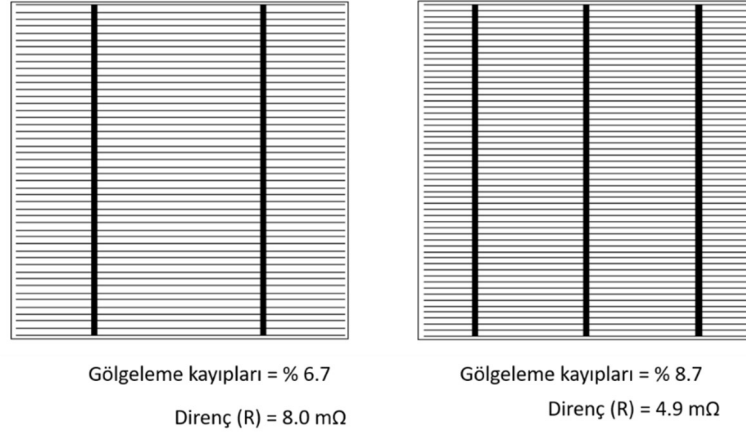
Şekil 2.7. ITO için dalga boyuna göre yansıtma oranlarının değişimi (Ali vd., 2014)

2.2.3 Gölgeleme kayıpları (Alan kayıpları)

Güneş hücresine gelen ışığın elektrik üretimine katkıda bulunabilmesi için hücre yüzeyinden içeri girebilmesi gerekir. Işığın hücreden içeri girebildiği ve elektrik üretimine katkıda bulunabildiği bu yerlere aktif alan denir. Üretilen elektriğin toplanabilmesi için hücre yüzeyinde metalizasyon olarak adlandırılan metal bağlantılar konumlandırılmıştır. Bu metal bağlantılar hücre yüzeyinde olduğundan gelen ışık aktif olmayan bu alanlardan hücre içerisine giremez ve bu durum gölgeleme kayıpları olarak adlandırılır. Gölgeleme hücre yüzeyindeki aktif alanı düşürdüğünden kısa devre akımı bu durumdan etkilenecektir. Hücre yüzeyinde ki metal bağlantılar kalın akım toplayıcıları ve ince akım toplayıcılarından oluşur. Gölgeleme kayıpları kalın akım toplayıcı ve ince akım toplayıcıların genişliğinin azaltılmasıyla düşürülebilir fakat bu durumda Denklem (2.1)'de verilen temel direnç denkleminde anlaşıldığı üzere genişlikle ters orantılı olarak direnç artacaktır. Şekil 2.8 gölgeleme kayıpları ve direnç kayıpları arasındaki ilişkiyi bir örnekle göstermektedir. Bu nedenle gölgeleme ve direnç kayıplarının dengelenmesi ve optimum dizaynı gereklidir.

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho l}{wt} \quad (2.1)$$

Piyasadaki hücrelerin gölgeleme kayıpları yaklaşık %7-%10 dolaylarındadır.



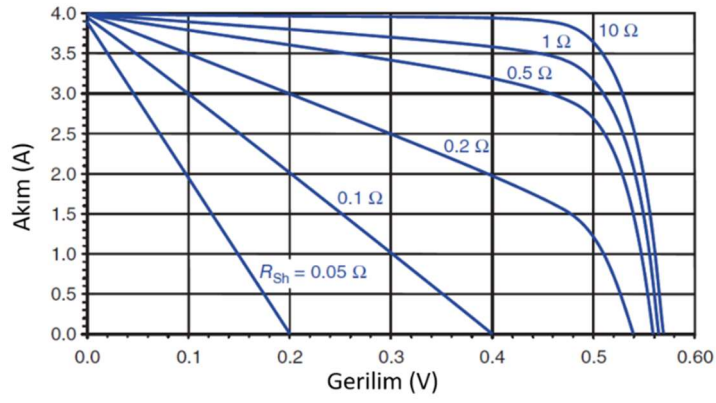
Şekil 2.8. 2 ve 3 busbara sahip hücreler için gölgeleme ve direnç değerleri değişimi (Burgers, 2005)

2.2.4 Direnç kayıpları

Direnç kayıpları bir güneş hücresinin seri direnci (R_s) ve şönt direncinin (R_{sh}) sonucudur. Bu dirençler güneş hücresi FF değerini dolayısıyla verimini etkilerler. Yüksek bir FF ve verim elde etmek için, bir güneş hücresinin seri direnci mümkün olduğunca düşük ve şönt direnci mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Denklem (1.1)'de verilen temel denklem ideal hücre için geçerliken gerçekte seri direnç ve şönt direncin etkilerinin hesaba katıldığı denklem aşağıdaki gibidir (Pearsall, 2016);

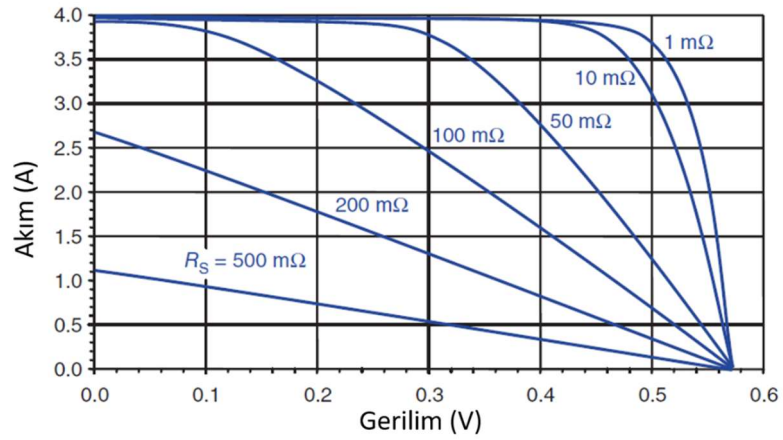
$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

Güneş hücrelerinde şönt direnci genellikle üretim kusurları kaynaklıdır. Kristal kusurlara ve safsızlıklara sahip bölgelerde ve hücre kenarları etrafındaki p-n birleşiminde düşük şönt direnci sebebiyle kaçak-sızıntı akımlar meydana gelir. Şönt direnci ne kadar büyük olursa bu kaçak akımlar o derece az olacaktır. Şekil 2.9 şönt direncinin değişiminin I-V eğrisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekilde görüleceği gibi şönt direncinin azalmasıyla I-V eğrisinin dikdörtgen karakteristiğinin bozulduğu ve FF değerinin düştüğü görülmektedir (çok düşük R_{sh} değerlerinde V_{oc} 'nin de düştüğü görülür). Şönt direncinin değerinin mümkün olduğunca yüksek olması arzu edilir. Şönt direnci güneş hücrelerinde bir tasarım parametresi değilken seri direnç bir tasarım parametresidir (Solanki, 2015).



Şekil 2.9. Şönt direncinin güneş hücresi karakteristik eğrisine etkisi: dolum faktörü düşen R_{sh} ile önemli ölçüde azalır (Mertens, 2013)

Bir güneş hücresinin seri direnci genellikle metalizasyon tasarımı ve metalizasyon kalitesinden etkilenir. Yüksek temas direnci, ince ve kalın akım toplayıcılardaki kesikler gibi sorunlar, güneş hücresi seri direncini daha da yükseltecektir. Şekil 2.10’da görüldüğü gibi seri direnç artarsa, akımın akışı esnasında daha fazla güç kaybı olacak ve böylece FF düşecektir (çok yüksek R_s değerlerinde I_{sc} ’nin de düştüğü görülür).



Şekil 2.10. Seri direncin güneş hücresi karakteristik eğrisine etkisi: dolum faktörü yükselen R_s ile önemli ölçüde azalır (Mertens, 2013)

Daha öncede belirtildiği gibi seri direnç tasarım parametresidir ve seri direnci oluşturan bileşenlerin bilinmesi, seri direnci en aza indirecek şekilde hücrenin tasarlanması açısından önemlidir. Seri direnci oluşturan bileşenler 4. Bölümde detaylı incelenecek olup şunlardır (Meier vd., 2006);

- ön metalizasyonu oluşturan ince akım toplayıcıların direnci (R_{finger})

- kalın akım toplayıcıların direnci (R_{busbar})
- metal-yarı iletken ara yüzeylerdeki temas direnci (R_{temas})
- yayıcı tabakanın direnci ($R_{\text{yayıcı}}$)
- yarı iletken alttaşın direnci ($R_{\text{alttaş}}$)

2.2.4 Rekombinasyon kayıpları

İletim bandındaki bir elektronun güç üretimine katkıda bulunamadan değerlik bandındaki bir boşlukla birleşip birbirini yok etmesi olayı rekombinasyon olarak adlandırılır. Birleşme ile ortaya çıkan fazla enerji çeşitli şekillere (foton, ısı vs.) dönüşür ve hücrenin enerjisine bir katkıda bulunmaz.

Rekombinasyon oranı, yük taşıyıcı ömrünü sınırlayan bir faktördür. Rekombinasyon oranının artması Denklem (2.3)'de gösterildiği gibi yük taşıyıcı ömrünü azaltılır. Bu nedenle güneş hücresi verimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Rekombinasyon oranı ve yük taşıyıcı ömrü (lifetime) arasındaki ilişki şöyledir;

$$U \equiv \frac{\Delta n}{\tau} \quad (2.3)$$

Burada U rekombinasyon oranını ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$), τ azınlık taşıyıcı ömrünü (s), Δn fazla taşıyıcı yoğunluğunu (cm^{-3}) göstermektedir.

Bir güneş hücresinde dört farklı rekombinasyon türünden bahsedilebilir bunlar;

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

2.2.4.1 Radyatif (Işımalı) rekombinasyon

Bu rekombinasyon bir fotonun Emilimi ile elektron-boşluk çifti oluşturma durumunun tersi bir işlemdir. Radyatif (ışılı) rekombinasyonda, Şekil 2.11 (a)'da gösterildiği gibi

iletim bandındaki uyarılmış elektron doğrudan değerlik bandına geri düşer ve değerlik bandındaki bir boşluğu yok eder. Bu durumda ortaya çıkacak enerji bir foton formunda serbest bırakılır ve bu enerji yarı iletken band aralığı enerjisine karşılık gelir. Bu rekombinasyon süreci GaAs gibi doğrudan (direkt) band aralığına sahip yarı iletkenlerde Si gibi dolaylı (indirekt) band aralığına sahip yarı iletkenlere göre daha önemlidir (Lai, 2014).

2.2.4.2 Auger rekombinasyonu

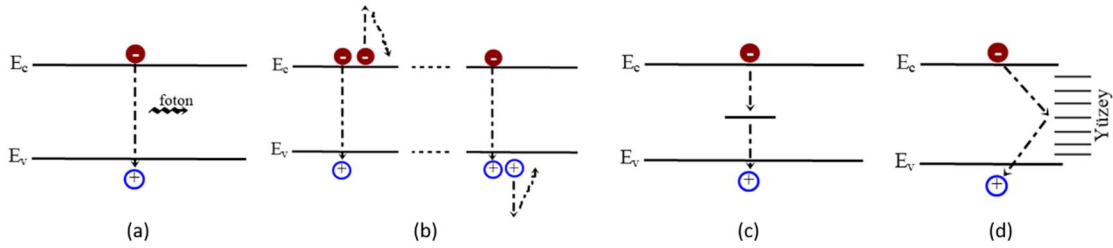
Auger rekombinasyonu, bir iletim bant elektronunun ve bir değerlik bant boşluğunun tekrar birleştiği, ortaya çıkan fazladan enerjinin ısı ya da foton formunda atılması yerine üçüncü bir serbest elektrona veya boşluğa aktarıldığı bir üç parçalık etkileşimi olarak tanımlanabilir (Kerr ve Cuevas, 2002). Bu durumda uyarılan üçüncü elektron veya boşluk enerjisini fonon biçiminde kafes yapısına yayar. Şekil 2.11 (b)'de gösterildiği gibi uyarılan bu elektron veya boşluk enerjisini yadıktan sonra ilk enerjisine geri döner. Özellikle yüksek katkı yarı iletkenlerde iletim bandındaki serbest elektron sayısı (n) ve değerlik bandındaki boşluk sayısı (p) arttığından dolayı Auger rekombinasyon oranı artar. Düşük taşıyıcı yoğunluğunda Auger rekombinasyon oranı çok küçüktür.

2.2.4.3 Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu

SRH rekombinasyonu, kristal kafesteki safsızlıklar ve dislokasyonlar (kusur) sebebiyle yarı iletkenin yasak band aralığı içinde enerji seviyeleri oluşması nedeniyle meydana gelir. Şekil 2.11 (c)'de gösterildiği gibi elektronlar önce iletim bandından kusur sebebiyle oluşmuş enerji seviyesine oradan da değerlik bandına düşer ve boşlukla birleşirler. Bu süreç ilk kez (Shockley ve Read Jr, 1952) ve (Hall, 1952) tarafından tanımlanmıştır. Bu yüzden bu rekombinasyon türü Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu olarak adlandırılır. Özellikle ucuz metalürjik silisyumun dökme malzemesindeki tuzak miktarı yüksektir ve bu rekombinasyon işlemini ciddi bir biçimde artırır (Mette, 2007). Rekombinasyon merkezlerinin sayısını azaltmak için materyal büyütme tekniklerinin geliştirilmesi gerekir. Amorf yapıda ileride bahsedilecek olan düzensiz yapısı ve sarkan bağlar sebebiyle SHR rekombinasyonu baskın rekombinasyon türüdür.

2.2.4.4 Yüzey rekombinasyonu

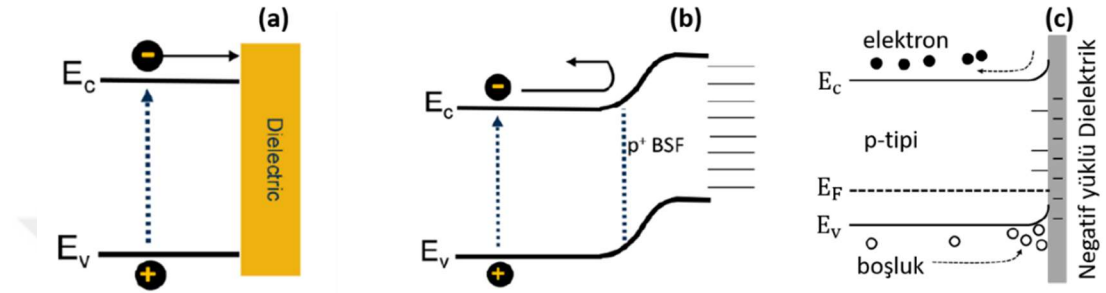
Si yüzeyinde atomik örgünün aniden kesilmesi ile yüzey atomlarının bağlanacak komşuları olmadığından sarkan bağlar (dangling bond) oluşur. Bu sarkan bağlar yüzey veya ara yüzey seviyesi olarak adlandırılan yasak bant aralığı içinde Şekil 2.11 (d)'de gösterildiği gibi enerji seviyeleri ortaya çıkarır. Bu yerler, iletim ve değerlik bantları arasında yük taşıyıcıların geçişleri için bir basamak gibi davranarak yüzeydeki elektron-boşluk rekombinasyonunu büyük ölçüde artırır (Black, 2016). Yüzey rekombinasyonunun azaltılması işlemi yüzey pasivasyonu olarak adlandırılır. Yüzey pasivasyonu için iki temel yaklaşım vardır. İlki ara yüzey enerji seviyelerinin yoğunluğunun azaltılmasını amaçlayan kimyasal pasivasyon diğeri ise yüzeydeki bir taşıyıcının yoğunluğunun azaltılmasını amaçlayan alan etkili pasivasyondur (Black, 2016).



Şekil 2.11. Rekombinasyon türlerinin şematik gösterimi; radyatif (a), Auger (b), SRH (c) ve yüzey (d)

Kimyasal pasivasyon işlemi ile ara yüzey seviyelerinin yoğunluğunun azaltılması amaçlanır ve genel olarak yarı iletken yüzey üzerinde geniş bant aralıklı bir malzeme ile ince bir tabaka oluşturulmasıyla gerçekleştirilir. Böylece daha önce sarkık olan bağların çoğu kimyasal olarak bu katmandaki atomlara bağlanır. Söz konusu malzeme bir dielektrik malzeme (SiO_2 , SiN_x , Al_2O_3) veya farklı yapısal formdaki aynı yarı iletken (c-Si yüzeyine a-Si) olabilir (Black, 2016). İlave sarkan bağların pasivasyonu genellikle hidrojen atomları ile yapılır. Bu yolla ara yüz enerji seviyeleri yoğunluğu tamamen ortadan kaldırılmasa da son derece düşük seviyelere indirilebilir (Black, 2016). Alan etkili pasivasyon işlemi ise elektronun veya boşluğun yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlayan yerleşik bir elektrik alan kullanılması ile yüzeydeki bir taşıyıcı tipinin yoğunluğunun azaltılması işlemine dayanır. Bu elektrik alan yüzeyde ağır katkılı bir katmanın veya yüklü bir dielektrik malzemenin kullanılması ile elde edilebilir. Örneğin

p-tipi hücreler için, alan etkili pasivasyon tipik olarak Şekil 2.12 (b)'de gösterildiği gibi, arka yüzey alanı (Back Surface Field) olarak adlandırılan arka yüzeye p+ katkılanması ile elde edilir (Lai, 2014). Aynı zamanda Şekil 2.12 (c)'de gösterildiği gibi negatif yüklü bir dielektrik malzeme kaplanması da aynı görevi görecektir (Ryu, 2015). n-tipi hücreler için alan etkili pasivasyon ise pozitif yüklü bir dielektrik malzeme kullanılması ile gerçekleştirilir.



Şekil 2.12. Kimyasal pasivasyon (a) (Lai, 2014) ve alan etkili pasivasyonun iki türü olan BSF (b) (Lai, 2014) ve yüklü dielektrik malzeme kullanımı (c) (Ryu, 2015)

Yukarıda anlatılan dört rekombinasyon mekanizması, bir yarı iletken malzemede aynı anda meydana gelebilir. Her bir rekombinasyon türünün toplam etkisi etkin rekombinasyon oranı (U_{etkin}) ile ifade edilir ve dört rekombinasyon mekanizmasının toplamı ile elde edilir;

$$U_{etkin} = U_{rad} + U_{Auger} + U_{SRH} + U_{yüz} \quad (2.4)$$

Aynı şekilde etkin ömür süresi (effective lifetime) Denklem 2.5 ile gösterildiği gibidir.

$$\frac{1}{\tau_{etkin}} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{yüz}} \quad (2.5)$$

2.2.6 Teknik kayıplara genel bir bakış

Bu bölümde teknik kayıplar beş ana başlık altında incelenmiş olup Çizelge 2.2 teknik kayıpları oluşturan başlıkların doğrudan etkilediği güneş hücresi parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 2.2. Kayıplar ve doğrudan etkiledikleri güneş hücresi parametreleri

Kayıplar	Etkilediği Parametreler
Tutulamayan fotonlar nedeniyle kayıp	I_{sc}
Yansıma kayıpları	I_{sc}
Gölgeleme kayıpları	I_{sc}
Rekombinasyon kayıpları	I_{sc}, V_{oc}
Direnç kayıpları	FF

Bu bölümde söz edilen kayıplardan gölgeleme kayıpları ve direnç kayıpları güneş hücresi metalizasyonunu ilgilendiren kısımlardır. Optimum metalizasyon dizaynı için bu iki kaybın dengelenmesi gerekir. 4. bölümde metalizasyon konusuna daha detaylı değinilecek olup her iki kaybın dengelendiği bir metalizasyon dizaynı için optimizasyon işlemi yapılacaktır.

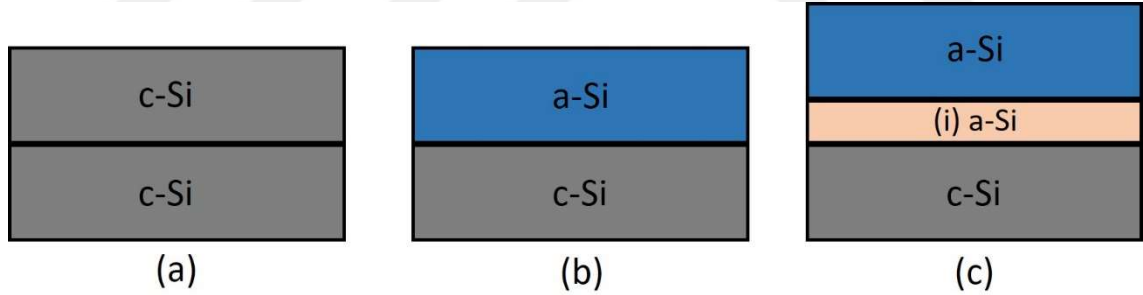
Bu bölümde bahsi geçen kayıplar ile tez kapsamında kullanılan HIT güneş hücresi arasındaki ilişkiye ileriki bölümlerde daha detaylı değinilecektir. Özet olarak; yüzey desenlendirme, arka kontağın tamamen gümüş kaplanması ve ITO yapısı ile yansıma ve tutulamayan fotonların kayıplarının azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca optimizasyonu yapılmış metalizasyon tasarımı ile gölgeleme ve direnç kayıplarının dengelenmesi sonucu fazladan kayıpların önüne geçilmeye çalışılmıştır. Son olarak CZ tip tek kristal silisyum dilimi üzerine katkısız a-Si:H yapı ile yüzey pasivasyonu hedeflenmiş olup rekombinasyon kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır.

BÖLÜM III

HIT GÜNEŞ HÜCRESİ

3.1 Homoecklem – Heteroecklem Yapı

Amorf silisyum / kristal silisyum (a-Si/c-Si) heteroecklem güneş hücreleri, diğer yarı iletken güneş hücrelerinde olduğu gibi, p-tipi ve n-tipi katkılanmış malzemenin kullanıldığı bir diyot yapısına sahiptir. Standart (homoecklem) güneş hücresinde kullanılan alttaş malzeme ve üzerine uygulanan malzeme aynı (c-Si üzerine c-Si) sadece katkılama türü n-tipi ve p-tipi olarak farklıdır. Heteroecklem güneş hücresinde ise kristal silisyum (c-Si) ve amorf silisyum (a-Si) olmak üzere iki farklı malzemenin kullanılması söz konusudur. Heteroecklem güneş hücresi yapısına ek olarak katkısız amorf silisyumun ((i) a-Si) kullanılması ile özel bir yapı olan HIT yapısı elde edilir. Şekil 3.1’de anlatılan bu durum gösterilmiştir. Şekil 3.1 (a) homoecklem yapısı, (b) heteroecklem yapısı ve (c) HIT yapısını göstermektedir.



Şekil 3.1. Homoecklem yapı (a) heteroecklem yapı (b) ve katkılanmamış (i) ince tabakalı heteroecklem (HIT) yapısı (c)

Heteroecklem yapıda c-Si alttaş görevi görürken a-Si tabaka yayıcı (emitter) görevi görür. c-Si malzemenin n-tipi katkılanması durumunda a-Si tabaka p-tipi, c-Si malzemenin p-tipi katkılanması durumunda a-Si tabaka n-tipi olacak şekilde zıt katkılanması ile standart diyot yapısı sağlanmış olur.

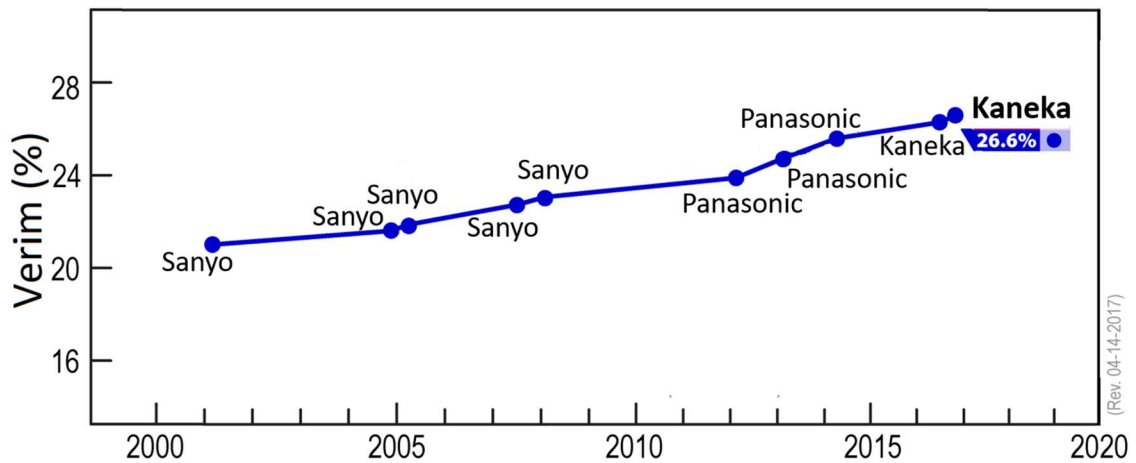
Şekilde çok basit bir biçimde verilmiş olan yapı bu haliyle verimli bir şekilde çalışmayacağı açıktır. Verimli bir güneş hücresinin son haline göre oldukça sade olarak

gösterilen bu yapı ilerleyen bölümlerde diğer katmanlarının da eklenmesiyle bir güneş hücresine dönüşmesindeki aşamalar incelenecektir.

3.2 HIT Güneş Hücresi için Tarihçe ve Verimsel Gelişim

a-Si:H/c-Si heteroeklem yapı üzerine yapılan ilk çalışmalar 1974 yılına dayanmaktadır (Fuhs vd., 1974). Birkaç yıl sonra c-Si yüzeylerinde, katkısız a-Si:H tabakanın oldukça iyi pasivasyon sağladığı görülmüştür (Pankove ve Tarng, 1979). 1983 yılında silisyum heteroeklem yapısının kullanıldığı ilk güneş hücresi olma özelliğini taşıyan “Honeymoon” olarak adlandırılan hücre, a-Si:H/poly-Si formunda %12,37 verimlilikte üretilmiştir (Hamakawa vd., 1983; Okuda vd., 1983). 1990’ların başında Sanyo (Aralık 2009 itibariyle Panasonic) HIT üzerine çalışmalara başlamıştır (Taguchi, 1990).

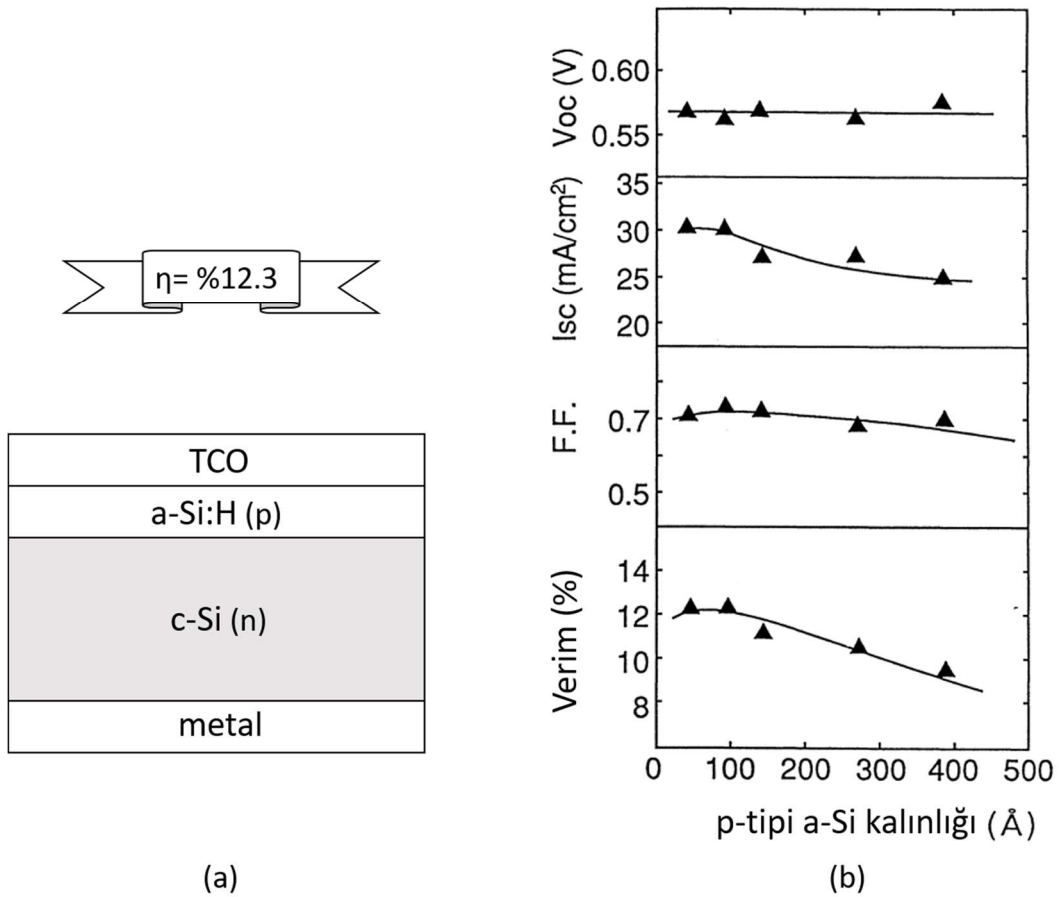
HIT teknolojisinin güneş hücresi teknolojileri içerisinde bugün hala dikkat çeken bir yerinin olmasında ve ticarileşmesinde en önemli pay sahibi Sanyo’dur. Sanyo, bu araştırma alanının öncüsüdür. Şekil 3.2’de görüleceği üzere HIT güneş hücresinde verim rekoruna şuan (2018 yılı) Kaneka sahip olsa da, Sanyo uzun bir süre HIT alanında verim rekorlarını elinde tutmuştur. Sanyo’nun HIT üzerine yapmış olduğu çalışmalar ve bugünkü verim değerlerine ulaşılmasında etkili olan temel gelişmeler, devam eden paragraflarda anlatıldığı gibi sırasıyla şu şekildedir:



Şekil 3.2. HIT güneş hücresinde yıllara göre verim rekorları (NREL, 2017)

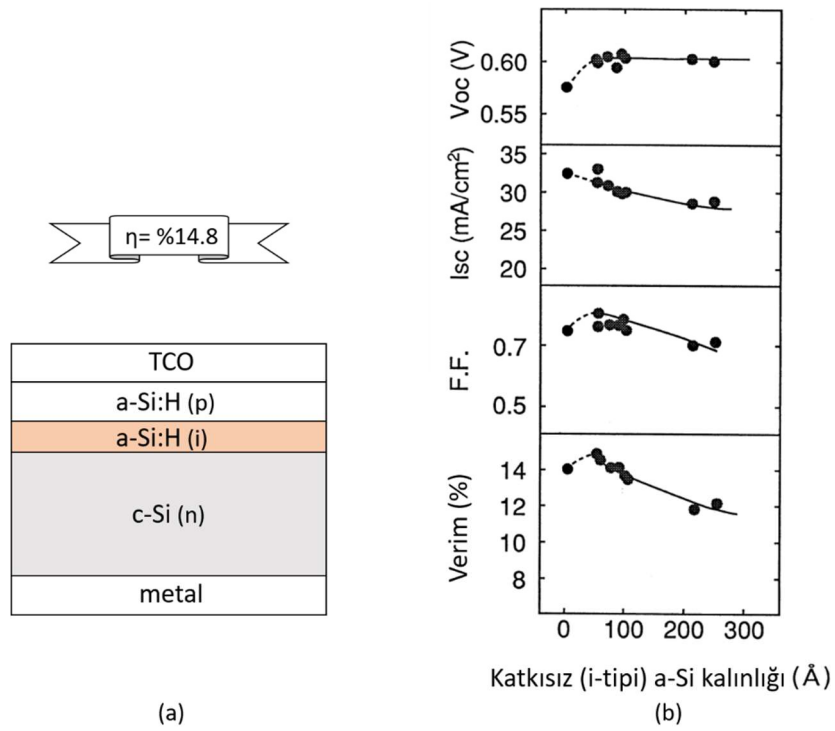
Şekil 3.3 (a) Sanyo tarafından bildirilen ilk silisyum heteroeklem güneş hücresinin şematik yapısını göstermektedir. Bu heteroeklem güneş pilini oluşturmak için n-tipi c-Si

alttaş üzerine doğrudan bir p-tipi a-Si:H tabakası kaplanmıştır. Şekil 3.3 (b) p-tipi a-Si:H tabakasının kalınlığının heteroeklem güneş hücresinin önemli parametreleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Hücrenin a-Si:H/c-Si arayüzünde yüksek kusur-durum yoğunluğu sebebiyle nispeten düşük bir V_{oc} ve FF değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca p-tipi a-Si:H tabakasının kalınlığının artması bu tabakadaki optik soğurmayı artırdığından J_{sc} 'nin düşmesine neden olduğu görülmektedir. Buna ek olarak kaplama kalınlığı düştükçe kısa dalga boylu fotonların toplanma oranının arttığı görülmüştür. Sonuçta p-tipi a-Si:H tabakanın kalınlığının iyi bir p/n eklem yapısı oluşturmak koşuluyla mümkün olduğunca ince olması gerektiği anlaşılmıştır. Bu yapı için V_{oc} 'nin p-tipi a-Si:H tabakasının kalınlığına bağlı olarak değişmediği de görülür. Bu güneş hücresiyle 10 nm altındaki p-tipi a-Si:H film kalınlığı için %12,3'lük bir verim değeri elde edilmiştir (Wakisaka vd., 1991; Tanaka vd., 1992).



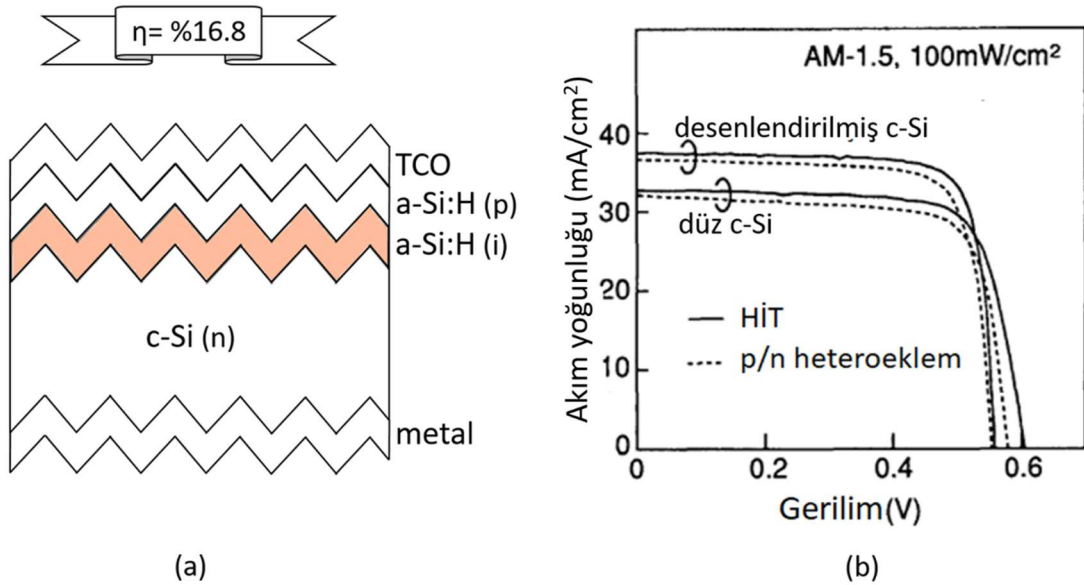
Şekil 3.3. Sanyonun bildirdiği ilk a-Si:H / c-Si heteroeklem güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve p-tipi a-Si:H kalınlığının bir fonksiyonu olarak güneş hücresi parametreleri (b) (Wakisaka vd., 1991; Tanaka vd., 1992)

Şekil 3.4 (a), Sanyo'nun n-tipi c-Si alttaş ile p-tipi a-Si:H tabaka arasına ince bir katkısız (i) a-Si:H tabakanın eklenmesi ile elde edilmiş güneş hücresi yapısını göstermektedir. Sanyo, bu yapıyı HIT (heterojunction with intrinsic thin-layer / katkılanmamış (i) ince tabakalı heteroeklem) güneş hücresi olarak adlandırmıştır. Katkısız bir a-Si:H tabaka dahil edilmesiyle c-Si yüzeyindeki sarkan bağların pasivasyonu sağlanmış böylece a-Si:H / c-Si ara yüzey kusur-durum yoğunluğu ve dolayısıyla taşıyıcı rekombinasyonları önemli ölçüde azaltılmıştır. Katkısız tabakanın dâhil edilmesi, Şekil 3.4 (b)'de görüldüğü gibi V_{oc} ve FF değerlerinin iyileştirilmesini sağlamıştır. Ayrıca Şekil 3.4 (b), katkısız a-Si:H kalınlığının artması ile bu tabakadaki soğurma kayıplarının artması sonucunda J_{sc} değerinin düştüğünü göstermektedir. Diğer bir açıdan toplam a-Si tabaka kalınlıkları (p/n heteroeklemde (p)a-Si:H tabaka kalınlığı, HIT'de (p)a-Si:H + (i)a-Si:H tabakaların toplam kalınlığı) aynıyken HIT güneş hücresinin J_{sc} değeri p/n heteroekleme göre daha yüksek bir değere sahiptir. Bu durumun sebebi de kısa dalga boyu bölgesinde HIT yapısının toplama veriminin daha yüksek olmasıdır. Şekil 3.4 (b), katkısız i-tipi a-Si:H katman için optimum bir kalınlığın olduğunu göstermektedir. 4 nm kalınlığında katkısız a-Si:H katmanına sahip bu HIT güneş hücresi ile %14,8'lik verim değeri elde edilmiştir (Wakisaka vd., 1991; Tanaka vd., 1992).



Şekil 3.4. HIT güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve katkısız (i-tipi) a-Si:H tabakasının kalınlığının bir fonksiyonu olarak güneş hücresi parametreleri (b) (Wakisaka vd., 1991; Tanaka vd., 1992)

HIT güneş hücresi verimliliğini artırmak yolunda bir sonraki adım Şekil 3.5 (a)'da verildiği gibi yüzey desenlendirme işleminin uygulanması olmuştur. Bu işlemin amacı ışık tutma (light-trapping) yapısını oluşturmaktır. Yüzey desenlendirme için kullanılan rasgele piramit yapı, yüzey yansımalarını azaltmaya yardımcı olur ve hücre içindeki ortalama optik yol uzunluğunu artırır ve bu sayede J_{sc} artar. Şekil 3.5 (b) yüzey desenlendirme uygulanmış hücrenin düz hücreye göre J_{sc} değerinin %20 oranında arttığını göstermektedir. Fakat bu yapıyla V_{oc} değerinin azaldığı görülür. Sebep olarak da yüzey desenlendirme işlemi toplam yüzey alanını artırdığından yüzey kusur-durum yoğunluğunun artmasına neden olabilir (Wakisaka vd., 1991).

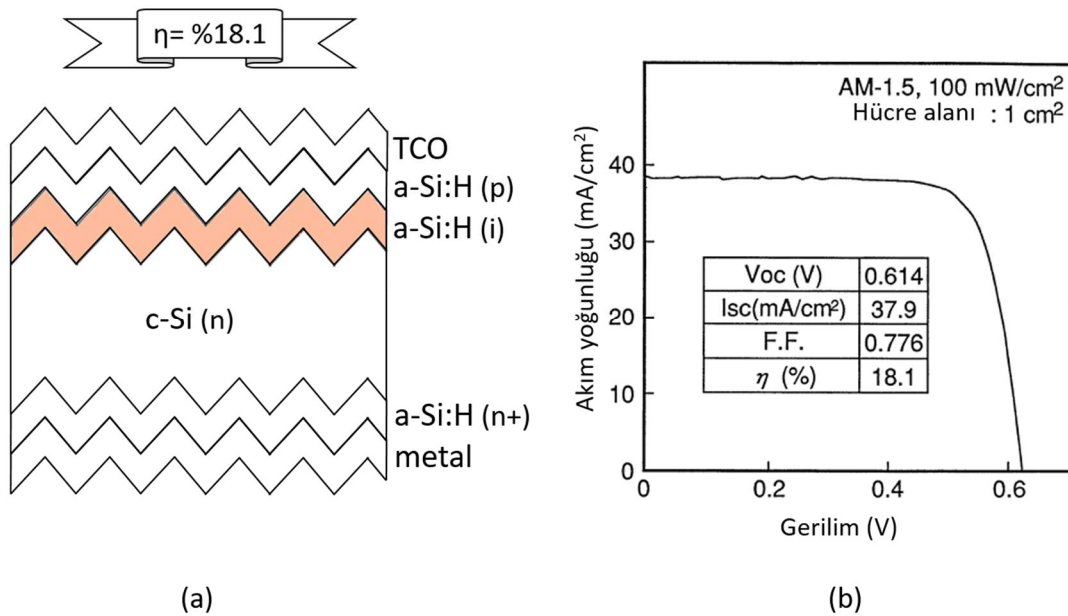


Şekil 3.5. Yüzey desenlendirme uygulanmış HIT güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve I-V eğrisi (b) (Wakisaka vd., 1991)

Bu yapının uygulanmasında desenli yüzeyler üzerine a-Si tabakanın uniform bir şekilde biriktirilmesi zorluğu ve a-Si tabaka kaplanmadan önce c-Si yüzeyinin yeterince temizlenememesi gibi birkaç zorlukla karşılaşmıştır. a-Si tabakanın uniform bir şekilde biriktirilmesi için kaplama hızının düşürülmesi ve silan gazının seyreltilmesi ile kaplama koşulları optimize edilmiştir. Alttaşın etkili bir şekilde temizlenmesi, film büyütmeden önce alttaş yüzeyini hidrojen plazmasına maruz bırakarak elde edilmiştir. Bu hücre ile %16,8'lik bir verim değerine ulaşılmıştır (Wakisaka vd., 1991).

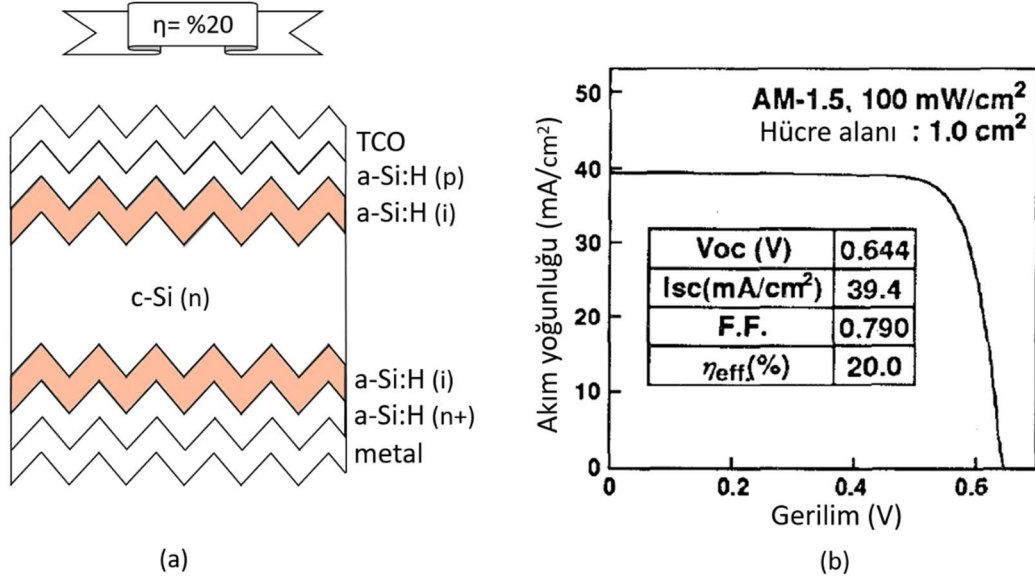
Bir sonraki adımda, HIT güneş hücresinin performansı, yüzey desenlendirme işlemine ek olarak güneş hücresinin arka yüzüne bir BSF'nin (yoğun katkılı (n+)a-Si:H tabaka) dahil

edilmesi ile daha da geliştirilmiştir. Bir önceki yapıda yüzey desenlendirme işlemi ile V_{oc} değerindeki düşüş bu yapı ile telafi edilmiştir. Şekil 3.6 (b)'deki V_{oc} değeri ve Şekil 3.4 (b)'deki yüzey desenlendirme olmayan güneş hücresinin V_{oc} değeri karşılaştırıldığında, yüzey desenlendirme işlemi ile V_{oc} 'un güçlü bir şekilde etkilenmediği görülür. Bunun nedeni, yüzey desenlendirme işlemi ile artan yüzey kusur-durum yoğunluğunun, alttaşın arka tarafındaki taşıyıcı rekombinasyonunu azaltan BSF tarafından telafi edilmesidir. Yüzey desenlendirme ve BSF'nin dâhil edilmesi %18,1 gibi yüksek bir HIT güneş hücresi verimliliği sağlamıştır (Wakisaka vd., 1991; Tanaka vd., 1992). Bu güneş hücresinin yapısı Şekil 3.6 (a)'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.6. Yüzey desenlendirme ve BSF uygulanmış HIT güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve I-V eğrisi (b) (Wakisaka vd., 1991; Tanaka vd., 1992)

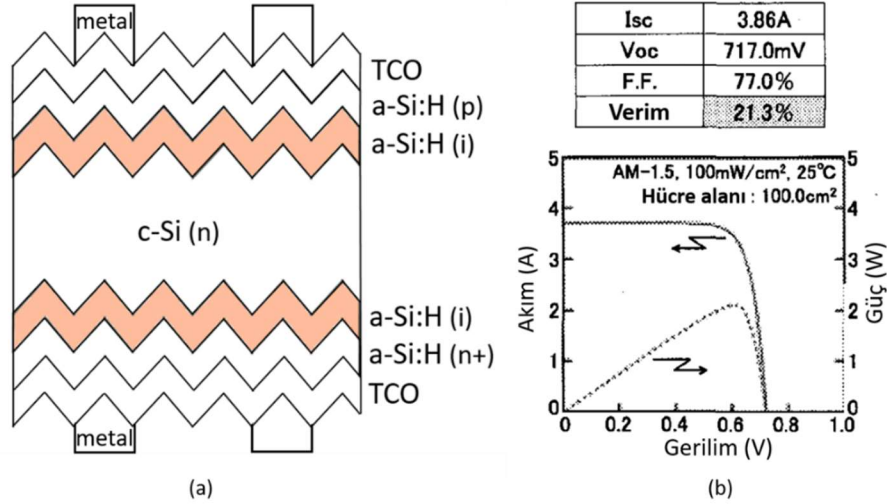
HIT yapısının c-Si yüzeyinde oldukça iyi pasivasyon sağlamanın sonucu olarak alttaşın her iki yüzeyine katkısız (i) a-Si kaplanması ile verim daha da geliştirilmiştir. Her iki yüzeye de pasivasyon sağlayacak olan (i) a-Si yapısının kaplanmasının yanında son derece yansıtıcı bir arka elektrotun kullanılması ve diğer koşulların optimize edilmesiyle %20 verimlilik değerine ulaşılmıştır (Sawada vd., 1994). Bu güneş hücresinin yapısı Şekil 3.7 (a)'da ve hücrenin I-V eğrisi Şekil 3.7 (b)'de verildiği gibidir.



Şekil 3.7. Her iki yüzeye katkısız a-Si:H uygulanmış HIT güneş hücresinin şematik yapısı (a) ve I-V eğrisi (b) (Sawada vd., 1994)

Yukarıda bahsi geçen beş adımdaki temel gelişmelerde kullanılan hücrenin alanı 1 cm²'dir. Bilindiği gibi küçük test ölçeği sonuçları ile daha büyük hücrelerin performans değerleri aynı olmayacaktır. Sanyo bir sonraki adımda ticarileşmek adına 100 cm² ve üzerindeki boyutlarda hücre üretimine girişmiş, 1997'de de ilk ticari HIT hücresini tanıtıp seri üretime geçmiş ve HIT Power 21TM adında %15,2 verimliliğe sahip 180 W gücündeki panelin seri üretimini gerçekleştirmiştir (Taguchi vd., 2000).

2000'li yılların başında Sanyo büyük ölçekli (>100 cm²) hücrelerin detaylarını yayınladı. Şekil 3.8 (a)'da görüldüğü gibi çift taraflı pasivasyon uygulanmış hücreler oldukça simetrik bir yapıda tasarlanmıştır. Bu simetrik yapı üretim adımları boyunca termal ve mekanik baskılardan etkilenmemeyi sağlarken yapı ayrıca güneş hücresinin her iki tarafının (hem ön hem arka) güneş ışığına maruz kalması durumunda güç üretebilecek özelliktedir. İlk sonuçlara göre verimlilik değeri %20,1 (Taguchi vd., 2000) ardından %20,7 (Sakata vd., 2000) iken 2003 yılında Şekil 3.8 (b)'de I-V eğrisi verilmiş olan hücre ile %21,3 (Tanaka vd., 2003) verimlilik değeri elde edilmiştir.

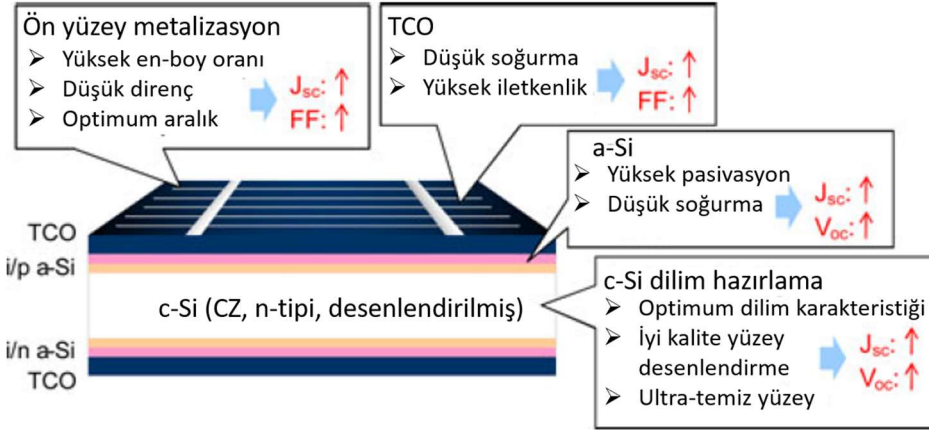


Şekil 3.8. Büyük ölçekli ($>100 \text{ cm}^2$) hücre üretimi: oldukça simetrik bir yapıda tasarlanan HIT hücresi (a) (Sakata vd., 2000; Taguchi vd., 2000; Tanaka vd., 2003) ve I-V eğrisi (b) (Tanaka vd., 2003)

Bu gelişmelerden sonra Sanyo, sürekli olarak HIT güneş hücresi optimizasyonu üzerine çalışmış ve verimliliği artırmak amacıyla aşağıda sıralanan yaklaşımlara odaklanmıştır (Inoue vd., 2009; Taguchi vd., 2009; Tsunomura vd., 2009; Fujishima vd., 2010; Tohoda vd., 2012; Taguchi vd., 2014);

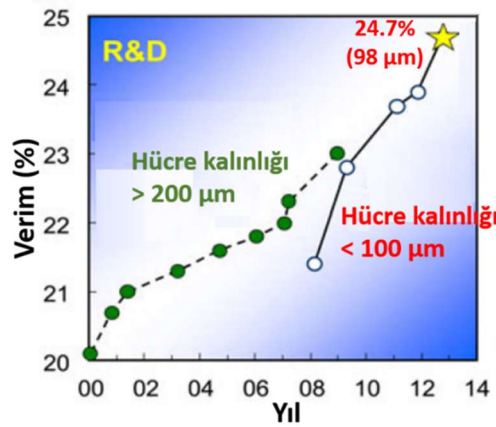
- 1) Hetero-eklem yapısının geliştirilmesi: c-Si alttaşların mümkün olduğunca düşük maliyetli ve etkili temizlenmesinin yanında yüksek kaliteli a-Si:H film elde etmek için düşük termal hasarlı plazma biriktirme işlemi kullanarak daha iyi bir hetero-arayüz oluşturulması
- 2) Metalizasyonun geliştirilmesi: Serigrafi işlemi sırasında düşük sıcaklıkta gümüş pastanın viskozitesini optimize ederek optik kayıp ve elektrik kaybını azaltmanın yanı sıra daha büyük en boy oranı ve daha düşük dirençli metalizasyon tasarımının oluşturulması
- 3) TCO katmanının özelliklerinin geliştirilmesi: Yüksek taşıyıcı hareketliliğine sahip (yüksek iletkenlik) ve düşük soğurma özellikleriyle yüksek kaliteli TCO ile optik kaybın azaltılması
- 4) Si alttaş kalınlığının azaltılması: Daha ince alttaşlar kullanarak malzeme maliyetinin düşürülmesi

Şekil 3.9 bu açılardan bakıldığında yüksek verimli bir HIT hücresinin tasarımında etkili olan başlıkların etkilediği parametreleri göstermektedir.



Şekil 3.9. Yüksek verimli bir güneş hücresi için optimize edilmesi gereken başlıklar ve etkileyeceği güneş hücresi parametreleri (Taguchi vd., 2014)

Bu konular üzerine çalışmaların sonucunda, Ocak 2014'te, Panasonic (eski adıyla Sanyo) firması 98 mikron kalınlığında ve 101,8 cm² boyutundaki bir hücre için %24,7'lik (V_{oc} = 750 mV, J_{sc} = 39,5 mA / cm², FF = %83,2) dönüşüm verimliliği elde etmiştir (Taguchi vd., 2014). Bu verim değeri Sanyo'nun bu yapıdaki (ön yüzey metalizasyona sahip) hücrelerde ulaşmış olduğu en yüksek verim değeri olup Şekil 3.10 Sanyo'nun 200 µm üzeri ve 100 µm altında ki hücreleri için yıllara göre verimsel gelişimini göstermektedir (Taguchi vd., 2014).



Şekil 3.10. Sanyo'nun 200 µm üzeri ve 100 µm altı hücreler için verim gelişimi (Taguchi vd., 2014)

Son olarak bu alanda rekor verim değeri %25,1 ($V_{oc} = 738$ mV, $J_{sc} = 40,8$ mA/ cm², FF = %83,5) ile 2015 yılında Kaneka tarafından 160 µm kalınlığında, 6 inçlik n-tipi CZ Si alttaşın kullanıldığı HIT güneş hücresi ile elde edilmiştir (Adachi vd., 2015).

HIT güneş hücresinin pratikte kanıtlanmış olan yüksek verimlilik potansiyeli ve 2010 yılında Sanyo şirketinin HIT üzerindeki ana patentinin sona ermesiyle birçok çalışma grubunun bu yapı üzerindeki araştırma ve geliştirme çalışmaları giderek artmaktadır (van Sark vd., 2012; Liu vd., 2018). HIT çalışan Sanyo dışında kalan bazı farklı grupların ulaştıkları verim değerleri ve hücre parametreleri n-tipi alttaş kullananlar için Çizelge 3.1 ve p-tipi alttaş kullananlar için Çizelge 3.2’de verildiği gibidir.

Şimdiye kadar, HIT güneş hücrelerinde sanayileşme elde eden işletmelerin başında Panasonic, Kaneka, CIC ve Sunprime vs. gelmektedir (Liu vd., 2018). Panel verimi olarak standart HIT (ön yüzey metalizasyona sahip) güneş panellerinde en yüksek verim değerleri Panasonic %22,5, Kaneka %22,2 (Ohshita vd., 2017) iken HBC (Hetero-eklem arka kontak) tip HIT güneş panellerinde ise Kaneka %24,37 (KanekaModule, 2017), Panasonic %23,8’dir (PanasonicModule, 2017).

c-Si HIT güneş hücresi alanında en yüksek verimlilik değeri HBC güneş hücresi teknolojisi ile elde edilmiştir. HBC güneş hücresi teknolojisi, IBC güneş hücresi teknolojisinin HIT güneş hücresi teknolojisine uygulanmasıdır. IBC güneş hücrelerinde ön yüzeyde metalizasyonun olmamasından dolayı gölgeleme kaybı yoktur ve optik kayıpların azaltılması ile yüksek kısa devre akım yoğunluğu elde edilir (Lammert ve Schwartz, 1977; Nakamura vd., 2014; Franklin vd., 2016; Smith vd., 2016; Yoshikawa vd., 2017a). HIT güneş hücresi teknolojisi kullanılan a-Si:H tabakasının yüksek kaliteli pasivasyon sağlamasıyla yüzeydeki taşıyıcı rekombinasyon kayıplarının azaltılması sonucu yüksek açık devre voltajına sahip bir teknolojidir (De Wolf vd., 2012; Masuko vd., 2014; Nakamura vd., 2014; Taguchi vd., 2014; Adachi vd., 2015; Yoshikawa vd., 2017a). HBC teknolojisi, her iki teknolojinin avantajlarının birleştirilmesi (IBC+HIT) ile yüksek verimli hücrelerin üretilmesini amaçlar. HBC güneş hücreleri üretim adımları genellikle desenlendirilmiş c-Si alttaş üzerine düşük yüzey rekombinasyonu ve yüksek geçirgenlik özelliklerine sahip pasivasyon katmanı kaplanması ile başlar. Ardından dielektrik yansıma önleyici kaplama biriktirilir. Arka yüzeye (i)a-Si:H/(p)a-Si:H ve (i)a-Si:H/(n)a-Si:H yapılar Şekil 3.11 (a)’da görüldüğü gibi interdiijite bir dağılımla kaplanır.

Son olarak da metalizasyon işlemi arka yüzeye optimum elektriksel performansın sağlanması için yeterince geniş olacak şekilde gerçekleştirilir. HBC güneş hücresi veriminin geliştirilmesine katkıda bulunan birçok araştırmacı ve grup vardır (Masuko vd., 2014; Nakamura vd., 2014; Tomasi vd., 2014; Paviet-Salomon vd., 2015; Harrison vd., 2016; Stang vd., 2017; Yoshikawa vd., 2017b).

Şekil 3.11’de verilen $179,74 \text{ cm}^2$ alana sahip HBC hücre, 740,3 mV açık devre gerilimi, 42,5 mA/ cm^2 kısa devre akımı, %84,65 dolum faktörü ve %26,63 verim değeri ile şuan da (2018 yılı) HIT alanında üretilmiş en yüksek verimli hücredir. Şekil 3.11 (a) hücrenin yapısının kesit görüntüsünü, (b)’de I-V eğrisini göstermektedir.

Çizelge 3.1. n-tipi alttaş kullanılan HIT uygulamaları

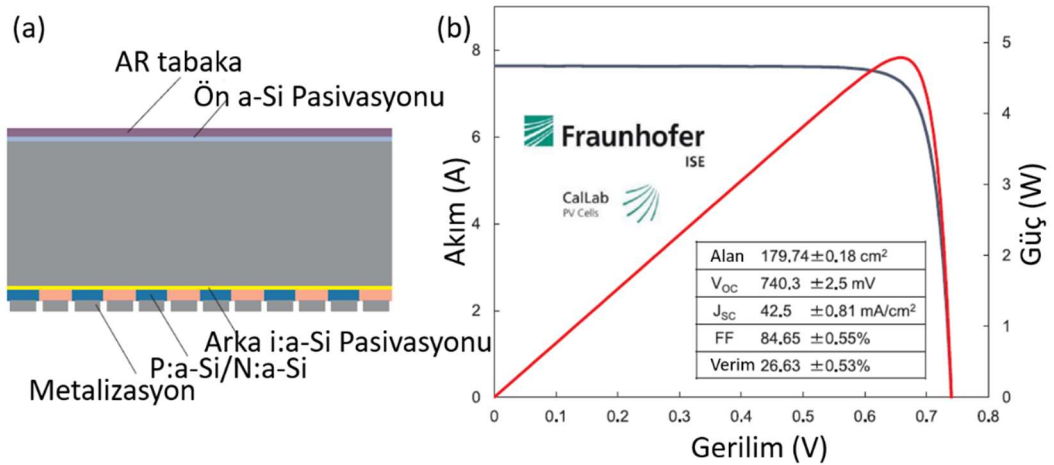
Grup, Ülke	Verim (%)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/ cm^2)	FF (%)	Alan (cm^2)	Yıl
Kaneka, Japonya (Adachi vd., 2015)	25,1	738	40,8	83,5	151,9	2015
Panasonic, Japonya (Taguchi vd., 2014)	24,7	750	39,5	83,2	101,8	2014
RRR, İsviçre (Strahm vd., 2014)	23,14	736,7	38,64	81,3	239	2014
SIMIT, Çin (Meng vd., 2017)	23,1	741	38,3	81,3	156,25	2017
CSEM, İsviçre (Ballif vd., 2015)	22,8	736	38,8	79,8	239	2015
EPFL ve CSEM, İsviçre (Geissbühler vd., 2014)	22,4	728	39,15	78,6	4	2014
CEA-INES, Fransa (Muñoz vd., 2012)	22,2	733	38,7	78,5	103	2012
NÖHÜNAM, Türkiye (Seyhan vd., 2017)	20	715,7	36,3	77	243,36	2017
Kaneka, Japonya (HBC) (Yoshikawa vd., 2017b)	26,63	740	42,5	84,6	179,7	2017

Çizelge 3.1. (Devam) n-tipi alttaş kullanılan HIT uygulamaları

Panasonic, Japonya (HBC) (Masuko vd., 2014)	25,6	740	41,8	82,7	143,7	2014
Sharp, Japonya (HBC) (Nakamura vd., 2014)	25,1	736	41,7	81,9	3,72	2014
CSEM-EPFL, İsviçre (HBC) (Paviet-Salomon vd., 2015)	22	726	40,9	74	9	2015
HZB-EPFL (HBC) (Stang vd., 2017)	22	699	41,9	75,1		2017
EPFL, İsviçre (HBC) (Tomasi vd., 2014)	21,5	724	39,9	74,5	9	2014
CEA-INES, Fransa (HBC) (Harrison vd., 2016)	20,55	711	40,11	72,1	18,11	2016

Çizelge 3.2. p-tipi alttaş kullanılan HIT uygulamaları (Willeke ve Weber, 2013)

Grup, Ülke	Verim (%)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/ cm ²)	FF (%)	Alan (cm ²)	Yıl
EPFL, İsviçre	21,4	722	38,4	77,1	4	2012
NREL, ABD	19,3	678	36,2	78,6	0,9	2010
Titech, Japonya	19,1	680	36,6	76,9	0,8	2011
Jülich, Almanya	18,5	664	35,7	78	0,76	2013



Şekil 3.11. HIT güneş hücresi alanında rekora sahip hücrenin yapısı (a) ve I-V eğrisi (b) (Yoshikawa vd., 2017b)

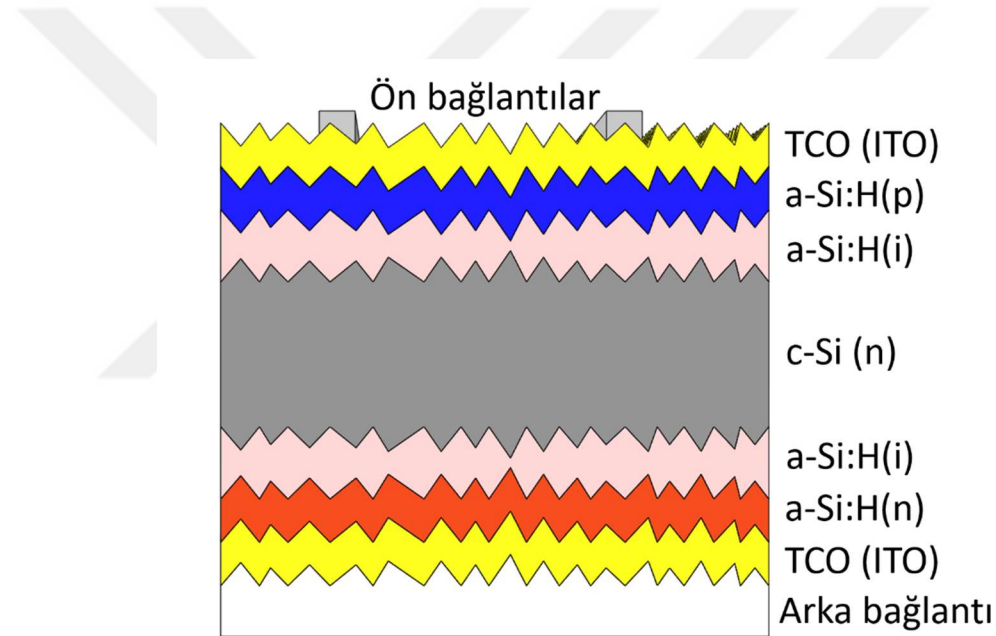
3.3 HIT Üretim Adımları

Si heteroeklem güneş hücresinin tasarımı, elektron ve boşlukların üretiminin gerçekleştiği ince bir ($<200 \mu\text{m}$) kristal silisyum alttaşın her iki tarafına, ince katkılı-katkısız amorf silisyum tabakanın düşük sıcaklıkta büyütülmesine dayanır. HIT güneş hücrelerinin her yıl giderek artan ilgiyi çekmesinde şu avantajlar sıralanabilir (Taguchi vd., 2000; Liu vd., 2018);

- Yapısal simetri: Geleneksel c-Si güneş hücreleri ile karşılaştırıldığında, HIT güneş hücreleri sahip olduğu simetrik yapı sayesinde mekanik gerilimin azaltılması ve bu sayede daha ince hücrelerin üretilebilmesine olanak sağlayarak üretim maliyetini büyük ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda bu simetrik yapı ikiyüzlü panellerin üretimine olanak sağlar ve ışığı çift taraflı olarak soğurabilen panellerin üretilmesi sayesinde üretim kapasitesini artırır.
- Düşük sıcaklık prosesi: Düşük sıcaklıklarda üretim ($<200-250 \text{ }^{\circ}\text{C}$) sadece enerji tasarrufu sağlamakla kalmaz aynı zamanda yüksek sıcaklık işlemi sebebiyle olan alttaş kalitesinin bozulmasının önüne geçer.
- Yüksek açık devre gerilimi: Hem a-Si ve c-Si arasındaki geniş bant bükümü (band bending) hem de katkısız a-Si'nin c-Si yüzeylerinde mükemmel yüzey pasivasyonu sağlaması, yüksek bir açık devre voltajı ve yüksek bir verimlilik ile sonuçlanır.
- İyi stabilite: N-tipi kristal silisyum, ışık kaynaklı bozulma olmadan alttaş olarak kullanılır. Ek olarak, HIT güneş hücreleri ile geleneksel hücrelere göre çok daha iyi bir sıcaklık katsayısı elde edilebilir.

Hücre üretimine başlanmadan önce alttaş yüzeyi bir dizi kimyasal temizlik işleminden geçer; alttaşın üretilmesi esnasında oluşan testere zararlarının giderilmesi için kimyasal bir solüsyon, piramit yüzey deseni oluşturmak için kimyasal bir alkalın solüsyonu ve kaplama öncesi yüzey temizliği için RCA ve HF uygulanması gibi kimyasal işlemler sıralanabilir. Temizlik işleminin ardından kaplamaya hazır hale gelen c-Si alttaş yüzeyi rekombinasyona dolayısıyla akım kaybına neden olan yüzey enerji durumlarına sahiptir ve bu durum yüzeye katkısız (i)a-Si:H tabaka kaplanması ile en aza indirilir. PECVD yöntemi ile katkısız tabakaların alttaşın her iki yüzeyine kaplanmasından sonra üzerine

alttaşın katkısına zıt bir şekilde yayıcı görevi görecektir katkı (p)a-Si:H (n-tipi alttaş için) kaplanır. Alt yüzeye de BSF görevi görecektir olan ve arka bağlantıda rekombinasyon merkezlerine ulaşmaya çalışan azınlık taşıyıcıları iten (n)a-Si:H tabaka kaplanır. a-Si:H tabakaların iletkenliğinin düşük olması sebebiyle üzerine hem ARC görevi hem de iyi bir iletken olan TCO tabaka her iki yüzeye kaplanır. Yüzey desenlendirme ve TCO ile birlikte yansıma neredeyse tamamen bastırılmış olur. Hücresinin tamamlanması için elektrik bağlantılarına ihtiyaç olduğundan üst yüzeydeki TCO üzerine serigrafik baskı (screen-printing) yöntemi ile ince akım toplayıcıları ve kalın akım toplayıcılarından oluşan ön yüzey metalizasyon işlemi yapılır. Son olarak arka yüzeye PVD ile arka bağlantı gerçekleştirildikten sonra hücre üretimi tamamlanmış olur. Şekil 3.12 standart bir HIT güneş hücresinin yapısını göstermektedir.



Şekil 3.12. HIT güneş hücresinin detaylı yapısı

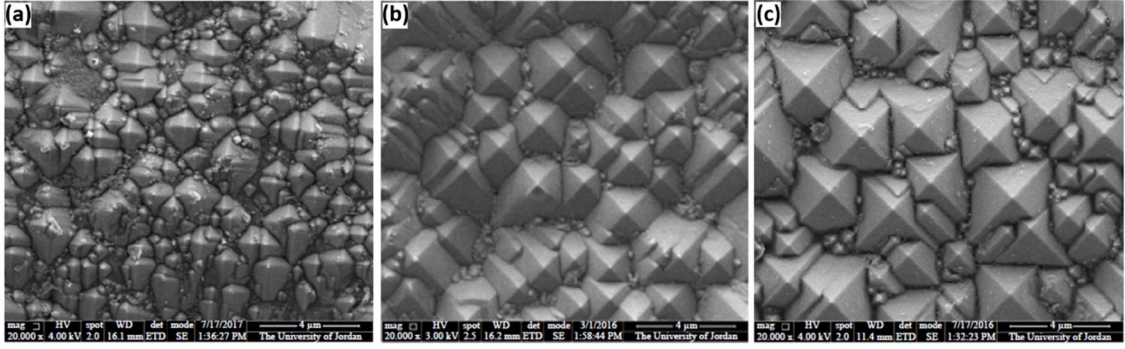
Özetle standart bir HIT güneş hücresinin üretim adımları aşağıda sıralandığı gibidir;

- Yüzey desenlendirme işlemi
- Alttaş yüzey temizliği
- (i)a-Si:H, (p)a-Si:H ve (n)a-Si:H yapının PECVD yöntemi ile kaplanması
- TCO (ITO) tabakasının PVD yöntemi ile kaplanması
- Arka metalizasyonun (arka bağlantı) PVD yöntemi ile kaplanması ve Ön yüzey metalizasyonun (ön bağlantı) serigrafik baskı yöntemi ile oluşturulması
- Fırınlama

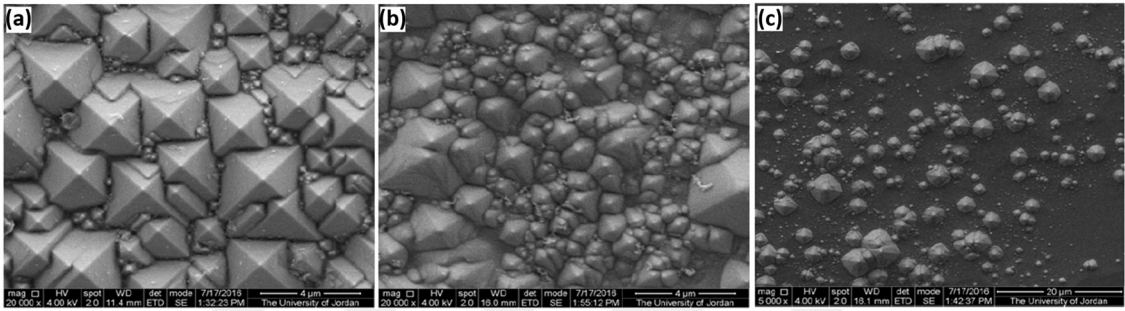
3.3.1 Yüzey desenlendirme işlemi

Silisyum hetero-eklem güneş hücrelerinde kullanılan alttaşlar, malzeme maliyetlerini azaltmak için olabildiğince ince olmalıdır. Bununla birlikte, ince alttaşlarda ışığın emilimi büyük ölçüde azalır. Işık tutucu tekniklerin uygulanması, Si hetero-eklem güneş hücrelerinde önemli bir konu haline gelmiştir (van Sark vd., 2012). İkinci bölümde değinildiği gibi ışık yakalama yapısının rolü, soğurucu (absorber) tabakanın fiziksel kalınlığını olabildiğince ince tutarken optik kalınlığını maksimuma çıkarmaktır. Alttaş yüzeyinin desenlendirilmesi, c-Si tabanlı güneş hücrelerinde kullanılan yaygın bir ışık yakalama yöntemidir. Tek kristalli silisyum alttaşlar için, rastgele piramit yapı yaygın olarak kullanılır. c-Si alttaşların desenlendirme işlemi yaygın olarak kimyasal bir solüsyon yardımıyla gerçekleştirilir. $\langle 111 \rangle$ ve $\langle 100 \rangle$ yönelimli c-Si alttaşlar farklı oranlarda aşınırlar. Bununla birlikte, bu işlem, yüzeyde dağılmış kristalin yönelimi nedeniyle çok kristalli alttaş için uygun değildir (van Sark vd., 2012). Desenlendirme işlemi için TMAH (Tabata vd., 1992; Iencinella vd., 2005; Papet vd., 2006), NaOH (Vazsonyi vd., 1999; Barrio vd., 2012) gibi kimyasallar kullanıldığı gibi basitlik, kullanım kolaylığı, düşük maliyet ve homojen aşındırma oranı gibi avantajlara (Mahmoud Al ve Lahlouh, 2017) sahip olduğundan yaygın bir şekilde KOH veya KOH/IPA kimyasal solüsyonu (Barycka ve Zubel, 1995; Sato vd., 1999; Hayashi vd., 2006; Chu vd., 2009; Munoz vd., 2009) kullanılır.

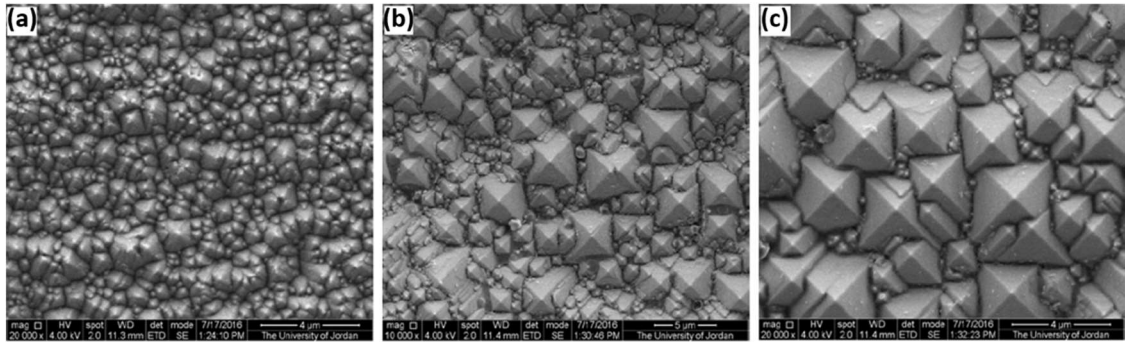
Desenlendirme işleminde kullanılan diğer kimyasallarda olduğu gibi KOH veya KOH/IPA solüsyonunun desenlendirme performansı üzerindeki etkisi kimyasal konsantrasyon, sıcaklık ve aşındırma süresinden ciddi bir şekilde etkilenir. Bu duruma Mahmoud Al ve Lahlouh (2017) yaptıkları bir çalışmayla değinmiştir. Desenlendirme performansı; ağırlıkça (wt) %20-36 KOH + %3 izopropil alkol (IPA) arasında değişen konsantrasyon, 60-80 °C arasında ki sıcaklıklarda ve 20-40 dakika arasında değişen bir aşınma süresinde incelenmiş ve performans sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 3.13 farklı süreler, Şekil 3.14 farklı oranlarda ki KOH ve Şekil 3.15 farklı sıcaklıklar için alttaş yüzeyinde oluşan piramit yapıyı göstermektedir. Mahmoud Al ve Lahlouh (2017) yaptıkları bu çalışmanın sonucunda ağırlıkça %20 oranında KOH + %3 oranında IPA, 40 dakika aşındırma süresi ve 80 °C sıcaklık koşullarının en iyi performansı sergilediğini gözlemlemişlerdir.



Şekil 3.13. 80 °C’de ağırlıkça %20 KOH + %3 IPA solüsyonunda aşındırma sonrası Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri 20 dk (a), 30 dk (b) ve 40 dk (c) (Mahmoud Al ve Lahlouh, 2017)



Şekil 3.14. 40 dakika ve 80 °C’de, ağırlıkça %20 KOH (a), %24 KOH (b) ve %28 KOH (c) + %3 ağırlık oranında IPA karışım çözeltisi ile aşındırmadan sonra Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri (Mahmoud Al ve Lahlouh, 2017)



Şekil 3.15. 60 °C (a), 70 °C (b) ve 80 °C (c) gibi farklı yüzey sıcaklıklarında 40 dakika boyunca %20 KOH + %3 IPA ağırlık oranında çözelti uygulandıktan sonra Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri (Mahmoud Al ve Lahlouh, 2017)

Yüzey desenlendirme işlemi getirdiği avantajların yanında nanometre incelikteki a-Si:H tabakasının alttaş üzerine düzgün bir şekilde kaplanmasını ve yüzeyin istenilen şekilde temizlenebilmesini zorlaştırır.

3.3.2 Yüzey temizliği

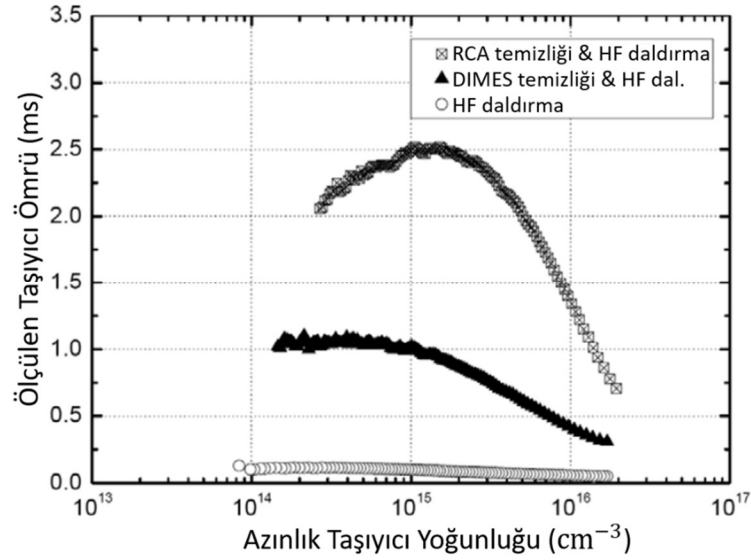
Mükemmel bir hetero-arayüzey oluşturmak için, iyi temizlenmiş bir c-Si alttaş yüzeyinin kullanılması ve alttaşın PECVD (plazma destekli kimyasal buhar biriktirme) sistemine yüklenmesinden önce alttaş yüzeyindeki doğal oksitin giderilmesi gereklidir (Fahrner, 2013). Çeşitli temizleme teknikleri, plazma biriktirmeden önce uygulanabilir. Genellikle, standart RCA (Radio Corporation of America) yöntemi ile temizleme işleminin ardından PECVD kaplama işleminin hemen öncesinde alttaş yüzeyinden doğal oksitin uzaklaştırılması için hidroflorik asit (HF) içine daldırma işlemi yapılır. RCA temizleme yönteminde iki solüsyon vardır: Standart RCA-1 ve standart RCA-2. RCA-1 amonyum hidroksit (NH_4OH), hidrojen peroksit (H_2O_2), saf su (H_2O) karışımı iken RCA-2 hidroklorik asit (HCl), hidrojen peroksit, saf su karışımından oluşur (Kern, 1990). Çizelge 3.3 alttaş temizliğinde kullanılan RCA-1, RCA-2 ve HF daldırma işlemlerinin özetini göstermektedir.

Çizelge 3.3. RCA ve HF temizliği (Kern, 1990; Angermann, 2008)

İşlem	İçerik	Oranlar	Engellediği kirlilikler
RCA-1	$\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_4\text{OH}$	5:1:1	Partiküller, organik malzemeler ve metaller
HF daldırma	$\text{HF} : \text{H}_2\text{O}$	1:50	Doğal oksit
RCA-2	$\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{HCl}$	6:1:1	Atomlar ve metal iyonları

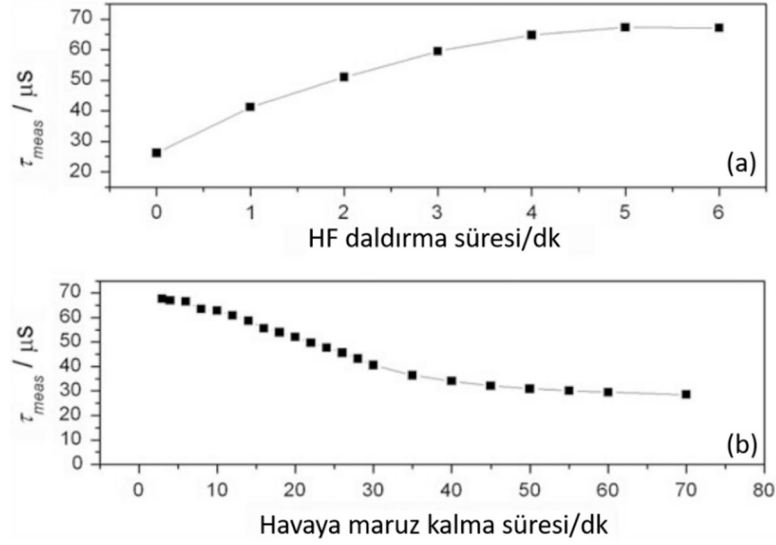
Farklı kimyasal temizleme prosedürlerinin hücre performansına etkisi taşıyıcı ömrünün ölçülmesiyle araştırılabilir. Taşıyıcı ömrü yüzey rekombinasyonunu ve dolayısıyla temizleme işleminin kalitesini gösterir. Delft Teknoloji Üniversitesi'nin yapmış olduğu çalışma ile üç farklı temizleme yöntemi karşılaştırılmıştır (van Sark vd., 2012). <100> yönelimli FZ c-Si alttaşın her iki tarafına katkısız (i)a-Si:H tabakalarının kaplanması için önce üç farklı temizlik işlemi yapılmıştır. İlk alttaş, standart bir RCA temizleme yöntemi kullanılarak ikinci alttaş ise konsantre nitrik asit içeren standart DIMES temizleme prosedürleri kullanılarak temizlenmiştir. Üçüncü alttaş sadece HF daldırma yöntemi ile temizlenmiş ve harici bir temizlik yöntemi kullanılmamıştır. Her üç alttaş doğal oksit tabakanın çıkarılması için HF'ye batırılmıştır (üçüncü alttaş için tek yapılan işlem). Temizlik işlemlerinden sonra, her çalışma için aynı biriktirme koşullarını kullanarak

alttaşların her iki tarafına 120 nm kalınlığında bir katkısız (i)a-Si:H tabakası biriktirilmiştir. Pasivasyon kalitesini değerlendirmek için taşıyıcı ömrü ölçülmüştür. Şekil 3.16’da görüldüğü gibi, Standart RCA prosesi kullanılarak temizlenen alttaş en yüksek taşıyıcı ömrü ve dolayısıyla en iyi pasivasyonu sergilemiştir. En düşük taşıyıcı ömrü, sadece bir HF daldırma işlemine tabi tutulmuş alttaş için gözlenmiştir.



Şekil 3.16. Farklı temizleme işlemlerinin performansı (van Sark vd., 2012)

Temizleme işleminin son adımı, doğal oksit katmanlarını yüzeyden kaldırmak ve hidrojen bağları ile yüzey pasivasyonunu sağlamak amacıyla alttaş kısa süreliğine HF çözeltisine daldırmaktır. Kısa bir süre için hidrojen bağ pasivasyonu yeniden doğal oksit oluşumunu engeller fakat uzun bir süre için etkili olamaz (Fahrner, 2013). HF daldırma işlemi ile bir sonraki süreç olan PECVD ile kaplama işlemi arasındaki süre sınırlıdır. Bu süre yapılan bir çalışma ile test edilmiş ve alttaşın HF çözeltisine (%1) daldırma süresinin ve HF daldırma işlemi ile kaplama yapılması arasında geçen havaya maruz kalma süresinin etkin ömür süresi (effective lifetime) üzerine etkileri Şekil 3.17’de görüldüğü gibi bulunmuştur (Fahrner, 2013).



Şekil 3.17. c-Si bir alttaş için HF daldırma sürenin uzunluğunun (a) ve HF sonrası havaya maruz kalma süresinin (b) etkin ömür üzerindeki etkisi (Fahrner, 2013)

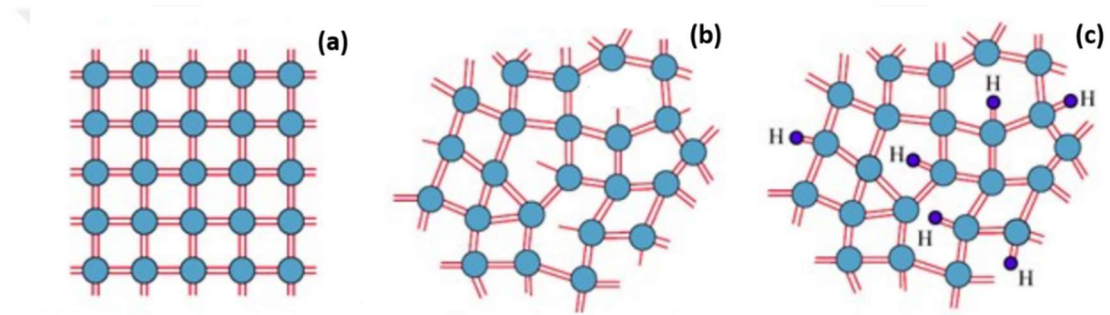
Alttaş temizliğinde yaş kimyasal temizleme işleminin yanında kuru temizleme işlemi de (Tucci vd., 2001; Tucci vd., 2002) vardır. Yaş kimyasal temizleme işleminden ekonomik olarak daha ucuz olan kuru temizleme işlemi güneş hücrelerinin seri üretimine uygun bir yöntemdir. Alttaş yüzeyine uygulanan plazma işlemi için genellikle H_2 , CF_4 / O_2 gibi gazlar kullanılır. Bununla birlikte, plazma işleminin kristal yüzeye zarar verme potansiyelinden ötürü bu yöntem güneş hücresinin elektriksel özellikleri üzerinde olumsuz etkiye sahiptir (Tucci vd., 2001; Tucci vd., 2002).

3.3.3 Katkısız (i) ve katkılı (n)-(p) a-Si:H tabakaların kaplanması

Alttaş temizliği sonrası c-Si yüzeyine önce katkısız sonra katkılı a-Si:H tabakaların biriktirilmesi işlemi gerçekleştirilir. Bu adıma değinmeden önce öncelikle c-Si, a-Si ve a-Si:H yapılarının anlaşılması önemlidir. Tek kristal silisyumun her atomu, dört komşu atoma eşit açı ve bağlanma uzunluğu ile kovalent olarak bağlanır. Sürekli tekrar eden birim hücreler yan yana gelerek kristal kafesi oluşturur. Düzenli bir atomik diziliş, Şekil 3.18 (a)'da gösterildiği gibi, amorf silisyum (a-Si) yapısından farklı bir şekilde uzun mesafeli diziliş düzeni ile sonuçlanır. a-Si ise, bağ uzunlukları ve açılarındaki küçük sapmalar-farklılıklar nedeniyle uzun bir aralıkta yapısal bir düzen sergileyemez. Daha büyük sapmalar, kolay bir şekilde kırılacak zayıf bağlara yol açar ve bu da atomik örgü içinde kusur oluşumu ile sonuçlanır. Şekil 3.18 (b)'de de görüldüğü gibi a-Si

yapısında kusurlar, çoğunlukla sadece üç silisyum atomuna kovalent olarak bağlanmış ve bir eşlenmemiş elektrona sahip olan silisyum atomlarıdır (Poortmans ve Arkhipov, 2006). Bu doymamış bağlar sarkan bağlar (dangling bonds) olarak adlandırılır.

Saf a-Si'nin atomik yapısında büyük bir kusur yoğunluğu/sarkan bağların yoğunluğu (cm^3 başına yaklaşık 10^{21} kusur) mevcuttur. Bu kusurlar atomik örgü içine, sarkan silisyum bağlarının çoğunu pasifleştirecek hidrojen dahil edilmesiyle güçlü hidrojen-silisyum bağlarının oluşumu sonucu $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^3$ seviyelerine düşer (Street, 1991; Poortmans ve Arkhipov, 2006). Hidrojen dahil edilmiş bu yapı Şekil 3.18 (c)'de verilmiş olan hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) yapısıdır.



Şekil 3.18. Atomik yapılar: tek c-Si (a), a-Si (b) ve a-Si:H (c) (Kasap, 2006)

a-Si malzemedeki yüksek kusur yoğunluğu, katkılamayı, fotoiletkenliği ve yararlı bir yarı iletkenin diğer istenen özelliklerini önler. Sarkan bağların hidrojen ile doyurulması işlemi a-Si malzemesinin özelliklerini geliştirmiş ve yüksek fotoiletkenlik, düşük kusur yoğunluğu ve katkılanabilirlik sağlamıştır (Street, 1991). Bu sayede amorf yapının, a-Si:H olarak etkili bir şekilde fotovoltaiik uygulamalarda kullanımı mümkün olmuştur.

a-Si:H, güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanım için umut vaat eden bir yarı iletkenidir. Kristal silisyum (c-Si) ile karşılaştırıldığında a-Si:H filminin bazı avantajları şu şekilde sayılabilir (Street, 1991; Cahyono vd., 2017);

- Kaplanan a-Si:H tabakaların üretim koşullarına bağlı olarak bant aralığı, kalınlık ve katkılanma gibi özellikleri kolayca kontrol edilebilir (buda cihaz performansını optimize etmeyi kolaylaştırır)
- Yüksek ışık emilimi

- 500 °C'nin altında nispeten düşük büyütme sıcaklığı (kristal büyütme için 1450 °C) ile alt malzeme seçiminde kolaylık. Düşük sıcaklıklar ve alt malzeme seçmenin kolaylığı, büyütme sürecini nispeten ucuz yapan faktörlerdir.

Katkısız a-Si:H tabakanın yüksek verimli HIT güneş hücrelerinin üretiminde çok önemli bir yeri vardır. Katkılı a-Si:H tabaka ve c-Si yüzey arasında bulunur ve oldukça iyi yüzey pasivasyonu sağlar. a-Si:H tabakaların üretimi her ne kadar HWCVD (sıcak tel kimyasal buhar biriktirme) (Jadkar vd., 2007), sıçratma (Hossain vd., 2006), kimyasal tavlama (Futako vd., 1999), PLD (reaktif darbeli lazer biriktirme) (Hanyecz vd., 2011) gibi yöntemlerle elde edilebilse de PECVD (plazma destekli kimyasal buhar biriktirme) yaygın olarak kullanılan yöntemdir. PECVD yöntemi CVD yönteminin özel bir halidir. CVD'de gaz fazında bir kimyasal reaksiyon yüksek alt tabaka sıcaklıklarında meydana gelirken PECVD'de kimyasal reaksiyon bir plazma tarafından meydana getirilir veya desteklenir. CVD ile karşılaştırıldığında PECVD'nin avantajı, daha yüksek bir büyütme hızı ve daha düşük bir alt tabaka sıcaklığıdır (Rostan, 2010). Plazma, iki elektrot arasında uygulanan bir alternatif elektrik alan ile üretilir. Kaynak gaz Silan (SiH_4) plazmada SiH_x radikallerine ve atomik hidrojene ayrıştırılır. Daha sonra, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H), alttaş yüzeyinde büyümeye başlar. Hidrojen, a-Si:H birikimi için önemli bir rol oynayan ek bir gazdır. (i)a-Si:H tabakalar genellikle PECVD yöntemi ile hidrojen (H_2) gazı ile seyreltilmiş silan (SiH_4) gazı ile çökeltirilir. a-Si:H filmleri tipik olarak 10-200 Pa basınç aralığında yaklaşık 200 °C sıcaklıkta biriktirilir (Willeke ve Weber, 2013).

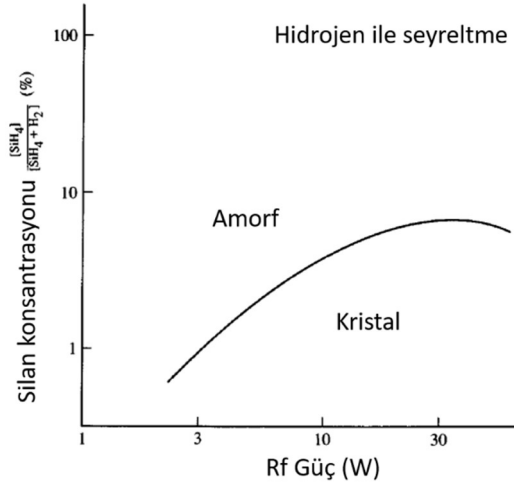
Katkılı a-Si:H tabakalar ise HIT güneş hücresinde p-n eklem yapının oluşturulmasında ve BSF denilen yapıyı sağlayıp yüzey rekombinasyonunun engellenmesinde rol oynar. Katkılı a-Si:H filmleri, tıpkı katkısız a-Si:H filmler gibi bir SiH_4 ve H_2 karışımı ile PECVD tarafından biriktirilir. Katkılı a-Si:H biriktirmede farklı olarak katkılama gazları eklenir. p-tipi tabakalar ((p)a-si:H) için trimetilboron (TMB) veya diboran (B_2H_6) gazı, n-tipi ((n)a-si:H) filmler için fosfin (PH_3) gazı SiH_4 gaz akışında karıştırılır. Bu katkılama gazlarında H_2 ile seyreltilir.

Biriktirme işleminde çapraz kontaminasyona dikkat edilmesi gerekir (Willeke ve Weber, 2013). Katkılı ve katkısız a-Si:H tabakaların biriktirme işlemi tek bir PECVD odasında

ardışık olarak gerçekleştirildiğinde katkı gazlarının işlem odalarının duvarlarında veya alttaş tutucularda tortulaşması çapraz kontaminasyona neden olabilir. Bu tür kirlenme, zayıf p/i veya n/i a-Si:H ara yüz özelliklerine (pasivasyon kalitesinin düşmesi dolayısıyla V_{oc} 'de düşüş) yol açar ve güneş hücresi performansını olumsuz etkiler. Bu nedenle verimli bir güneş hücresi üretilmesi için çok bölmeli biriktirme sistemleri (her bir katman için ayrı oda) ya da yeterli oda temizleme prosedürleri kullanılmalıdır (De Wolf vd., 2012; Willeke ve Weber, 2013).

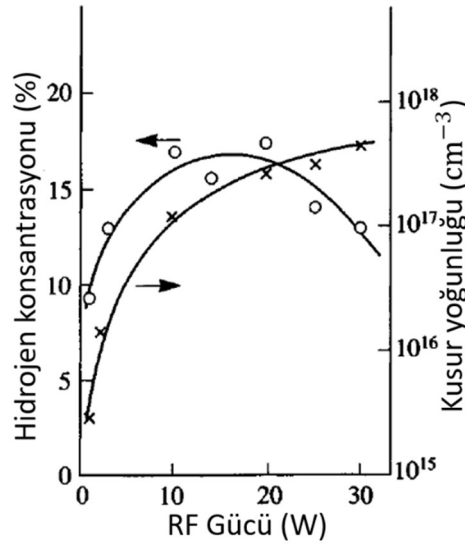
a-Si:H tabakaların kalitesi biriktirme koşulları ile doğrudan ilgilidir bu yüzden kaplama işlemi esnasında kaplama parametrelerinin kontrolü önemlidir. Basınç, sıcaklık, plazma gücü, silan konsantrasyonu gibi kaplama parametreleri a-Si:H tabakasının kalınlık, hidrojen bağ oranı, optik bant aralığı, ömür süresi gibi elektriksel ve optik özelliklerini etkiler. Bu açıdan kaplama koşulları optimum performans için oldukça önemlidir. Bazı önemli işlem parametreleri aşağıda verildiği gibidir;

- Plazma uyarma frekansı: PECVD yönteminde 13,56 MHz'lik bir plazma uyarma frekansı (Schulze vd., 2010; Descoeudres vd., 2011; Muñoz vd., 2012; Seyhan vd., 2017) sıklıkla kullanılır. Bunun yanında 40,68 MHz (Descoeudres vd., 2010) veya 70 MHz (De Wolf vd., 2012) gibi çok yüksek frekansların (VHF) başarılı kullanımında mevcuttur. Fakat genellikle a-Si:H filmlerin kaplanmasında RF PECVD kullanılırken, μ c-Si:H (mikrokristal) yapılı filmler için VHF-PECVD kullanılır (Rostan, 2010).
- Gaz konsantrasyonu: Gaz konsantrasyonu, seyreltme oranı ($R = [H_2] / [SiH_4]$) veya silan yoğunluğu ($SC = [SiH_4] / [H_2] + [SiH_4]$) şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Seyreltme oranı arttıkça silan yoğunluğunun azalacağı ifadelerden anlaşılabılır. a-Si:H büyümesi sırasında hidrojen ilavesi, belirli bir seyreltme oranını aştıktan sonra amorf yapıdan mikro kristal yapıya geçişe yol açar. Şekil 3.19, güç-seyreltme diyagramını göstermektedir (Street, 1991). Şekilde görüldüğü gibi RF gücünün artmasıyla etki artmaktadır.



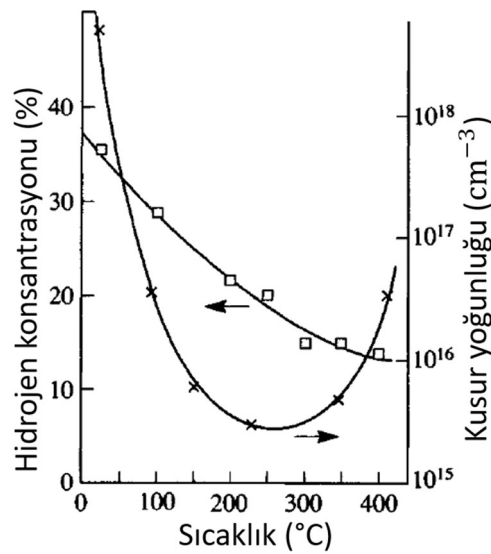
Şekil 3.19. a-Si:H ve μ c-Si:H yapıları arasında silan yoğunluğuna göre geçiş rejimi (Street, 1991)

- Biriktirme basıncı (Fahrner, 2013): Biriktirme basıncı esas olarak büyüme hızını ve homojenliği etkiler. Kaplama basıncındaki bir artış, iyon bombardımanında bir düşüşü mümkün kılar ki, bu plazma hasarı açısından büyüme koşulları için daha çok tercih edilir. Bununla birlikte, eğer biriktirme basıncı çok yüksek olursa, biriken malzemedeki kusurların büyümesini destekler. Dahası yüksek basınç polisilan tozunun oluşumunu destekleyebilir. Her iki etki de istenmemektedir.
- Plazma gücü (Van Sark, 2002): Plazma gücü birikme oranı üzerinde etkilidir. Plazma gücü (ya da güç yoğunluğu) arttığında, birikme oranı (birikme hızı) artar. Bu biriktirme hızı artışı, düşük film kalitesi ve toz oluşumu dâhil olmak üzere bir takım dezavantajlara sebep olur. Artan güç ile hidrojen içeriğinin artmasına bağlı olarak optik bant aralığı artar. Bununla birlikte, çok yüksek güç seviyeleri, amorf bir büyüme yerine mikro kristalli silisyum oluşumuna neden olur. Buda, hidrojen içeriğinin ve bant aralığının azalmasına neden olur. Ek olarak, plazma gücündeki artış iyon bombardımanının artmasıyla kusurlu malzeme ile sonuçlanır. Artan güç seviyeleri ile film özelliklerinin bozulmasının bir sonucu olarak, kaliteli bir malzemenin elde edilmesi için düşük biriktirme oranı ile birlikte düşük güç kullanımı gereklidir. Şekil 3.20 hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğunu RF gücünün fonksiyonu olarak göstermektedir.



Şekil 3.20. Hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğunun RF gücüne göre değişimi (Street, 1991)

- Sıcaklık (Van Sark, 2002): Sıcaklık çekirdeklenme özelliklerini değiştirir ve filmdeki kusur yoğunluğu üzerinde bir etkiye sahiptir. Birikme hızı sıcaklıktan neredeyse bağımsızdır. Toplam hidrojen içeriği, mikro yapı parametresi, kusur ve optik bant aralığı artan sıcaklıkla azalır. Fakat 250 °C'den daha yüksek sıcaklıklar filmdeki hidrojen içeriğinin düşmesine neden olur ve daha yüksek kusur yoğunluklarına yol açar. Şekil 3.21 sıcaklık değişimi ile hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğunun değişimini göstermektedir.



Şekil 3.21. Sıcaklık değerinin hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğu üzerine etkisi (Street, 1991)

3.3.4 TCO (Transparent conductive oxide) tabakaların kaplanması

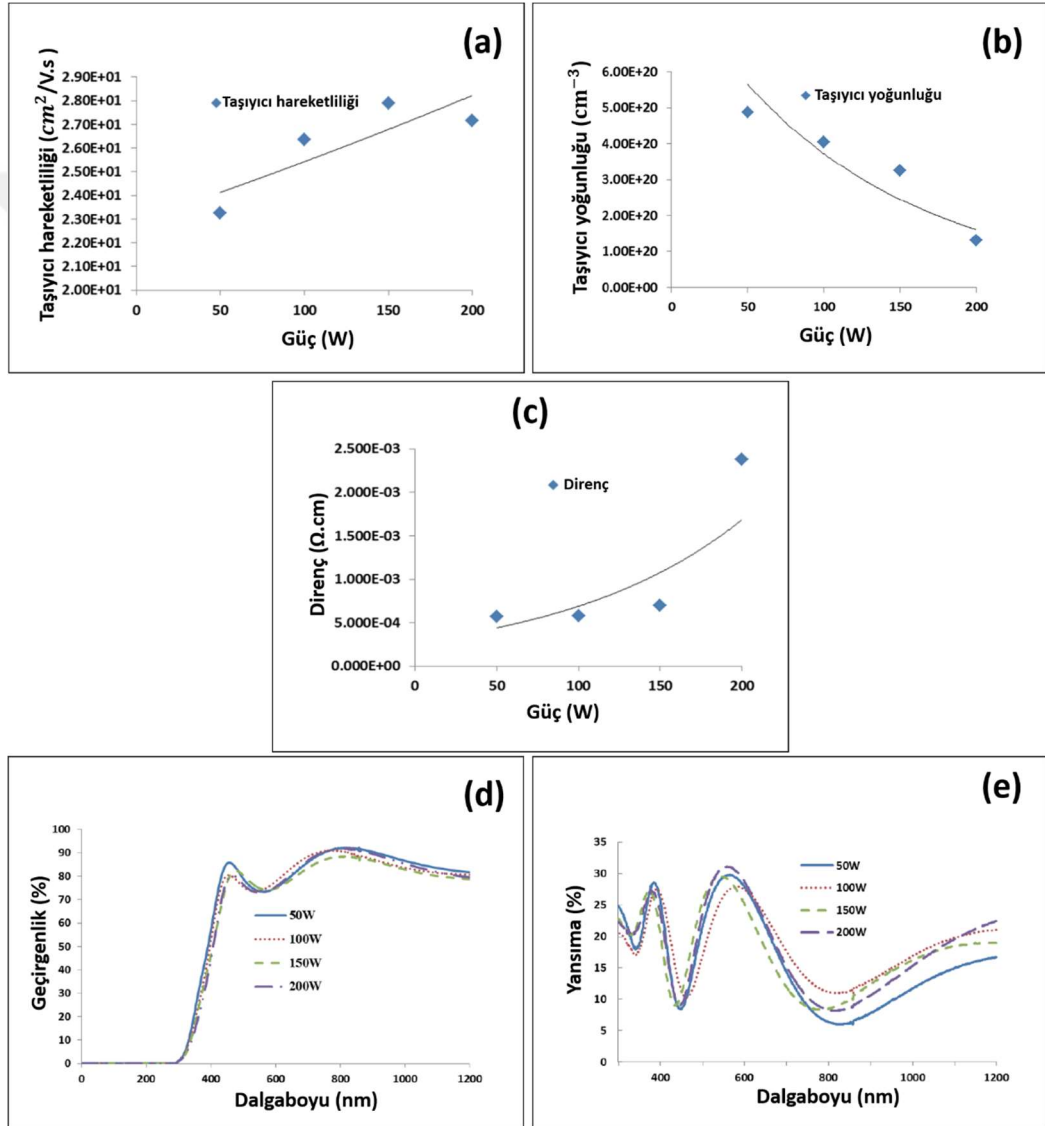
TCO (saydam iletken oksit), optik geçirgenlik ve iletken özellikleri nedeniyle HIT güneş hücrelerinde katkılı a-Si:H tabaka ile metalizasyon arasına kaplanan bir katmandır. Katkılı a-Si:H tabakalarının yanal iletkenliğinin zayıf olmasından dolayı a-Si:H filmleri üzerinde bir şeffaf iletken tabaka biriktirme işlemi gereklidir. a-Si:H / c-Si heteroeklem güneş hücrelerinde, hem iyi bir yansıma önleyici hem de iyi bir elektriksel iletkenliğe sahip ve düşük sıcaklıkta kaplanabilen malzemelerin bulunması zorunludur. ZnO, In₂O₃, SnO₂ gibi oksitlerin katkılanması ile AZO, GZO, ATO ve ITO gibi TCO görevi görecek malzemeler üretilir. TCO olarak ITO (In₂O₃: Sn) filmler görünür dalga boylarında yüksek şeffaflığa sahip, düşük dirençli ve düşük sıcaklıklarda kolayca üretilebildiğinden HIT güneş hücresinde yaygın olarak kullanılır (van Sark vd., 2012).

ITO, bir argon atmosferinde DC veya RF magnetron sıçratma (sputtering) yöntemi ile kaplanır ve üretilecek tabakaların katkısını ayarlamak için oksijen gazı eklenir (Willeke ve Weber, 2013). ITO üretiminde CVD (Maruyama ve Fukui, 1991), Elektron demeti buharlaştırma yöntemi (Raoufi, 2009), İyon demeti ile biriktirme (Han vd., 2001), Sol-jel yöntemi (Biswas vd., 2006), Darbeli Lazer Biriktirme (Zheng ve Kwok, 1993) vb. gibi teknikler kullanılabilir de DC ve RF magnetron sıçratma teknikleri en yaygın kullanılan ve etkili yöntemlerdir (Zhu vd., 2000; Her ve Chang, 2016). Çünkü elde edilen film özellikleri, malzeme sıcaklığı (Meng ve Dos Santos, 1998; Boonyopakorn vd., 2010; He vd., 2013), DC-RF gücü (Terzini vd., 2000; Kurdesau vd., 2006; Her ve Chang, 2016), 2016) ve O₂ gazı akış oranı (Bender vd., 1998; Zhang, 2010; Hussain vd., 2014) gibi sıçratma koşullarının değiştirilmesiyle kontrol edilebilir. Malzeme sıcaklığı, DC-RF gücü ve O₂ gaz akış oranı gibi sıçratma koşulları kaplanan ITO filminin direnç, taşıyıcı yoğunluğu, taşıyıcı hareketliliği, geçirgenlik ve yansıtma gibi elektriksel ve optik özellikleri üzerinde etkilidir.

Şekil 3.22 örnek olması açısından DC-RF gücünün ITO'nun bazı özellikleri üzerinde ki etkisini gösterirken, Şekil 3.23 O₂ gazı akış oranının, Şekil 3.24 malzeme sıcaklığının ITO film özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

Her ve Chang (2016) yaptıkları çalışma ile güç değeri hariç diğer kaplama koşullarının sabit tutulması ile cam malzeme üzerine ITO kaplanmış ve güç değerinin değişimi ile

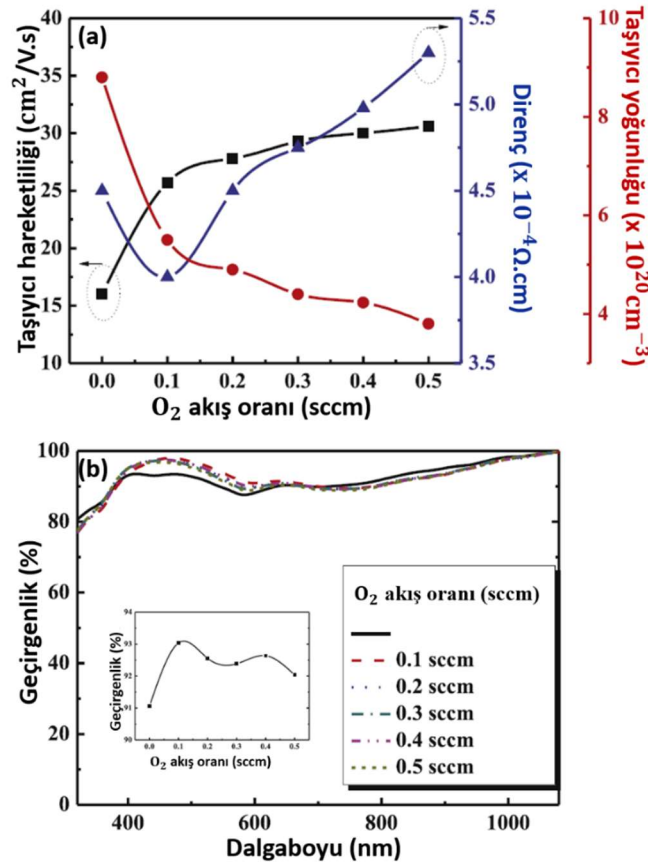
ITO'nun optik ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Şekil 3.22 (a), (b) ve (c)'de görüldüğü gibi artan güç değeri ile taşıyıcı hareketliliği ve direnç artarken taşıyıcı yoğunluğu azalmaktadır. Ayrıca Şekil 3.22 (d) ve (e) güç değerinin değişiminin optik özellikler üzerine etkisini göstermektedir. Deneysel sonuçlar, güç arttıkça optik geçirgenliğin azaldığı ve 50 W'lık bir güç değerinde hazırlanan ITO filmleri için görünür bölgede %80'lik optik geçirgenliğin elde edildiğini göstermiştir. Sonuç olarak iyi bir ITO performansı için düşük güç değeri önerilmiştir.



Şekil 3.22. Uygulanan güç değerinin değişimi ile taşıyıcı hareketliliği (a), taşıyıcı yoğunluğu (b), direnç (c), geçirgenlik (d) ve yansımaya (e) değerlerinin değişimi (Her ve Chang, 2016)

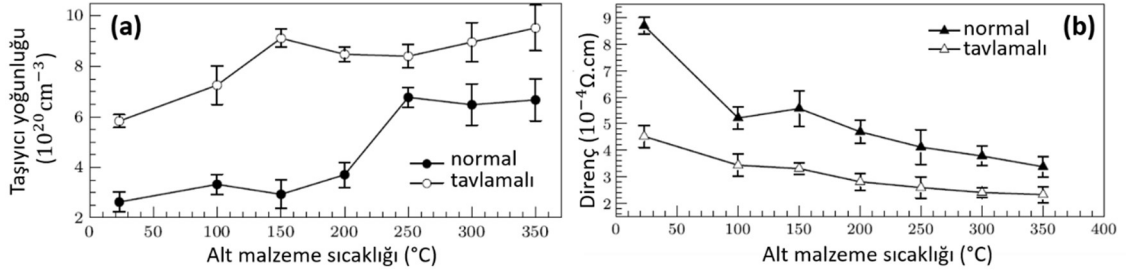
Hussain vd. (2014) yaptıkları çalışma ile O_2 akış oranının ITO filmi üzerindeki etkisini cam alt malzeme üzerine kaplanan örneklerle incelemiştir. Şekil 3.23 (a) O_2 gazı akış

oranının artması ile taşıyıcı yoğunluğu düşerken tersi bir şekilde taşıyıcı hareketliliğinin arttığını göstermektedir. Buna ek olarak direnç değeri 0.1 sccm oksijen akış oranı için en düşük değere sahipken akış oranının artmasıyla direnç değerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.23 (b)'de görüldüğü gibi bu koşullarda kaplanan bir ITO için geçirgenlik değeri %92'den aşağı düşmezken en iyi sonuç 0.1 sccm oksijen akış oranında elde edilmiştir.



Şekil 3.23. Oksijen gazı akış oranı ile taşıyıcı hareketliliği, direnç, taşıyıcı yoğunluğu (a) ve geçirgenlik (b) değerlerinin değişimi (Hussain vd., 2014)

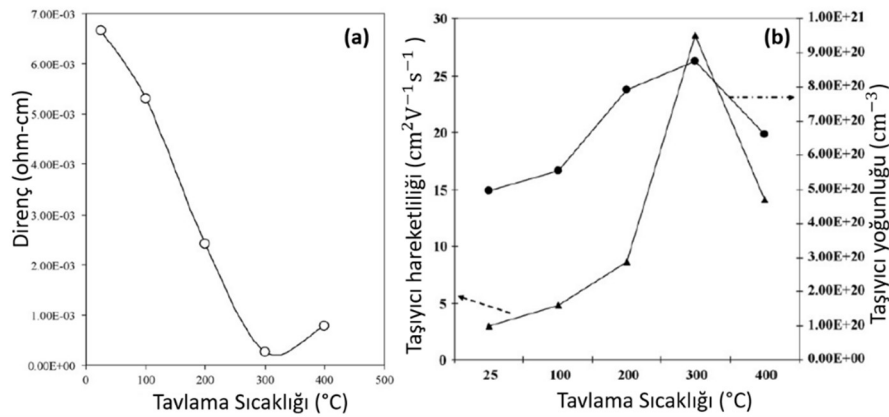
Boonyopakorn vd. (2010) yaptıkları bir çalışma ile alt malzeme sıcaklığı değişiminin ITO performansına etkisini incelemiştir (Şekil 3.24). Bu çalışma ile sıcaklığın artmasının kristalleşme işlemi sırasında film yapısındaki Sn ikamesini geliştirdiği, bu da daha yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna ve sonuç olarak da direnç değerinin azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.24. Alt malzeme sıcaklığının değişimi ile taşıyıcı yoğunluğu (a) taşıyıcı hareketliliği (b) direnç (c) ve geçirgenlik (d) değerlerinin değişimi (Boonyopakorn vd., 2010)

Her ne kadar yüksek sıcaklıklar ITO performansını geliştirse de, yapılan bu çalışmanın cam alt malzeme üzerinde gerçekleştirildiği ve yüksek sıcaklıkların HIT güneş hücresi performansını olumsuz etkileyeceği unutulmamalıdır.

Şekil 3.24 ayrıca tavlama yapılan ve tavlama işlemi uygulanmayan aynı örneğin farklı performanslar sergilediğini de göstermektedir. Kaplama işlemi parametrelerine ek olarak ITO filmlerin kalitesini etkileyen bir diğer işlem tavlama işlemidir. Kaplama işlemi yapıldıktan sonra ek bir tavlama işleminin performansı artırdığı bilinmektedir. Şekil 3.25 (a)'da görüldüğü gibi tavlama sıcaklığı arttıkça direncin düştüğü ve Şekil 3.25 (b)'de görüldüğü gibi tavlama sıcaklığı arttıkça taşıyıcı hareketliliği ve taşıyıcı yoğunluğu artış göstermedir. Şekillerde 300 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklığın kritik bir nokta olduğu da anlaşılmaktadır. Bu sıcaklık değerinden daha yüksek sıcaklıklarda yapılan ısıt işlemler, ITO/Si ara yüzünün ve filmlerin elektriksel özelliklerinin bozulmasına yol açmaktadır (Balasundaraprabhu vd., 2009).



Şekil 3.25. Tavlama sıcaklığına göre direnç (a) taşıyıcı yoğunluğu ve taşıyıcı hareketliliği (b) değişimi (Balasundaraprabhu vd., 2009)

3.3.5 Arka ve ön yüzey metalizasyon işlemi

Güneş hücrelerinde üretilen elektron-boşluk çiftlerinin hücre yüzeyinden toplanması ve elektrik iletimi ön ve arka metal bağlantı ile sağlanır. HIT güneş hücrelerinde arka bağlantı PVD tekniği ile sağlanırken ön yüzey metalizasyonu (ön bağlantı) için çeşitli yöntemler kullanılsa da yaygın yöntem serigrafik baskı yöntemidir. Bu kısma detaylı bir şekilde 4. bölümde değinilecektir.

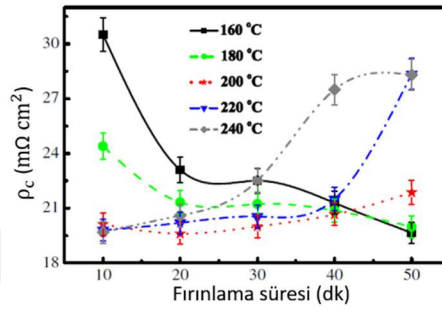
3.3.6 Fırınlama

Serigrafik baskı yöntemi ile ön yüz metalizasyonun yapılmasından sonra hücre fırınlama işlemine tabi tutulur. Fırınlama yapılmadan önce hücre yüzeyine herhangi bir temas olursa akışkan gümüş pasta henüz sertleşmediğinden hücre yüzeyine dağılır ve ön yüz metalizasyon dizaynını bozup ek bir verim kaybına neden olur. 250 °C altında bir termal işlem olan fırınlama işlemi ile gümüş pastanın çözücülerinin dışarı atılması ve sertleşmesi sağlanır. Uygulanan fırınlama sıcaklığı ve zamanı ITO-Ag ara yüzünde ki temas direncini ve gümüş elektrotların elektriksel özelliklerini etkiler. Dolayısıyla fırınlama işlemi de hücrenin verimi üzerinde etkisi olan bir adımdır.

Fırınlama işlemi diğer c-Si güneş hücrelerinde yüksek sıcaklıkta (700-800 °C) gerçekleştirilirken, HIT güneş hücreleri için nispeten düşük sıcaklıkta (<250 °C) gerçekleştirilmelidir. Bu yüzden HIT güneş hücreleri ve standart c-Si güneş hücreleri için kullanılan metal macunlar farklıdır. HIT güneş hücrelerinin fırınlamadan önceki üretim adımları düşük sıcaklıkta gerçekleştiğinden a-Si:H katmanlar yüksek fırınlama sıcaklığında hasar görebilir. Ag pastanın düşük sıcaklıkta bir fırınlamaya maruz bırakılması bu açıdan performans için çok önemlidir. Fakat düşük bir fırınlama sıcaklığında, iyi bir elektrot oluşumu da meydana gelmez. Bu nedenle, fırınlama işleminin optimum koşulları bilinmelidir.

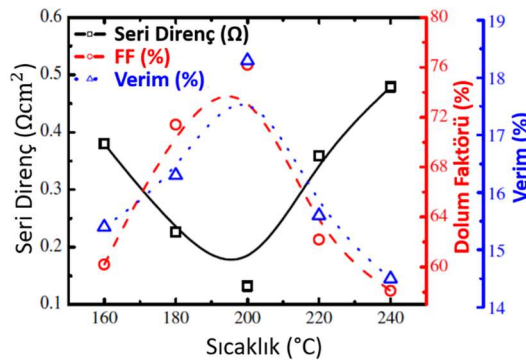
Lee vd. (2014) yaptıkları çalışma ile HIT güneş hücreleri için fırınlama aşamasının detaylı bir incelemesini yapmıştır. Bu çalışmada 160 °C – 240 °C arası fırınlama sıcaklığı ve 10-50 dk arasında fırınlama sürelerinin hücre performansına etkisi incelenmiştir. Fırınlama sıcaklığı ve fırınlama süresinin temas öz direnci (ρ_c) üzerine etkisi analiz edilmiştir. Şekil 3.26 değişen sıcaklık ve süre için ρ_c değişimini göstermektedir. Şekil

3.26'da görüldüğü gibi 160 °C ve 180 °C fırınlama sıcaklığı için fırınlama süresinin artması ρ_c 'yi düşürmüştür. Bu sonuç 160 °C ve 180 °C'de, kısa bir fırınlama süresinin, daha düşük bir ρ_c ve daha iyi bir elektrot oluşumu sağlamayamadığı göstermektedir. Öte yandan, 220 °C ve 240 °C sıcaklıklarda fırınlamada ρ_c başlangıç değeri 10 dakika için 19,6 m Ω cm² civarında düşük kalmış artan süre ile daha sonra yaklaşık 28,4 m Ω cm²'ye çıkmıştır. Bununla birlikte, 200 °C'de ki fırınlama için, 10-50 dk arasında ρ_c değeri 19,61 m Ω cm²'den 21,9 m Ω cm²'ye yükselirken ρ_c değerindeki en düşük artış oranı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.26. Değişik sıcaklıklarda fırınlama süresinin Ag elektrot ve ITO filmi arasında ki temas direnci (ρ_c) üzerine etkisi (Lee vd., 2014)

Daha kısa işlem süresi, endüstriyel düzeyde büyük ölçekli üretim için önemli bir özelliktir. Sonuçlar, fırınlama süresinin R_c 'yi etkilediğini ve en iyi ρ_c değenin 200 °C sıcaklıkta 20 dakikalık fırınlama ile elde edildiğini göstermektedir. Şekil 3.27, fırınlama sıcaklığının değişiminin seri direnç (R_s), FF ve verimlilik üzerine etkisini göstermektedir. Burada, 200 °C sıcaklıkta ki fırınlamanın en düşük R_s 'ye, en yüksek FF ve verime sahip olan bir güneş hücresi sağladığı görülmektedir. Fırınlama işleminden sonra güneş hücresi hazır hale gelir ve ardından ölçüm aşamasına geçilir.



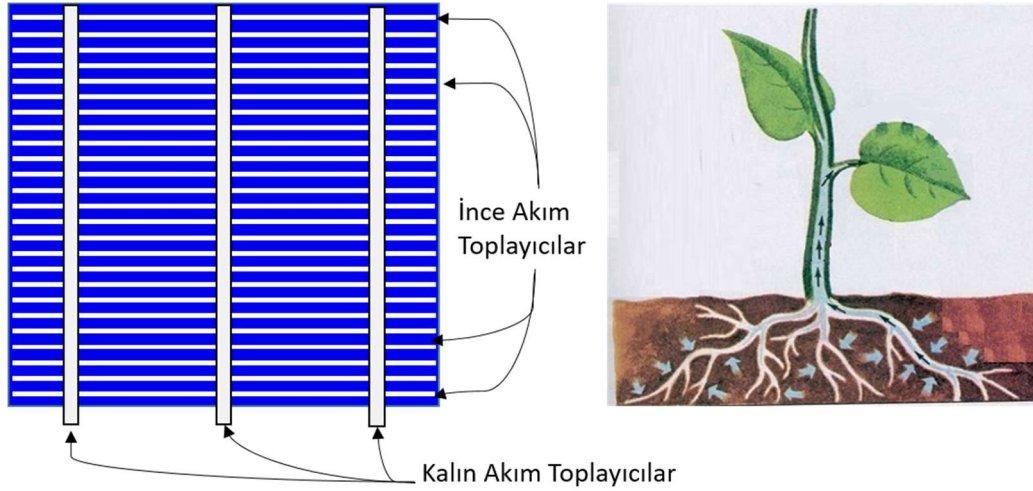
Şekil 3.27. Farklı fırınlama sıcaklıkları için HIT güneş hücrelerinin seri direnci, dolum faktörü ve verimliliği (Lee vd., 2014)

BÖLÜM IV

METALİZASYON

4.1 Metalizasyona Giriş

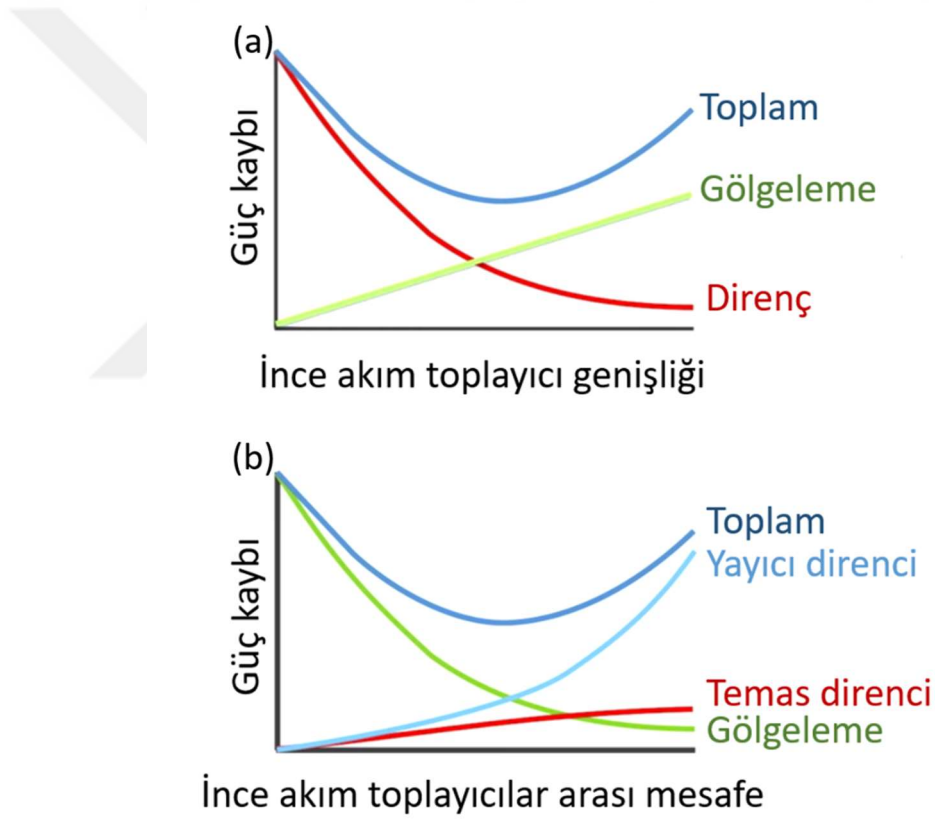
Metalizasyon güneş hücresi çalışma prensibinde önemli bir yere sahiptir. Güneş hücresine gelen fotonların hücrede oluşturduğu elektron-boşluk çiftleri ön ve arka yüzeyde bulunan metal bağlantılar (metalizasyon) sayesinde toplanabilmektedir. Standart güneş hücrelerinde gelen fotonlar hücrenin güneşi gören yüzü olan ön yüzeyinden hücreye gireceği için arka yüzeyde bulunan metalizasyondan ziyade ön yüz metalizasyon tasarımı hücre performansı açısından daha fazla önemin verildiği kısımdır. Ön yüz metalizasyonu Şekil 4.1’de görüldüğü gibi ince akım toplayıcıları (finger) ve kalın akım toplayıcıları (busbar) çiftinden oluşur. Finger hücre üzerindeki akımları toplayıp dış kablo bağlantısı olan busbara iletir. Bu yapı Şekil 4.1’de verilmiş olan bir bitki kökünün işlevine benzetilebilir, tıpkı kılcal köklerin topraktan mineralleri toplayıp bağlantılı olduğu kalın köklere ilettiği gibi fingerlarda topladığı elektrik akımını busbarlara iletir.



Şekil 4.1. Güneş hücrelerinde ön yüz metalizasyonu

Metalizasyon işlemi güneş hücresi verim ve maliyetini doğrudan etkileyen önemli bir adımdır. İkinci bölümde bahsedildiği gibi güneş hücresi teknik kayıplarından gölgeleme ve direnç kayıpları doğrudan metalizasyonla ilgili olan kısımlardır.

Metalizasyon hücre üzerinde gölgeleme yapıp aktif hücre alanını azaltsa da hücreye düşen fotonların oluşturduğu elektrik akımının toplanabilmesi için metalizasyon işlemi gereklidir. Gölgelemeyi azaltmak için finger ve busbarlar çok ince ve birbirine mesafeli olarak uygulanabilir fakat bu durumda ince finger ve busbar hat direnci yüksek olacak ayrıca mesafelerin çok açık olması nedeniyle üst yüzey direnci de çok yüksek olacaktır. Bu nedenle optik ve elektriksel kayıpların dengelendiği optimum bir metalizasyon dizaynı performans açısından gereklidir. Bunun yanında metalizasyon işlemi hücre üretim adımlarında alttaş maliyetinden sonra en etkili maliyet unsuru olduğundan maliyet açısından da optimum dizayn gereklidir. Şekil 4.2 direnç ve gölgeleme kayıplarının finger genişliği ve fingerlar arası mesafeye göre değişimini kabaca göstermektedir.



Şekil 4.2. Gölgeleme ve dirençler arasındaki ilişki, ince akım toplayıcı genişliği (a) ve ince akım toplayıcılar arasındaki mesafenin (b) gölgeleme ve dirence etkileri (Jäger vd., 2014)

Metalizasyon işleminin gerçekleştirildiği birçok yöntem vardır bir sonraki adımda bu yöntemler hakkında bilgi verilip son kısımda da ön yüz metalizasyon dizaynının optimizasyonu konusu incelenecektir.

4.2 Metalizasyon Yöntemleri

Metalizasyon için serigrafik baskı, şablon baskı/stencil printing (Hannebauer vd., 2015; Panek vd., 2017), ink-jet (Gizachew vd., 2011; Ebong vd., 2012), aerosol baskı/aerosol printing (Mette, 2007), bakır elektroliz kaplama/Cu elektroplating (Muñoz vd., 2012; Geissbühler vd., 2014; Aguilar vd., 2016) ve bazı tekniklerin birleştirildiği hibrit yöntemler gibi birçok teknik olsa da serigrafik baskı tekniği basit ve hızlı olması ile seri üretime yatkınlığından dolayı pazarın en yaygın kullanılan metalizasyon teknolojisidir.

Serigrafik baskı yöntemine alternatif olabilecek tekniklerden ink-jet baskı (mürekkep püskürtmeli baskı) teknolojisi (Gizachew vd., 2011; Ebong vd., 2012) git gide umut verici alternatif bir teknik haline gelmektedir. Bununla birlikte, daha düşük baskı hızı ve kullanılan mürekkebin bazı gereksinimleri tam olarak karşılayamaması gibi dezavantajları vardır (Hörteis ve Glunz, 2008; Panek vd., 2017). Bir diğer umut verici metalizasyon tekniği olan şablon baskı tekniği (Hannebauer vd., 2015; Panek vd., 2017) yüksek verimli güneş hücreleri için uygun adaylardan biri olarak kabul edilir. Bakır elektroliz kaplamaya dayalı metalizasyon, malzeme maliyeti ve hücre performansı açısından mevcut serigrafi teknolojisine en iyi alternatif olarak görünmektedir. Bununla birlikte, sanayi ölçeğinde uygulanması hala birtakım engellerle sınırlıdır. Yapışma, arka zemin kaplama ve işlem karmaşıklığı gibi zorluklar belli bir ölçüde çözülmüştür, ancak uzun vadeli güvenilirlik sürdürülebilir üretim teknolojisinin önündeki en önemli engel olarak görünmektedir (Lee, 2014).

Tez çalışması kapsamında ön yüz metalizasyon işlemi için serigrafik baskı yöntemi ve arka yüz metalizasyon işlemi için PVD sıçratma yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca ön yüz metalizasyon için PVD yönteminin uygulaması yapılmış ve beşinci bölümde detayları ile verilmiştir.

4.2.1 Serigrafik baskı yöntemi

Serigrafik baskı teknolojisi, 1980'lerde güneş hücresi üretim endüstrisi tarafından benimsenmiş olmasına rağmen, standart ve olgun bir teknoloji haline gelmiş ve yıllar içinde sürekli olarak geliştirilmiştir (Beaucarne vd., 2015). Güneş hücresi üretiminde kullanılan metalizasyon yöntemleri içerisinde %85'den fazla kullanım oranıyla en yaygın

kullanılan metalizasyon yöntemi serigrafik baskı yöntemidir (Beaucarne vd., 2010). Hızlı, güvenilir ve basit bir yöntem olmasıyla güneş hücrelerinin seri üretiminde kullanım için en uygun yöntemdir. Son yıllarda, serigrafik baskı yöntemi, saatte 1500'den fazla güneş hücresinin üretimini mümkün kılacak şekilde geliştirilmiştir (Panek vd., 2017). Serigrafik baskı ekipmanları diğer yöntemlere göre daha az karmaşık ve daha dayanıklıdır.

Serigrafik baskı işleminde kullanılan çeşitli araçlar ve baskı işleminin mantığı Şekil 4.3'de görüldüğü gibidir. Serigrafik baskı cihazları temelde elek, çerçeve, rakle ve vakumlu tutucu elemanlarından oluşur. Bu araçların yardımıyla, tasarlanan metalizasyon dizaynları hücre üzerine basılabilmektedir. Elek, çerçeveler arasında gerilmiş iç içe geçmiş ince tel bir örgü ve baskı desenini tanımlayan organik emülsiyon tabakasından oluşur (Hilali, 2005). Şekil 4.4'de bu yapıdaki örgüler ve emülsiyon tabakasının SEM görüntüsü verilmiştir. Baskı işleminden önce hücre ve eleğin birbiri ile teması yoktur ve aralarında belirli bir mesafe vardır. Baskı işlemi sırasında rakle, eleğin yüzeyi boyunca hareket eder ve baskı işleminden hemen önce ekran üzerine sürülen metalik pastayı süpürür. Rakle bu hareket esnasında eleğe bir kuvvet uygulayıp (eleği hücre ile temasını sağlayacak kadar esnetip) Ag pastayı elek üzerindeki açıklıklardan geçmek için zorlar ve elek üzerindeki dizaynın hücre yüzeyinde oluşmasını sağlar. İşlem sırasında hücrenin bulunduğu konumdan kayması vakumlu tutucu sayesinde önlenir.

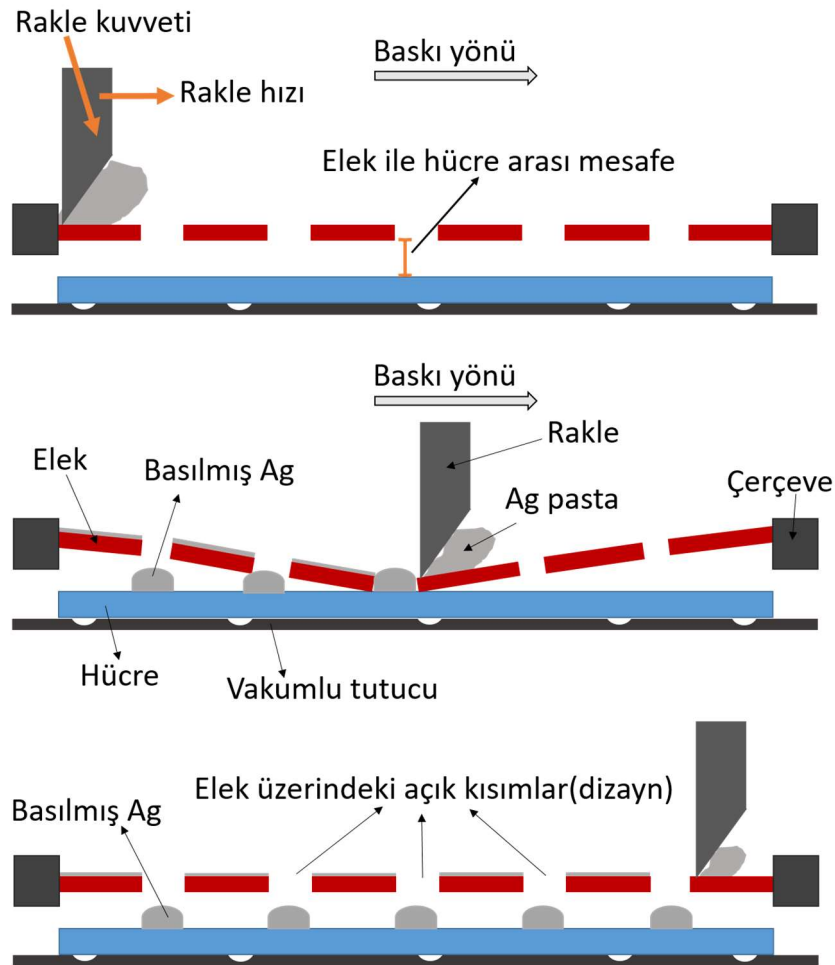
Serigrafik baskı cihazının bazı parametreleri baskı kalitesi üzerinde etkilidir ve bu parametrelerden en önemlileri aşağıda sıralandığı gibidir (Hilali, 2005; Mette, 2007);

-Snap-off mesafesi; baskı öncesi elek ile hücre arasındaki mesafeyi ifade eder. Çok küçük snap-off mesafeleri için macun ekrandan ayrılmayacaktır. Mesafe çok büyük olduğunda da, eleği hücreye doğru itmek için gereken rakle basıncı normalden fazla olacağı için eleğin gerilimi artacak ve dolayısıyla ömrü azaltacaktır.

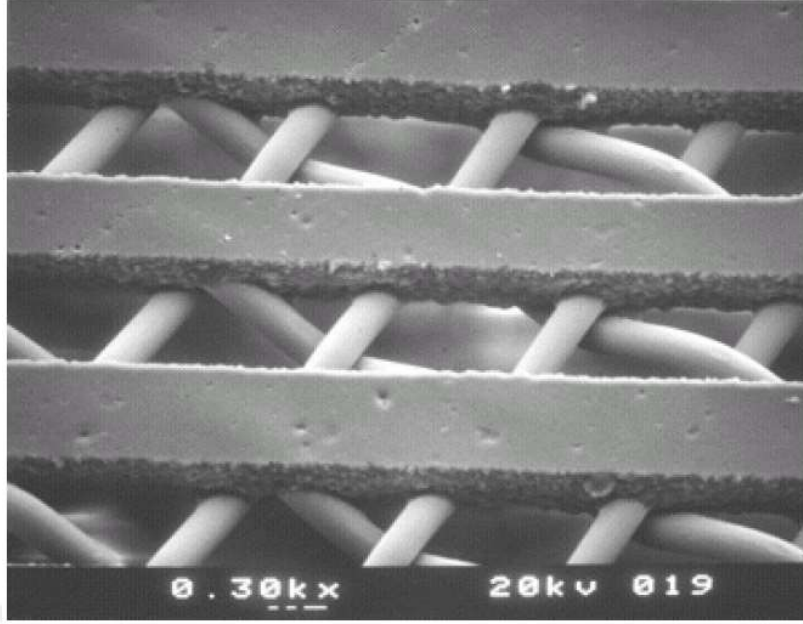
-Rakle kuvveti/basıncı; rakle, macunun ekran boyunca yayılması ve elek üzerindeki desenin hücre yüzeyine çıkması için ekran üzerine bir baskı uygular. Rakle uyguladığı kuvvetle, elek ve güneş hücresi yüzeyini macun transferine izin verecek kadar yakın temas içine getirir. Aynı zamanda hücre yüzeyinde fazla macun kalmamasını da sağlar. Uygulanan kuvvet rakle ve elek malzemesinin sertliğine ve geometrisine bağlı olarak

değişir. Rakle basıncının çok yüksek olmamasına dikkat edilmelidir. Çok yüksek basınçlar emülsiyon katmanının sıkıştırılmasına ve ekran ömrünün kısılmasına sebep olacağı gibi hücrenin kırılmasına neden olabilir. Diğer yandan, rakle basıncı çok düşük olduğunda, macun elek deliklerinde kalıp kuruyabilir ve bu da baskı sırasında elek açıklıklarının tıkanmasına neden olabilir.

-Rakle hızı; baskı işlemi sırasında ekran üzerinde hareket eden raklenin hızı da önemli bir parametredir. Baskı hızının seçimi, pasta reolojisine, elek kalınlığı gibi eleğin bazı özelliklerine, raklenin konumuna ve baskı dizaynına göre değişir. Rakle hızı, hücre üzerinde biriken macun miktarını da etkiler. Hız çok yüksekse, pastanın elektteki açıklıkları doldurmak için çok az zamanı vardır ve buda hatların süreksiz baskısına neden olabilir. Endüstriyel uygulamalarda yüksek seri üretim oranı için yüksek baskı hızı gereklidir. (Demircioğlu, 2012), yaptığı tez çalışmasıyla bu parametreleri detaylı olarak incelemiştir.

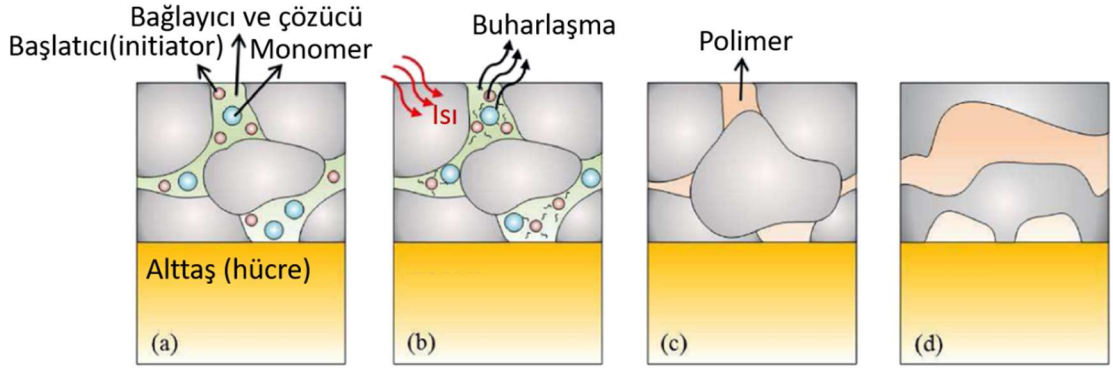


Şekil 4.3. Serigrafik baskı yöntemi



Şekil 4.4. Serigrafik baskı yönteminde kullanılan elektteki emülsiyon ve örgü yapısının SEM görüntüsü (Hilali, 2005)

Serigrafik baskı yönteminin en büyük dezavantajı kullanılan viskoz gümüş pastanın yüksek maliyetidir. Saf gümüş diğer tüm metaller içerisinde en yüksek elektriksel iletkenliğe ve en düşük temas direncine sahiptir (Haynes, 2014). Bundan dolayı pahalı ve değişken fiyatına rağmen macun malzemesi olarak gümüş kullanılmaktadır. İletkenlik değeri olarak gümüşe yakın değere sahip olan bakır alternatif olmaya en yakın metal gibi görünmektedir. Her ne kadar bakır içerikli gümüş pasta üretimi üzerine literatürde mevcut çalışmalar (Tokuhisa vd., 2011; Yoshida vd., 2012; Clement vd., 2013) olsa da bunlar hala gelişiminin ilk aşamalarındadır. Standart metalizasyon macunu metal tozları, cam hamuru (glass frit), çözücü ve uçucu olmayan polimerler veya reçine karışımından oluşmaktadır (Hilali, 2005). HIT güneş hücresinde düşük sıcaklık altında fırınlama gerekliliği olduğundan kullanılan macun farklılık gösterir ve cam hamurunun kullanılmadığı pastalar gereklidir (Khanna, 2015). Üçüncü bölümde değinildiği gibi TCO tabakası ile iyi bir yapışma, yüksek iletkenlik ve iyi bir temas oluşumu açısından düşük sıcaklıklar için üretilmiş pasta kullanımı gereklidir. Düşük sıcaklığa uygun Ag macun %30-95 gümüş tozu, %0,01-10 başlatıcı (initiator), %1-30 bağlayıcı madde, %2 çözücü ve %0-5 diğer maddelerin karışımından oluşur (Lee vd., 2014). Şekil 4.5 kullanılan macunun yapısını ve ayrıca 250 °C üstü sıcaklık uygulamanın neden olacağı sorunu göstermektedir.

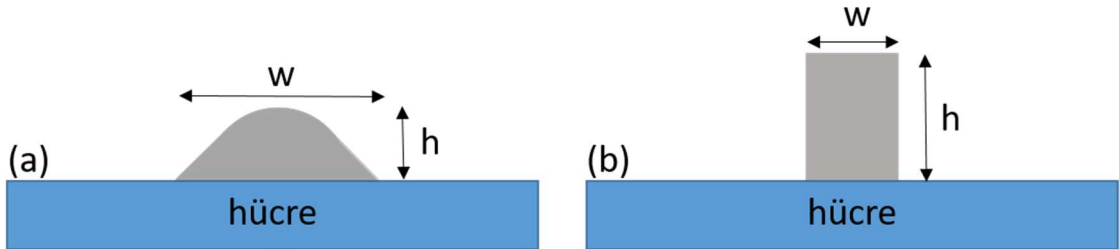


Şekil 4.5. Gümüş pasta bileşenleri (a) ısı ile buharlaşma (b) ideal şartlarda oluşacak yapı (c) aşırı ısının sebep olduğu polimerde bozukluk (d) (Lee vd., 2014)

Serigrafik baskı yöntemi ile üretilen finger genişliği tipik olarak 100 µm-150 µm genişliğindedir (Caballero, 2010; Drabczyk ve Panek, 2014). Ayrıca en-boy oranı (aspect ratio) önemli bir detaydır. En-boy oranı, fingerın yüksekliği ve genişliği arasındaki orandır ve Denklem (4.1) ile hesaplanabilir. Şekil 4.6 (a) düşük en boy oranını sahip bir finger kesitini gösterirken Şekil 4.6 (b) ideal en-boy oranını göstermektedir. Serigrafik baskı yönteminin bir diğer dezavantajı da baskı sonrası gümüş pastanın yanlara yayılması ile Şekil 4.6 (a)'ya benzer düşük en-boy oranına sahip finger üretilmesidir. Bu yüzden üretilen finger genişliği olabildiğince ince olmalıdır.

$$\text{En - boy oranı} = \frac{h}{w} \quad (4.1)$$

Burada w finger kesit alanının genişliğini ve h yüksekliğini göstermektedir.



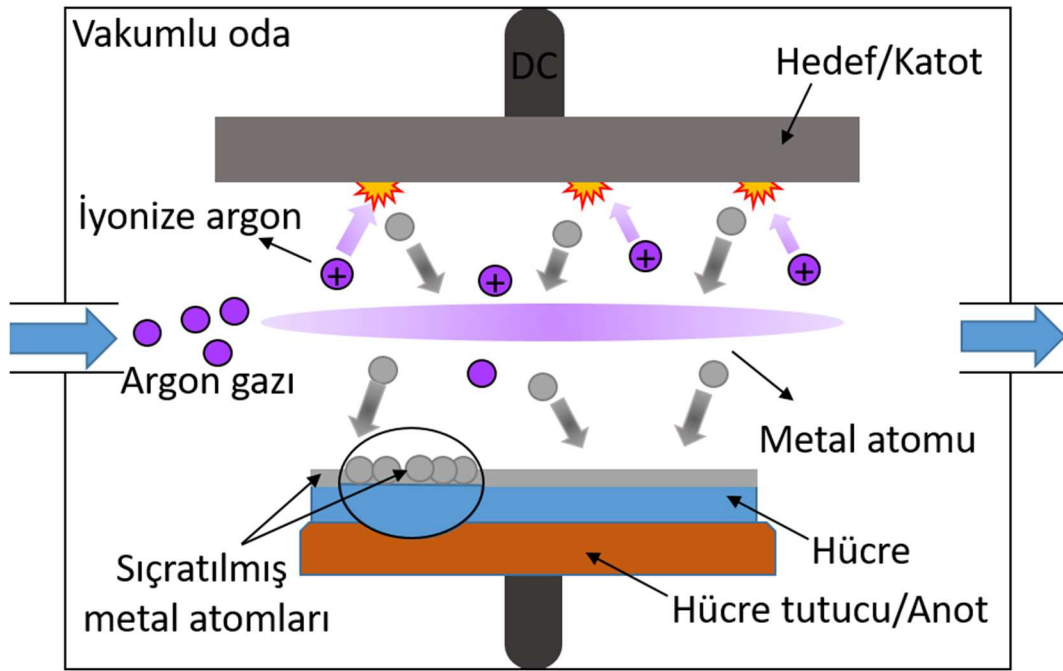
Şekil 4.6. Düşük en-boy oranına sahip metalizasyon (a) ve istenilen yüksek en-boy oranına sahip metalizasyon (b)

4.2.2 PVD sıçratma

Sıçratma (sputtering), bir fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD) metodudur. Kullanılacak hedef malzemesine göre doğru akım (DC) veya radyo frekansı (RF) ile sıçratma yapılabilir. Genellikle iletken/metal hedef malzemesi için DC, iletken olmayan hedef malzemesi içinde RF sıçratma işlemi kullanılır. Bu tez çalışması kapsamında arka yüzeyin metalizasyonunda kullanılan sıçratma işleminde de DC sıçratma kullanılacaktır. Sıçratma yönteminde kaplanmak istenen malzemenin buhar faza geçirilmesi ısı bir işlem yerine mekanik bir çarpışma ve moment transferi olmasından dolayı (Keleşoğlu, 2011) düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanımı yaygındır. Sıçratma tekniği, katı bir malzemenin yüzeyindeki atomların pozitif taşıyıcı iyonların bombardımanı ile koparılması olayıdır. Yüzey bombardımanı genellikle argon gibi ağır asal bir gazın iyonlarıyla gerçekleştirilir. İyon üretiminde kullanılan kaynak bir iyon huzmesi veya bir plazmadır (Keleşoğlu, 2011).

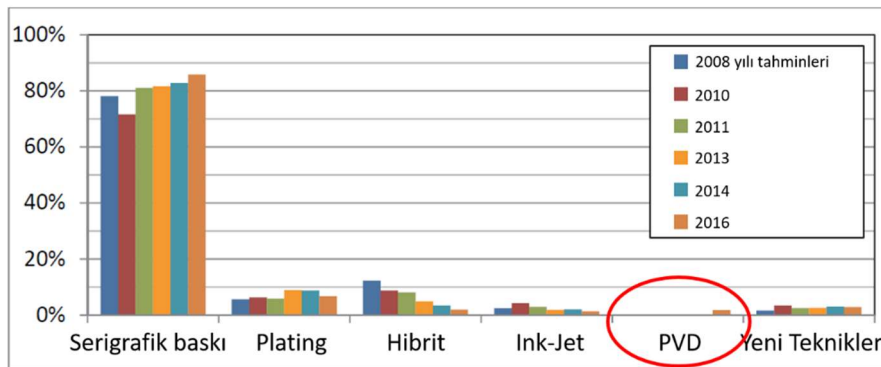
Şekil 4.7’de işlemin yapısı ve çalışma prensibi görülmektedir. İşlem oda atmosferindeki istenmeyen partikülleri gidermek için sıçratma odasının vakuma alınması ile başlar. Gerekli vakum seviyesine ulaşıldıktan sonra, odaya çalışma gazı akışı sağlanır (genellikle argon). Bu çalışma gazı kararlı bir plazmanın oluşturulmasına uygun bir basınçta olmalıdır. Sistemde iki adet düzlemsel elektrot mevcuttur. Bunlardan bir tanesi katot (hedef) diğeri anot (tutucu)’dur. Katodun ön yüzeyine hedef malzeme (katot hedef malzemenin kendisi de olabilir), anodun önünde kaplama yapılacak hücre konulur. Katoda negatif elektriksel potansiyel uygulanır ve böylelikle pozitif yüklü iyonlar hedef malzemesini bombardımana tutar. Doğrudan bir plazma elde etmenin yolu hedef malzemesini negatif elektrik yükü ile sistemin katodu haline getirmektir (Keleşoğlu, 2011). Bu gerilim ile ivmelendirilen iyonlar hedefe çarparak hedef malzemesinden atomların sıçratılmasını sağlar. Kapanmak istenilen malzeme/hücre yüzeyden sıçratılan malzeme/atom akısının yolu üzerine konumlandırılır ve böylece sıçratılan atomların hücre yüzeyinde birikmesi sağlanır.

HIT güneş hücrelerinde arka yüzün tamamen gümüş kaplanması işlemi genellikle PVD sıçratma metodu ile gerçekleştirilir. Tez kapsamında üretilen hücrelerin arka yüzün tamamen gümüş kaplanması suretiyle arka yüz metalizasyon işleminde PVD sıçratma yöntemi kullanılacaktır.



Şekil 4.7. Arka yüz metalizasyonunda kullanılan PVD sıçratma yöntemi

İlk olarak 2008 yılında ardından 2010, 2011, 2013, 2014 ve son olarak altıncısı 2016 yılında gerçekleştirilen (Beaucarne vd., 2016) metalizasyon konulu çalıştaylarda yakın gelecekte kullanılması beklenen metalizasyon yöntemlerinin tahminleri Şekil 4.8’de verildiği gibidir. Burada dikkat edilmesi gereken iki nokta serigrafik baskı yönteminin 2016 yılı tahminlerine göre yakın gelecekte yine pazarın dominant teknolojisi olacağı beklenirken bir diğeri ise diğer yıllardan farklı olarak ilk kez 2016 yılında PVD yönteminin ön yüz metalizasyonunda kullanılabileceği düşünülmüştür.



Şekil 4.8. Yakın gelecekte kullanılması beklenen yöntemler (Schubert vd., 2016)

Bu tez çalışması kapsamında da PVD’nin ön yüz metalizasyonda kullanımı 5. bölüm olan deneysel kısımda anlatılmıştır.

4.3 Seri Direnç Bileşenlerinin Modellenmesi ve Metalizasyon Optimizasyonu

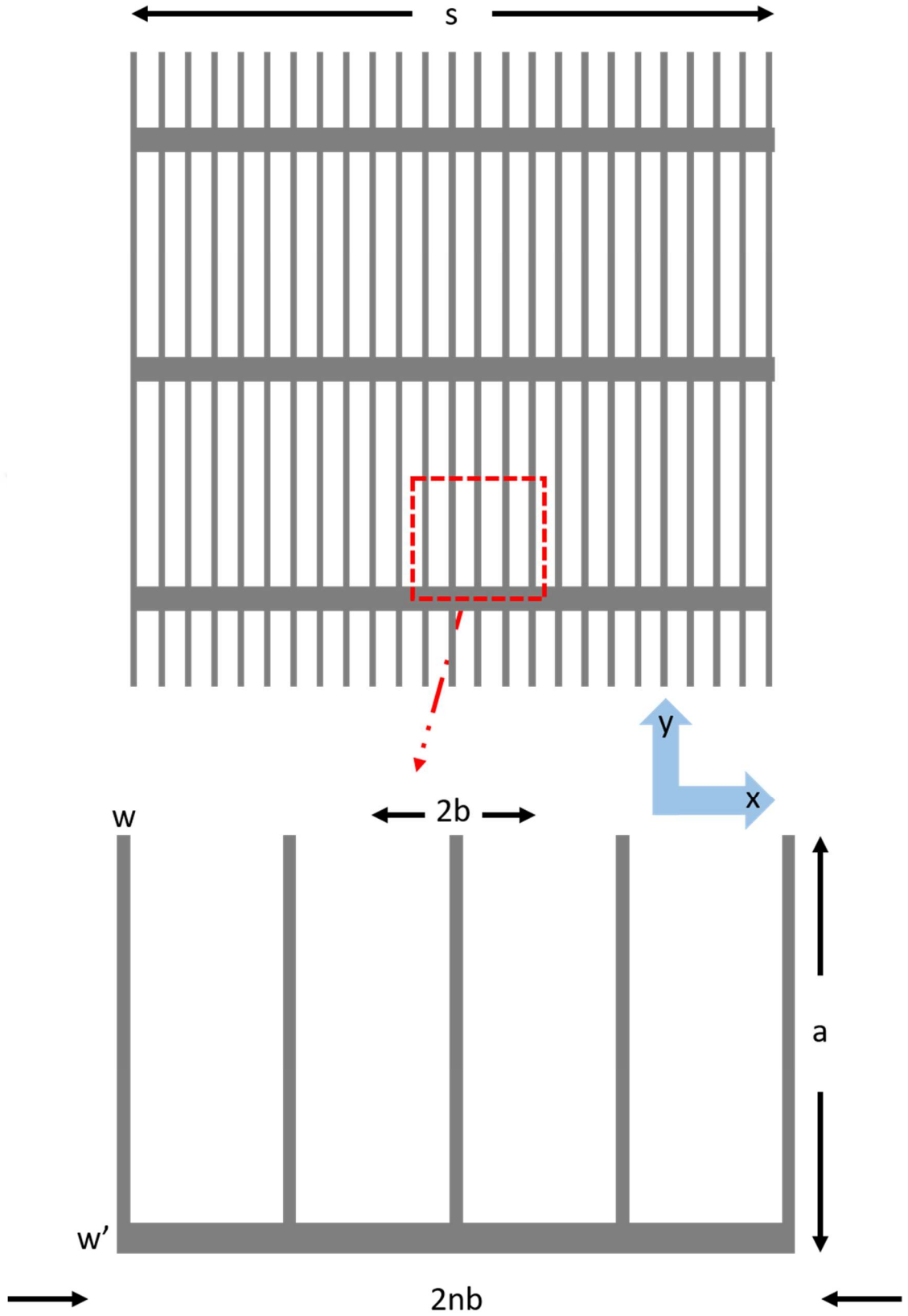
Daha öncede belirtildiği gibi seri direnç bileşenleri ve ön yüz metalizasyonun sebep olduğu gölgeleme güç kaybına neden olur. Bu kısımda gölgeleme ve seri direnç etkilerinin hücre performansına (güç kayıplarına) etkileri incelenecek ve her iki kaybın dengelendiği bir dizayn için metalizasyon optimizasyonu yapılacaktır. Bu kısımda kullanılan yöntem ve hesaplamalarda Daniel Meier'in farklı yıllarda yaptığı çalışmalardan (Meier ve Schroder, 1984; Meier vd., 2006; Meier vd., 2013) faydalanılmıştır.

Şekil 4.9'da görülen birim hücre yardımıyla optimizasyon işlemi yapılabilmektedir. Şekilde görüleceği gibi 'a' birim hücre uzunluğunu ve '2nb' birim hücre genişliğini göstermektedir. 'a' değerinin belirlenmesinde tam hücre uzunluğu ve hücredeki busbar sayısı etkilidir. 'a' değerinin hesaplanmasında kullanılan denklem aşağıda verildiği gibidir;

$$a = \frac{s}{2 \cdot n_{bb}} \quad (4.2)$$

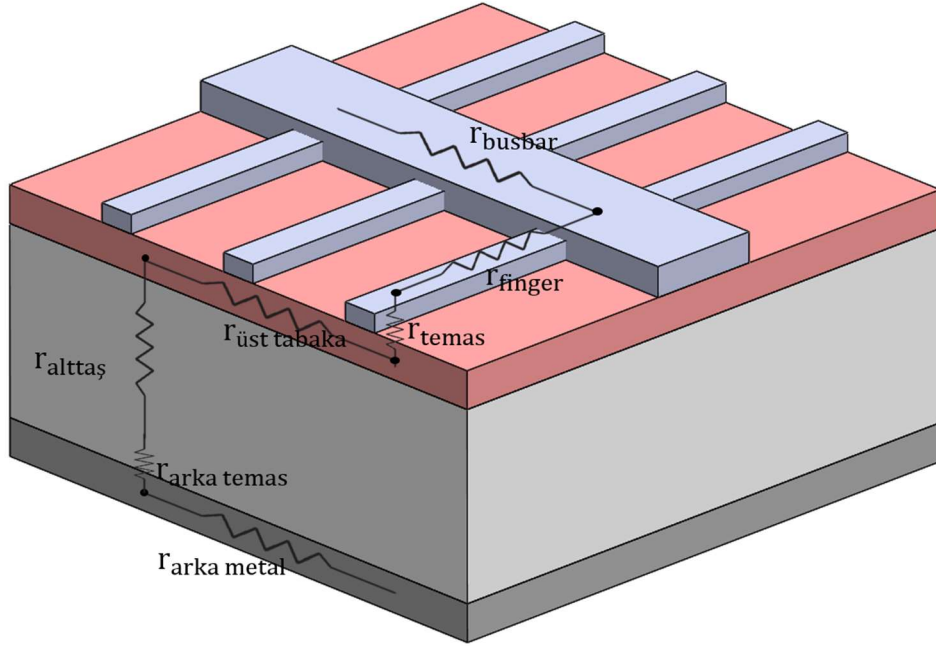
burada s tam hücre uzunluğunu, n_{bb} ise hücredeki busbar sayısını göstermektedir.

Birim hücre genişliğinin (2nb) belirlenmesinde genellikle I-V ölçüm cihazlarının akım toplama problemleri arasındaki standart uzunluk olan 1cm-1,3 cm aralığı kullanılır. Ayrıca Şekil 4.9'da gösterilen 2b fingerlar arası mesafeyi (merkezden), n birim hücredeki finger sayısını, w finger genişliğini, w' ise busbar genişliğinin yarısını ifade etmektedir. X eksenini busbar doğrultusunda uzanırken, y eksenini finger boyunca uzanır.



Şekil 4.9. Metalizasyon optimizasyonunda kullanılan birim hücre yönteminin şematik gösterimi

Seri direnci oluşturan her bir elemanın (Şekil 4.10) direnç değerini ve her bir seri direnç ifadesinin güç kaybı üzerindeki etkisini aşağıda sıralanan denklemlerle hesaplamak mümkündür. İfadeler tam hücre için üretilecek olup ‘2nab’ alanına bölme ile normalleştirilmiş değerler elde edilecektir.



Şekil 4.10. Bir güneş hücresindeki seri direnç bileşenleri

- Fingerların etkisi;

Hücrede üretilen akım finger tarafından toplanır ve fingerlar boyunca y-ekseninde busbar’a doğru ilerler. Fingerlar boyunca akım akışı esnasında oluşan güç kaybı;

$$P_{\text{finger}} = n \int_0^a I^2(y) dR_f \quad (4.3)$$

ile tanımlanır ve burada geçen fingerın çok küçük bir kesitinin direnci olan dR_f ve y konumundaki fingerda toplanan akım olan $I(y)$ ifadeleri aşağıda sıralandığı gibidir;

$$dR_f = \rho_f / (A_f) dy = \rho_f / (w \cdot t_f) dy \quad (4.4)$$

ve

$$I(y) = 2 \int_a^y J_L b \, dy' = 2J_L b(y - a) \quad (4.5)$$

Denklem (4.4) ve (4.5), Denklem (4.3)'de yerine konulduğunda;

$$P_{\text{finger}} = \frac{4}{3} \cdot J_L^2 \cdot n \cdot a^3 \cdot b^2 \cdot \rho_f / (w \cdot t_f) \quad (4.6)$$

elde edilir ve finger sebebiyle olan güç kaybını tanımlar. Burada ρ_f finger malzemesinin öz direnci, t_f finger kalınlığı, J_L foto akım yoğunluğunu ifade eder. Denklem (4.6)'dan finger sebebiyle olan direnç değerini bulmak için, ifadenin $J_L^2 \cdot (2 \cdot n \cdot a \cdot b)$ ile bölünmesiyle, fingerdaki seri direnç ($r_{s(\text{finger})}$) değerinin hesaplanmasında kullanılan Denklem (4.7) elde edilir.

$$r_{s(\text{finger})} = \frac{2}{3} \cdot a^2 \cdot b \cdot \rho_f / (w \cdot t_f) \quad (4.7)$$

Denklem (4.7)'de geçen finger öz direnci (ρ_f), finger genişliği (w) ve finger kalınlığı (t_f) değerleri tüm hücre boyunca tekdüze (uniform) olamayabilir. Bu yüzden $\rho_f / (w \cdot t_f)$ ifadesi ile eşdeğerde olan bir ifade kullanımı ile hesaplamalar kolaylaştırılabilir. Bu noktada iki busbar arasında busbarlar ile bağlantısı olan tüm fingerların (n_{gl}) paralel direncinden ve iki busbar arası mesafeden ($2a$) yararlanılmasıyla türetilen BBR (busbardan busbara direnç) ifadesi kullanılabilir. BBR ifadesi Denklem (4.8)'de gösterildiği gibidir;

$$BBR = (\rho_f / (w \cdot t_f)) \cdot (2a / n_{gl}) \quad (4.8)$$

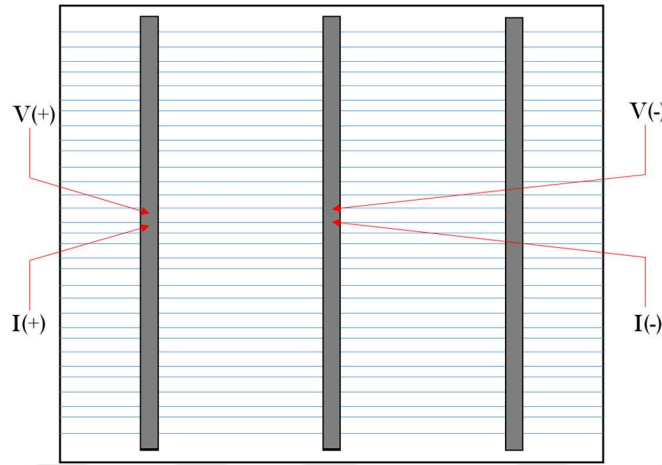
Burada $\rho_f / (w \cdot t_f)$ ifadesi;

$$\rho_f / (w \cdot t_f) = (n_{gl} / 2a) \cdot BBR \quad (4.9)$$

olarak elde edilir ve Denklem (4.7)'ye alternatif olarak Denklem (4.10) elde edilir;

$$r_{s \text{ (finger)}} = \frac{2}{3} \cdot a^2 \cdot b \cdot \rho_f / (w \cdot t_f) = \frac{1}{3} \cdot a \cdot b \cdot n_{gl} \cdot BBR \quad (4.10)$$

Şekil 4.11’de gösterildiği gibi BBR ölçümü, dört nokta ölçüm yöntemi ile V(+) ve I(+) problemlerinin V(-) ve I(-) problemleri ile karşılıklı olarak şekilde gösterildiği gibi konumlandırılması ile gerçekleştirilmiştir. Akım değerinin 10 mA değerine ayarlanması ile referans hücrenin BBR değeri için ekranda 0,058 Ω direnç değeri okunmuştur.



Şekil 4.11. BBR değerinin ölçülmesi

- Busbarların etkisi;

Fingerlar tarafından toplanan akım busbarlara iletilir ve busbar boyunca akar. Akımın sürekli olarak busbara aktığı varsayılarak busbar üzerinden akım akışı esnasında oluşan güç kaybı;

$$P_{\text{busbar}} = 2 \int_0^{nb} I_b^2(x) dR_b \quad (4.11)$$

ile tanımlanır ve burada geçen dR_b ve $I_b(x)$ ifadesi aşağıda sıralandığı gibidir;

$$dR_b = \rho_b / (w' \cdot t_b) dx \quad (4.12)$$

ve

$$I_b(x) = \int_{nb}^x J_L a \, dx' = J_L a(x - nb) \quad (4.13)$$

Denklem (4.12) ve (4.13), Denklem (4.11)'de yerine konulduğunda;

$$P_{busbar} = \frac{2}{3} \cdot J_L^2 \cdot n^3 \cdot a^2 \cdot b^3 \cdot \rho_b / (w' \cdot t_b) \quad (4.14)$$

elde edilir ve busbar sebebiyle olan güç kaybını gösterir. Burada ρ_b busbar malzemesinin öz direnci, t_b busbar kalınlığını ifade eder. Denklem (4.14)'den busbar sebebiyle olan direnç değerini bulmak için ifadenin $J_L^2 \cdot (2 \cdot n \cdot a \cdot b)$ ile bölünmesiyle busbardaki seri direnç (r_s (busbar)) değerinin hesaplanmasında kullanılan denklem elde edilir.

$$r_s \text{ (busbar)} = \frac{1}{3} \cdot n^2 \cdot a \cdot b^2 \cdot \rho_b / (w' \cdot t_b) \quad (4.15)$$

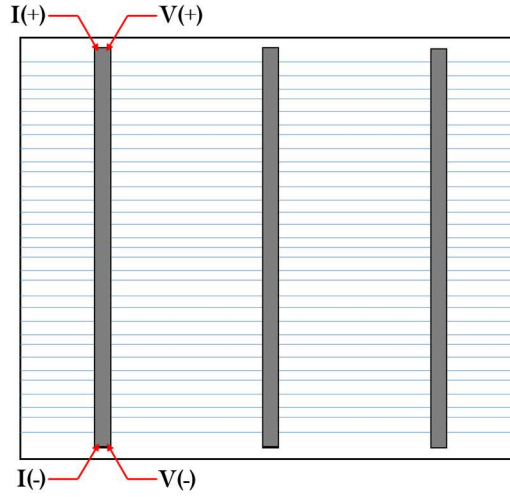
Denklem (4.15)'de geçen busbar öz direnci (ρ_b), busbar genişliği (w') ve busbar kalınlığı (t_b) değerleri tıpkı fingerda bahsedildiği gibi tüm hücre boyunca tekdüze olamayabilir. Bu yüzden $\rho_b / (w' \cdot t_b)$ ile eşdeğerde olan bir ifade kullanımı ile hesaplamalar kolaylaştırılabilir. Bu amaçla dört nokta ölçüm yöntemi ile kolayca ölçülebilecek R_{bus} (boydan boya busbar direnci) ve busbar uzunluğundan (s_b) oluşan eş değer ifade Denklem (4.16)'da verildiği gibidir;

$$\rho_b / (w' \cdot t_b) = \left(\frac{2 \cdot R_{bus}}{s_b} \right) \quad (4.16)$$

Burada tam hücredeki busbar kalınlığının birim hücredeki busbarın iki katı olması nedeniyle iki ile çarpıldığı görülmektedir. Denklem (4.17), Denklem (4.15)'e alternatif olarak kullanılabilir ve şöyledir;

$$r_s \text{ (busbar)} = \frac{1}{3} \cdot n^2 \cdot a \cdot b^2 \cdot \rho_b / (w' \cdot t_b) = \frac{1}{3} \cdot a \cdot n^2 \cdot b^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot R_{bus}}{s_b} \right) \quad (4.17)$$

Şekil 4.12’de R_{bus} değeri ölçümünün şematik gösterimi verilmiştir. R_{bus} değeri dört nokta ölçüm cihazının $V(+)$ ve $I(+)$ problemleri ile $V(-)$ ve $I(-)$ problemlerinin şekilde gösterildiği gibi busbarın iki ucuna karşılıklı olarak konumlandırılması ile ölçülmüştür. Referans hücre için akım değerinin 10 mA değerine ayarlanması ile ekranda 0,162 Ω direnç değeri okunmuştur.



Şekil 4.12. R_{bus} değerinin ölçülmesi

Denklem (4.17)’de geçen n^2 ifadesi yerine $(n+1).(n+2)$ ifadesi kullanımı ile çok daha doğru sonuçlar alınabilir (Meier vd., 2006). Bu amaçla Denklem (4.18) bu çalışma kapsamında busbar sebebiyle olan direnç değerlerinin dolayısıyla güç kayıplarının hesaplanmasında kullanılacak denklem olacaktır.

$$r_s (\text{busbar}) = \frac{1}{3} \cdot a \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) \cdot b^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot R_{bus}}{s_b} \right) \quad (4.18)$$

- Üst tabakanın levha direncinin etkisi (üst yüzey direncinin etkisi);

Akımın üst tabakadan x ekseninde fingerlara ulaşmaya kadarki yolculuğunda levha (sheet) direnci etkisiyle oluşan güç kaybı;

$$P_{\text{üst tabaka-sheet}} = 2n \int_0^b I^2(x) dR \quad (4.19)$$

ile tanımlanır ve burada geçen dR ve $I(x)$ ifadesi aşağıda sıralandığı gibidir;

$$dR = R_{sheet} \cdot dx/a \quad (4.20)$$

ve

$$I(x) = \int_x^b J_L a \, dx = J_L a (b - x) \quad (4.21)$$

Denklem (4.20) ve (4.21), Denklem (4.19)'da yerine konulduğunda;

$$P_{üst \, tabaka} = \frac{2}{3} \cdot J_L^2 \cdot n \cdot a \cdot b^3 \cdot R_{sheet} \quad (4.22)$$

elde edilir ve üst tabakanın levha direnci sebebiyle olan güç kaybını gösterir. Burada R_{sheet} üst tabakanın levha direncini ifade eder ve Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de gösterildiği gibi elde edilebilir. Denklem (4.22)'den üst tabaka levha direnci sebebiyle olan direnç değerini bulmak için ifadenin $J_L^2 \cdot (2 \cdot n \cdot a \cdot b)$ ile bölünmesiyle üst tabakadaki seri direnç (r_s (üst tabaka)) değerinin hesaplanmasında kullanılan denklem elde edilir.

$$r_s \text{ (üst tabaka)} = \frac{1}{3} \cdot b^2 \cdot R_{sheet} \quad (4.23)$$

- Üst yüzey ile metal arasındaki temas;

Hücre yüzeyi ile metalizasyonun temas ettiği noktada akımın üst tabakadan metale geçişi esnasında kaybolması ile ilgili güç kaybı aşağıdaki denklem ile ifade edilir;

$$P_{temas} = 2n I^2 R_c \quad (4.24)$$

burada geçen I ve R_c ifadeleri aşağıda sıralandığı gibidir;

$$I = J_L a b \quad (4.25)$$

ve

$$R_c = (\rho_c R_s)^{\frac{1}{2}}/a \quad (4.26)$$

Denklem (4.25) ve (4.26), Denklem (4.24)'de yerine konulduğunda;

$$P_{\text{temas}} = 2 \cdot J_L^2 \cdot (\rho_c \cdot R_s)^{\frac{1}{2}} \cdot n \cdot a \cdot b^2 \quad (4.27)$$

elde edilir ve üst yüzey ile metalizasyonun temas noktasındaki güç kaybını gösterir. Burada ρ_c temas öz direncini ve R_{sheet} üst yüzey levha direncini ifade eder. Denklem (4.27)'den temas sebebiyle olan direnç değerini bulmak için ifadenin $J_L^2 \cdot (2 \cdot n \cdot a \cdot b)$ ile bölünmesiyle bir diğer seri direnç bileşeni olan temas direnci ($r_{s(\text{temas})}$) değerinin hesaplanmasında kullanılan Denklem (4.28) elde edilir.

$$r_{s(\text{temas})} = (\rho_c \cdot R_s)^{\frac{1}{2}} \cdot b \quad (4.28)$$

Ayrıca Denklem (4.28)'e alternatif olarak kullanılabilecek Denklem (4.29) finger genişliğinin fonksiyonu cinsinden olması sebebiyle bu çalışmada temas direncinin hesaplanmasında kullanılacak olan denklemdir.

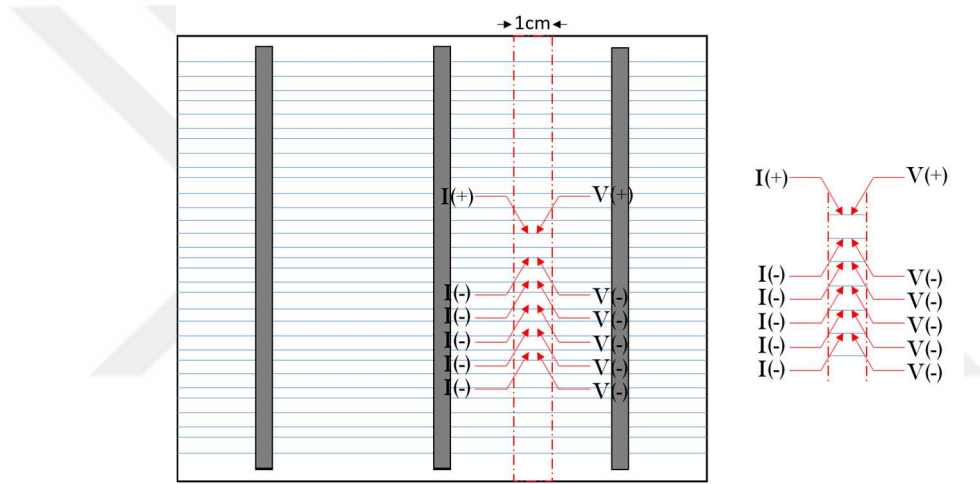
$$r_{s(\text{temas})} = \rho_c / f = \rho_c / (w/2b) \quad (4.29)$$

Burada f fingerlar ile kaplı fraksiyonel alanı ifade eder ve denklemde de görülebileceği gibi $w/2b$ 'ye eşittir.

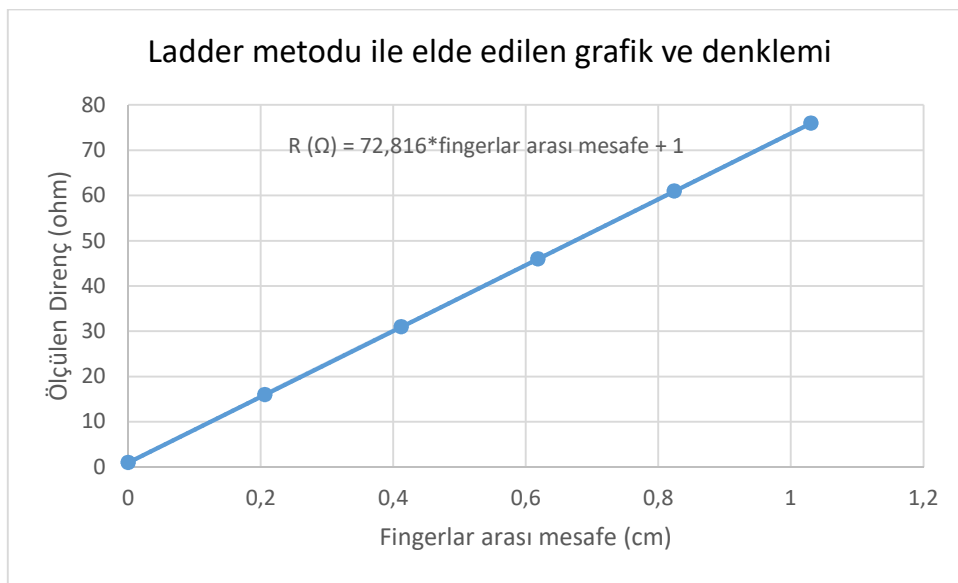
Denklem (4.29)'da görüldüğü gibi temas direncinin hesaplanması için öncelikle temas öz direncinin belirlenmesi gerekmektedir. Temas öz direncinin ölçülmesi Şekil 4.13'de gösterilen yöntem ile elde edilen veriler doğrultusunda Şekil 4.14'de verilen grafik denklemden alınan kesim noktası değerinin aşağıdaki denkleme yazılması ile elde edilir;

$$\rho_c = \frac{1}{2} \cdot (\text{kesim noktası}) \cdot w \cdot w_{\text{ölçüm numunesi genişliği}} \quad (4.30)$$

Şekil 4.13’de şematik gösterimi verilen yöntemin uygulanması için hücreden elmas kesici veya lazer kesim ile 1 cm genişliğinde bir test hücresi kesilir. I(+) ve V(+) problemleri referans olarak sabit kalırken I(-) ve V(-) problemleri şekilde görüldüğü sırası ile takip eden finger üzerine karşılıklı konumlandırılır ve direnç değerleri ölçülür. Her bir adımda ölçülen direnç değerleri kaydedilir ve Şekil 4.14’de verilen grafiğin elde edilmesinde kullanılır. Şekil 4.14’de fingerlar arası mesafeye göre alınan 5 değer oluşturduğu grafik ve fonksiyonu görülmektedir. Doğrunun eğimi direkt olarak R_{sheet} değerini ifade ederken, kesim noktası (intercept) Denklem (4.30)’da verildiği gibi ρ_c değerinin hesaplanmasında kullanılır. Referans hücreden alınan ölçümler sonucu R_{sheet} değeri $72,816 \Omega/\square$ ve ρ_c değeri $0,0045 \Omega.cm$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.13. R_{sheet} ve ρ_c değerinin ölçümünde kullanılan yöntemin şematik gösterimi



Şekil 4.14. Levha direnci ve temas direncinin hesaplanmasında kullanılan ladder (merdiven) metodu grafiği

- Alttaşın etkisi;

Alttaştaki akım akışı esnasında, alttaş kalınlığına bağlı olarak oluşacak güç kaybı;

$$P_{\text{alttaş}} = I^2 \cdot R_{\text{alttaş}} = 2 \cdot J_L^2 \cdot n \cdot a \cdot b \cdot \rho_w \cdot t_w \quad (4.31)$$

ile belirlenir ve Denklem (4.31)'den alttaş sebebiyle olan direnç değerini bulmak için ifade $J_L^2 \cdot (2 \cdot n \cdot a \cdot b)$ 'ye bölünmesiyle alttaş kaynaklı seri direnç ($r_{(s) \text{ alttaş}}$) değerinin hesaplanmasında kullanılan denklem elde edilir;

$$r_{(s) \text{ alttaş}} = \rho_w \cdot t_w \quad (4.32)$$

Burada ρ_w alttaş öz direnci iken t_w alttaş kalınlığıdır.

Yukarıda elde edilen beş temel seri direnç denkleminin toplanması ile Denklem (4.33)'de gösterildiği gibi toplam seri direnç elde edilebilir;

$$r_s (\text{toplam}) = r_s (\text{finger}) + r_s (\text{busbar}) + r_s (\text{üst tabaka}) + r_s (\text{temas}) + r_{(s) \text{ alttaş}} \quad (4.33)$$

Denklem (4.33) hesaplanırken Şekil 4.10'da verilen arka metalizasyonun levha direnci sebebiyle ve arka metalizasyona temas sebebiyle olan seri direnç bileşenleri arka yüzeyin tamamı gümüş kaplanacağından dolayı (Meier ve Schroder, 1984) ihmal edilmiştir.

Seri direnç sebebiyle oluşacak toplam güç kaybı;

$$P_{\text{seri direnç}} = J_L^2 \cdot r_s (\text{toplam}) \quad (4.34)$$

veya

$$P_{\text{seri direnç}} = P_{\text{finger}} + P_{\text{busbar}} + P_{\text{üst tabaka}} + P_{\text{temas}} + P_{\text{alttaş}} \quad (4.35)$$

ile ifade edilir.

Seri direnç etkisinin belirlenmesinin ardından gölgeleme sebebiyle oluşacak güç kaybı ifadesi;

$$P_{\text{gölgeleme}} = P_L \cdot \eta \left(\frac{w}{2b} + \frac{w'}{a} \right) \quad (4.36)$$

ile hesaplanabilir. Burada geçen P_L gelen güç iken η hücre verim değeridir.

Hücredeki toplam güç kaybı ise;

$$P_{\text{toplam}} = P_{\text{seri direnç}} + P_{\text{gölgeleme}} \quad (4.37)$$

ile hesaplanır.

Optimizasyonda kullanılacak denklemlerin elde edilmesinin ardından hesaplamalara geçilmiştir. İlk etapta kullanılacak finger genişliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Finger genişliğinin belirlenmesinin ardından fingerlar arası mesafenin ve finger sayısının belirlenmesi için hesaplamalar yapılmıştır. Son olarak da hücrede kullanılacak busbar sayısının ve busbar genişliğinin belirlenmesi ile optimizasyon işlemi tamamlanmıştır. Optimizasyon işlemine başlamadan önce bir referans hücrenin değerlerinin alınması gereklidir ve Çizelge 4.1 optimizasyon işleminde kullanılacak referans hücre parametrelerini ve değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.1. Hesaplamalarda kullanılan referans hücre parametreleri

Parametreler	Tanım	Değer	Birim
s	Hücre uzunluğu	15,6	cm
n_{bb}	Busbar sayısı	3	
a	Birim hücre uzunluğu	2,6	cm
2b	Fingerlar arası mesafe (merkezden)	0,206	cm
n	Birim hücredeki finger sayısı	5	
n_{gl}	Toplam finger sayısı	75	
w	Finger genişliği	0,009	cm
w'	Busbar genişliğinin yarısı	0,065	cm
2w'	Busbar genişliği	0,13	cm
ρ_w	Altaş öz direnci	3	$\Omega \cdot \text{cm}$
t_w	Altaş kalınlığı	0,018	cm
R_{bus}	Ölçülen busbar direnci	0,162	Ω
R_{sheet}	Ölçülen üst yüzey levha direnci	72,82	$\Omega/\square$
BBR	Ölçülen iki busbar arası direnç	0,058	Ω
$R_{sheet-metal}$	Ölçülen arka yüzey metal levha direnci	0,0883	$\Omega/\square$
ρ_c	Ölçülen temas öz direnci	0,0045	$\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$
I_{sc}	Ref. hücre kısa devre akım yoğunluğu	0,037099	A/cm^2
V_{oc}	Referans hücrenin açık devre gerilimi	0,6944	V
I_{mp}	Referans hücrenin maksimum noktadaki akım değeri	7,927	A
V_{mp}	Referans hücrenin maksimum noktadaki gerilim değeri	0,5366	V
FF	Referans hücrenin dolum faktörü	0,6910	
n	Referans hücrenin verimi	17,797	%
A	Hücre alanı	238,95	cm^2

Serigrafik baskı yöntemiyle gerçekleştirilen ön yüz metalizasyon işleminde finger genişliği yaygın olarak 90-150 mikron aralığındadır (Caballero, 2010; Drabczyk ve Panek, 2014). Finger genişliğinin olabildiğince ince olması hem maliyet açısından hemde

gölgeleme kayıpları açısından istenilen bir durumdur. Bunun yanında finger genişliğinin azalması seri direnç değerinin artmasına sebep olacaktır. Bu nedenle ilk etapta yapılacak olan optimizasyon işleminin amacı 90-150 mikron aralığındaki finger genişliği için seri direnç ve gölgeleme sebebiyle oluşacak güç kayıplarının belirlenmesi ve bu iki kaybın toplam etkisinin en az olduğu finger genişliğinin dizayn için seçilmesi olacaktır.

Yapılan hesaplamalar ile elde edilen seri direnç ve gölgeleme sebebiyle oluşacak güç kayıpları ve her iki kaybın toplamı ile elde edilen toplam güç kaybı değerleri Çizelge 4.2’de verildiği gibidir. Ayrıca Çizelge 4.2’de verilen değerlerin kullanılması ile elde edilen Şekil 4.15 finger genişliğinin değişimine göre seri direnç ve gölgeleme kayıplarının değişimini gösterirken Şekil 4.16 her iki kaybın toplam etkilerinin finger genişliğine göre değişimini gösteren grafiklerdir.

Çizelge 4.2. 90-150 mikron aralığındaki finger genişlikleri için toplam güç kaybı değişimi

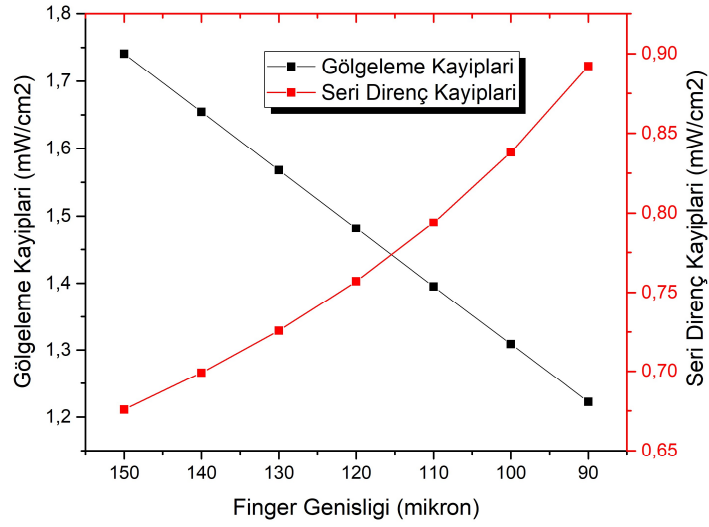
Finger genişliği (mikron)	Toplam Seri direnç ($\Omega.cm$)	Gölgeleme (%)	Seri direnç güç kaybı (mW/cm^2)	Gölgeleme güç kaybı (mW/cm^2)	Toplam güç kaybı (mW/cm^2)
90	0,811	6,869	0,892	1,222	2,115
100	0,762	7,354	0,838	1,309	2,147
110	0,722	7,840	0,794	1,395	2,189
120	0,688	8,325	0,757	1,482	2,239
130	0,660	8,811	0,726	1,568	2,294
140	0,635	9,296	0,699	1,654	2,353
150	0,614	9,782	0,676	1,741	2,417

*Fingerlar arası mesafe için sabit değer alınmıştır.

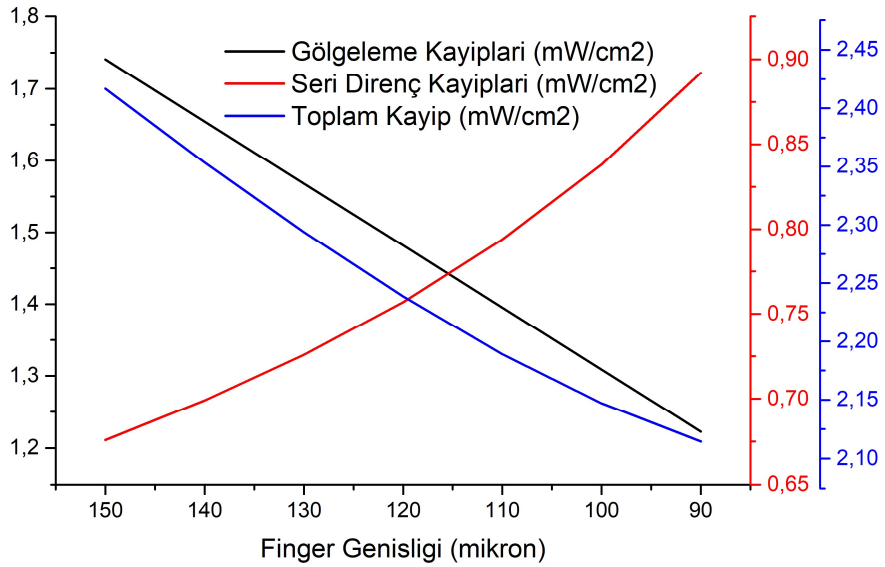
*Toplam seri direnç bileşenlerinin belirlenmesinde beş temel seri direnç ifadesinin toplamı kullanılmıştır.

Şekil 4.15’de finger genişliğinin azalması ile gölgeleme kayıplarının azaldığı ve tersi bir eğilimle seri direnç kayıplarının arttığı görülmektedir. Yalnızca seri direnç veya gölgeleme etkisine göre karar verilemeyeceğinden bu iki kaybın toplam etkisinin en az olduğu finger genişliğinin belirlenmesi gereklidir. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.16 görüldüğü

gibi 90-150 mikron aralığında her iki kaybın toplam etkisinin en az olduğu finger genişliği 90 mikron'dur.



Şekil 4.15. 90-150 mikron aralığı için finger genişliğine göre gölgeleme ve seri direnç kayıplarının değişimi



Şekil 4.16. 90-150 mikron aralığı için finger genişliğine göre toplam güç kaybının değişimi

Finger genişliğinin 90 mikron olarak belirlenmesinin ardından yapılacak olan optimizasyon işlemi fingerlar arası mesafenin saptanması dolayısıyla hücrede kullanılacak finger sayısının belirlenmesi olacaktır.

Finger genişliğinin sabit tutulduğu (0,009 cm) 3 busbarlı bir dizayn için 30-130 adet finger sayısı aralığında her bir seri direnç değeri, toplam seri direnç değeri, gölgeleme değeri ve seri direnç + gölgeleme sebebiyle oluşan toplam güç kaybı değerlerinin değişimi Çizelge 4.3’de verildiği gibi hesaplanmıştır.

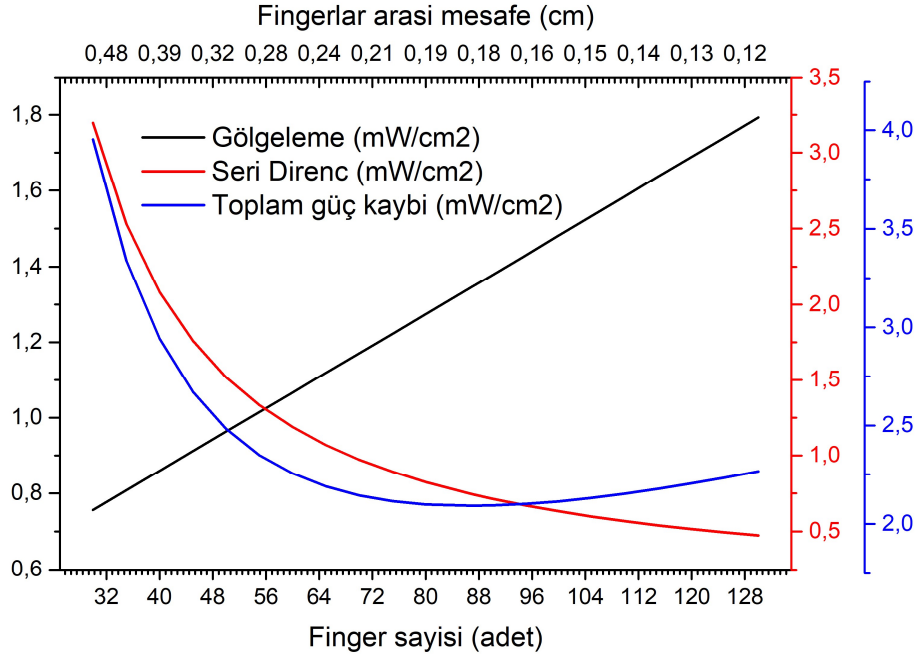
Çizelge 4.3. Fingerlar arası mesafe ve finger sayısının değişimine göre hesaplanan değerler

Finger mesafe (cm)	Finger sayısı	r_{finger}	r_{busbar}	$r_{üsttabaka}$	r_{temas}	$r_{alttaş}$	$r_{Toplam} (\Omega.cm)$	Gölgeleme (%)	Toplam güç kaybı (mW/cm ²)
0,515	30	0,9708	0,0143	1,6094	0,2575	0,054	2,9060	4,25	3,9532
0,441	35	0,8321	0,0127	1,1824	0,2207	0,054	2,3019	4,54	3,3404
0,386	40	0,7281	0,0115	0,9053	0,1931	0,054	1,8920	4,83	2,9413
0,343	45	0,6472	0,0106	0,7153	0,1717	0,054	1,5987	5,12	2,6705
0,309	50	0,5825	0,0099	0,5794	0,1545	0,054	1,3803	5,41	2,4819
0,281	55	0,5295	0,0094	0,4788	0,1405	0,054	1,2122	5,70	2,3488
0,258	60	0,4854	0,0090	0,4023	0,1288	0,054	1,0794	6,00	2,2546
0,238	65	0,4481	0,0086	0,3428	0,1188	0,054	0,9723	6,29	2,1886
0,221	70	0,4160	0,0083	0,2956	0,1104	0,054	0,8843	6,58	2,1436
0,206	75	0,3883	0,0080	0,2575	0,1030	0,054	0,8108	6,87	2,1146
0,193	80	0,3640	0,0078	0,2263	0,0966	0,054	0,7487	7,16	2,0981
0,182	85	0,3426	0,0076	0,2005	0,0909	0,054	0,6956	7,45	2,0915
0,178	87	0,3348	0,0075	0,1914	0,0888	0,054	0,6764	7,57	2,0911
0,172	90	0,3236	0,0074	0,1788	0,0858	0,054	0,6497	7,74	2,0928
0,163	95	0,3066	0,0073	0,1605	0,0813	0,054	0,6096	8,03	2,1006
0,155	100	0,2912	0,0071	0,1448	0,0773	0,054	0,5745	8,33	2,1137
0,147	105	0,2774	0,0070	0,1314	0,0736	0,054	0,5433	8,62	2,1313
0,140	110	0,2648	0,0069	0,1197	0,0702	0,054	0,5156	8,91	2,1526
0,134	115	0,2532	0,0068	0,1095	0,0672	0,054	0,4907	9,20	2,1771
0,129	120	0,2427	0,0067	0,1006	0,0644	0,054	0,4684	9,49	2,2043
0,124	125	0,2330	0,0066	0,0927	0,0618	0,054	0,4481	9,78	2,2339
0,119	130	0,2240	0,0066	0,0857	0,0594	0,054	0,4297	10,07	2,2654

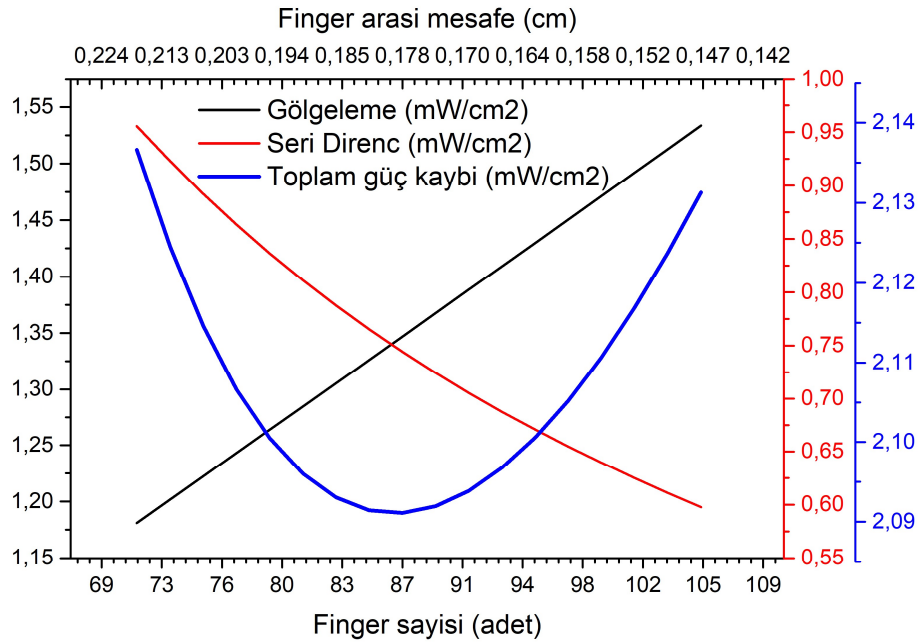
* Hesaplamalarda finger genişliği sabit tutulmuştur.

* Hesaplanan değerler 3 busbarlı hücre dizaynı içindir.

Ayrıca Şekil 4.17 30-130 adet finger sayısı aralığı için finger sayısı değişimine göre gölgeleme ve seri direnç sebebiyle olan güç kaybı ve toplam güç kaybı değerlerinin değişimini göstermektedir. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi gölgeleme sebebiyle olan güç kaybı finger sayısı arttıkça artmaktadır. Seri direnç sebebiyle olan güç kaybı ise finger sayısı arttıkça azalmaktadır. Her iki kaybın toplamının en az olduğu finger sayısının 87, fingerlar arası mesafenin ise 0,178 cm olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.18 ise sadece 70-105 arası finger sayısı aralığı için gölgeleme ve seri direnç kayıpları ve toplam güç kaybını göstermektedir. Şekil 4.18 toplam kaybın en az olduğu finger sayısının 87 adet olduğunu daha net göstermektedir.

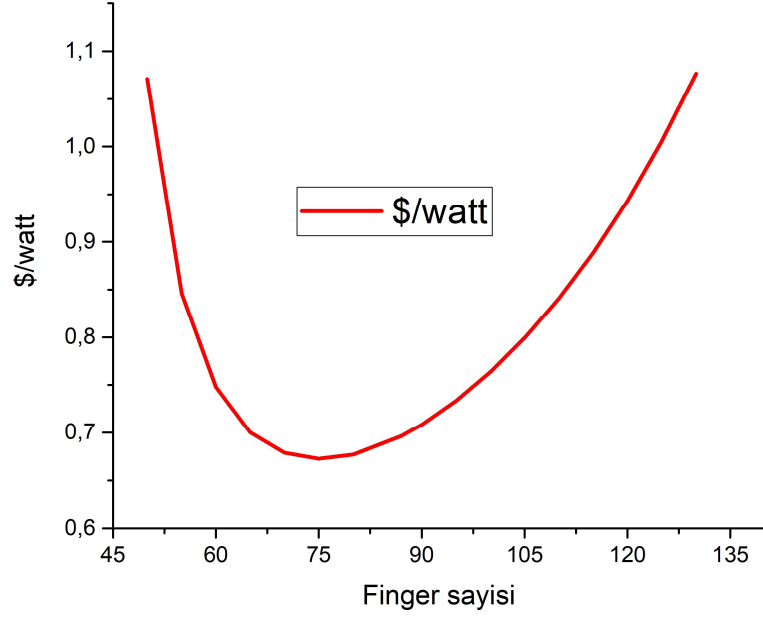


Şekil 4.17. 30-130 adet finger sayısı aralığı için gölgeleme ve seri direnç sebebiyle olan güç kayıplarının ve toplam güç kayıplarının değişimi



Şekil 4.18. 70-105 adet finger sayısı aralığı için gölgeleme ve seri direnç sebebiyle olan güç kayıplarının ve toplam güç kayıplarının değişimi

3 busbar ve 0,009 cm finger genişliği için ayrıca Şekil 4.19 watt artırımı başına ek maliyet ile elde edilen marjinal maliyete (incremental cost) göre maliyet açısından en uygun dizaynın ise 75 adet finger sayısı ve 0,206 cm fingerlar arası mesafe olduğu görülmüştür.

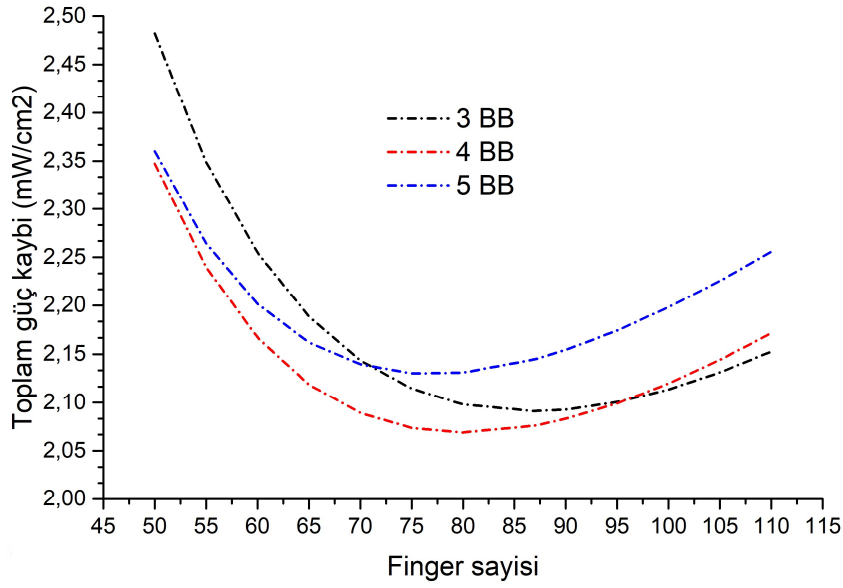


Şekil 4.19. Marjinal maliyetin finger sayısına göre değişimi

Finger genişliği, fingerlar arası mesafe ve finger sayısının belirlenmesinin ardından bir sonraki optimizasyon işleminin amacı busbar sayısı ve busbar genişliğinin belirlenmesi olacaktır. Çizelge 4.4 aynı busbar genişliğine sahip 3, 4 ve 5 adet busbar sayısı için seri direnç değerlerinin, gölgeleme değerlerinin ve toplam güç kaybı değerlerinin değişimini göstermektedir. 4 ve 5 busbarlı tasarımın 3 busbara göre daha az direnç değerine sahip olduğu görülürken artan busbar sayısı ile busbarların hücre yüzeyinde kapladığı alanın artmasıyla gölgeleme değerlerinin arttığı çizelgeden görülebilir. Çizelge 4.4'e ek olarak Şekil 4.20 3, 4 ve 5 busbarlı tasarımlar için toplam güç kaybı değerinin finger sayısına göre değişimini göstermektedir. Çizelge ve şekilden anlaşılacağı gibi 0,13 cm busbar genişliği için 4 busbarlı tasarımın 5 busbarlı tasarıma göre daha az güç kaybına sahip olacağı tespit edilmiştir. En iyi değerlere bakıldığında 3 busbar ve 4 busbar neredeyse aynı güç kaybına sahip olduğundan ek bir adet busbar eklemenin maliyet açısından uygun olmaması nedeniyle busbar kalınlığının optimizasyonu gereklidir.

Çizelge 4.4. Aynı busbar genişliğine (0,13 cm) sahip 3, 4 ve 5 busbarlı dizaynlar için hesaplanan değerlerin değişimi

Busbar sayısı	Busbar genişliği (cm)	Finger sayısı	r_{finger}	r_{busbar}	$r_{üst}$	r_{temas}	$r_{alttaş}$	r_{Toplam} (Ω.cm)	Gölgeleme (%)	Toplam güç kaybı (mW/cm ²)
3	0,13	50	0,582	0,010	0,579	0,155	0,054	1,380	5,41	2,482
		55	0,530	0,009	0,479	0,140	0,054	1,212	5,70	2,349
		60	0,485	0,009	0,402	0,129	0,054	1,079	6,00	2,255
		65	0,448	0,009	0,343	0,119	0,054	0,972	6,29	2,189
		70	0,416	0,008	0,296	0,110	0,054	0,884	6,58	2,144
		75	0,388	0,008	0,258	0,103	0,054	0,811	6,87	2,115
		80	0,364	0,008	0,226	0,097	0,054	0,749	7,16	2,098
		87	0,335	0,008	0,191	0,089	0,054	0,676	7,57	2,091
		90	0,324	0,007	0,179	0,086	0,054	0,650	7,74	2,093
		95	0,307	0,007	0,160	0,081	0,054	0,610	8,03	2,101
		100	0,291	0,007	0,145	0,077	0,054	0,574	8,33	2,114
		105	0,277	0,007	0,131	0,074	0,054	0,543	8,62	2,131
4	0,13	110	0,265	0,007	0,120	0,070	0,054	0,516	8,91	2,153
		50	0,328	0,007	0,579	0,155	0,054	1,123	6,25	2,347
		55	0,298	0,007	0,479	0,140	0,054	0,978	6,54	2,240
		60	0,273	0,007	0,402	0,129	0,054	0,865	6,83	2,167
		65	0,252	0,006	0,343	0,119	0,054	0,774	7,12	2,119
		70	0,234	0,006	0,296	0,110	0,054	0,700	7,41	2,089
		75	0,218	0,006	0,258	0,103	0,054	0,639	7,70	2,074
		80	0,205	0,006	0,226	0,097	0,054	0,588	7,99	2,069
		87	0,188	0,006	0,191	0,089	0,054	0,528	8,40	2,076
		90	0,182	0,006	0,179	0,086	0,054	0,506	8,58	2,083
		95	0,172	0,005	0,160	0,081	0,054	0,474	8,87	2,099
		100	0,164	0,005	0,145	0,077	0,054	0,445	9,16	2,120
5	0,13	105	0,156	0,005	0,131	0,074	0,054	0,420	9,45	2,144
		110	0,149	0,005	0,120	0,070	0,054	0,398	9,74	2,172
		50	0,210	0,006	0,579	0,155	0,054	1,004	7,08	2,364
		55	0,191	0,006	0,479	0,140	0,054	0,870	7,37	2,268
		60	0,175	0,005	0,402	0,129	0,054	0,765	7,66	2,205
		65	0,161	0,005	0,343	0,119	0,054	0,682	7,95	2,166
		70	0,150	0,005	0,296	0,110	0,054	0,615	8,24	2,144
		75	0,140	0,005	0,258	0,103	0,054	0,559	8,54	2,134
		80	0,131	0,005	0,226	0,097	0,054	0,513	8,83	2,135
		87	0,121	0,005	0,191	0,089	0,054	0,459	9,23	2,149
		90	0,116	0,004	0,179	0,086	0,054	0,440	9,41	2,158
		95	0,110	0,004	0,160	0,081	0,054	0,411	9,70	2,178
		100	0,105	0,004	0,145	0,077	0,054	0,385	9,99	2,202
		105	0,100	0,004	0,131	0,074	0,054	0,363	10,28	2,229
		110	0,095	0,004	0,120	0,070	0,054	0,343	10,57	2,260

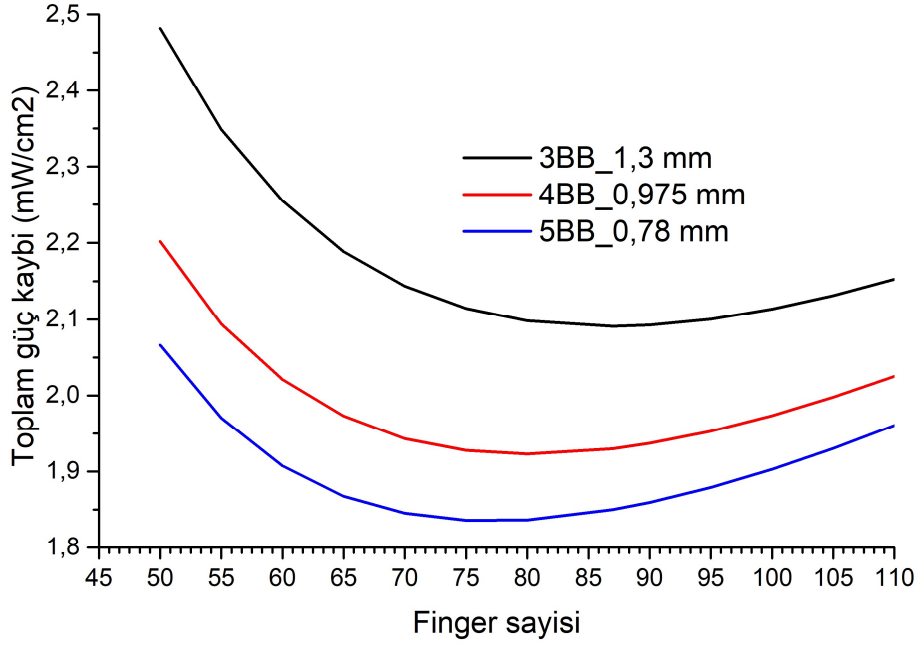


Şekil 4.20. Aynı busbar genişliğine (0,13 cm) sahip 3, 4 ve 5 busbarlı dizaynlar için finger sayısının değişimine göre toplam güç kaybı değişimi

Bu sebeple busbarların hücre yüzeyinde kapladığı alanın sabit tutulması (busbar genişliği * busbar sayısı = sabit) ile hem yüzeyde kaplanan alan aynı (gölgeleme kayıpları aynı) hemde busbar maliyeti açısından aynı maliyete sahip tasarımlar için hesaplamalar yapılmıştır. 3 busbar için 0,13 cm, 4 busbar için 0,0975 cm ve 5 busbar için 0,078 cm busbar genişliklerinde finger sayısına göre direnç değerleri, gölgeleme değerleri ve toplam güç kaybı değerlerinin değişimi Çizelge 4.5’de verildiği gibidir. 3 busbarlı tasarımda toplam güç kaybının en az olduğu değer 2,091 mW/cm2 iken 4 busbarlı tasarımdaki en az güç kaybı değeri 1,923 mW/cm2 ve son olarak 5 busbarlı tasarımda ise 1,841 mW/cm2 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla aynı gölgeleme değerleri için 3, 4 ve 5 busbarlı tasarımlar için toplam güç kaybı değerinin busbar sayısı arttıkça düştüğü ve en iyi değer 5 busbarlı tasarımda elde edildiği görülmüştür. Burada dikkat çeken en önemli nokta 3 busbarlı tasarım için en iyi performansın elde edildiği finger sayısı 87 adet iken 4 busbarlı tasarım için 80 adet ve 5 busbarlı tasarım için ise 75 adet olduğu görülmüştür. Busbar sayısının artması aynı zamanda optimum dizayn için kullanılması gereken finger sayısını düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.21 aynı alana (aynı gölgeleme kayıplarına) sahip 3, 4 ve 5 busbarlı tasarımlar için toplam güç kaybı değerinin finger sayısına göre değişimini gösteren grafik. Şekildedeki parabolün tepe noktasının busbar sayısı arttıkça sola kaydığı görülmektedir.

Çizelge 4.5. Aynı gölgeleme oranına sahip 3, 4 ve 5 busbarlı dizaynlar için hesaplanan değerler

Busbar sayısı	Busbar genişliği (cm)	Finger sayısı	r_{finger}	r_{busbar}	$r_{üst}$	r_{temas}	$r_{alttaş}$	r_{Toplam} ($\Omega \cdot cm$)	Gölgeleme (%)	Toplam güç kaybı (mW/cm^2)
3	0,13	50	0,582	0,010	0,579	0,155	0,054	1,380	5,413	2,482
		55	0,530	0,009	0,479	0,140	0,054	1,212	5,704	2,349
		60	0,485	0,009	0,402	0,129	0,054	1,079	5,995	2,255
		65	0,448	0,009	0,343	0,119	0,054	0,972	6,286	2,189
		70	0,416	0,008	0,296	0,110	0,054	0,884	6,578	2,144
		75	0,388	0,008	0,258	0,103	0,054	0,811	6,869	2,115
		80	0,364	0,008	0,226	0,097	0,054	0,749	7,160	2,098
		87	0,335	0,008	0,191	0,089	0,054	0,676	7,568	2,091
		90	0,324	0,007	0,179	0,086	0,054	0,650	7,743	2,093
		95	0,307	0,007	0,160	0,081	0,054	0,610	8,034	2,101
		100	0,291	0,007	0,145	0,077	0,054	0,574	8,325	2,114
		105	0,277	0,007	0,131	0,074	0,054	0,543	8,617	2,131
		110	0,265	0,007	0,120	0,070	0,054	0,516	8,908	2,153
4	0,0975	50	0,328	0,010	0,579	0,155	0,054	1,125	5,413	2,202
		55	0,298	0,009	0,479	0,140	0,054	0,981	5,704	2,094
		60	0,273	0,009	0,402	0,129	0,054	0,867	5,995	2,021
		65	0,252	0,009	0,343	0,119	0,054	0,776	6,286	1,973
		70	0,234	0,008	0,296	0,110	0,054	0,702	6,578	1,943
		75	0,218	0,008	0,258	0,103	0,054	0,641	6,869	1,928
		80	0,205	0,008	0,226	0,097	0,054	0,589	7,160	1,923
		87	0,188	0,008	0,191	0,089	0,054	0,530	7,568	1,930
		90	0,182	0,007	0,179	0,086	0,054	0,508	7,743	1,937
		95	0,172	0,007	0,160	0,081	0,054	0,476	8,034	1,953
		100	0,164	0,007	0,145	0,077	0,054	0,447	8,325	1,974
		105	0,156	0,007	0,131	0,074	0,054	0,422	8,617	1,998
		110	0,149	0,007	0,120	0,070	0,054	0,400	8,908	2,025
5	0,078	50	0,210	0,010	0,579	0,155	0,054	1,007	5,413	2,072
		55	0,191	0,009	0,479	0,140	0,054	0,873	5,704	1,976
		60	0,175	0,009	0,402	0,129	0,054	0,769	5,995	1,913
		65	0,161	0,009	0,343	0,119	0,054	0,686	6,286	1,873
		70	0,150	0,008	0,296	0,110	0,054	0,618	6,578	1,851
		75	0,140	0,008	0,258	0,103	0,054	0,562	6,869	1,841
		80	0,131	0,008	0,226	0,097	0,054	0,516	7,160	1,842
		87	0,121	0,008	0,191	0,089	0,054	0,462	7,568	1,855
		90	0,116	0,007	0,179	0,086	0,054	0,443	7,743	1,865
		95	0,110	0,007	0,160	0,081	0,054	0,413	8,034	1,885
		100	0,105	0,007	0,145	0,077	0,054	0,388	8,325	1,909
		105	0,100	0,007	0,131	0,074	0,054	0,366	8,617	1,936
		110	0,095	0,007	0,120	0,070	0,054	0,346	8,908	1,966



Şekil 4.21. Gölgelemenin sabit olduğu busbar kalınlığına göre güç kaybı değişimi

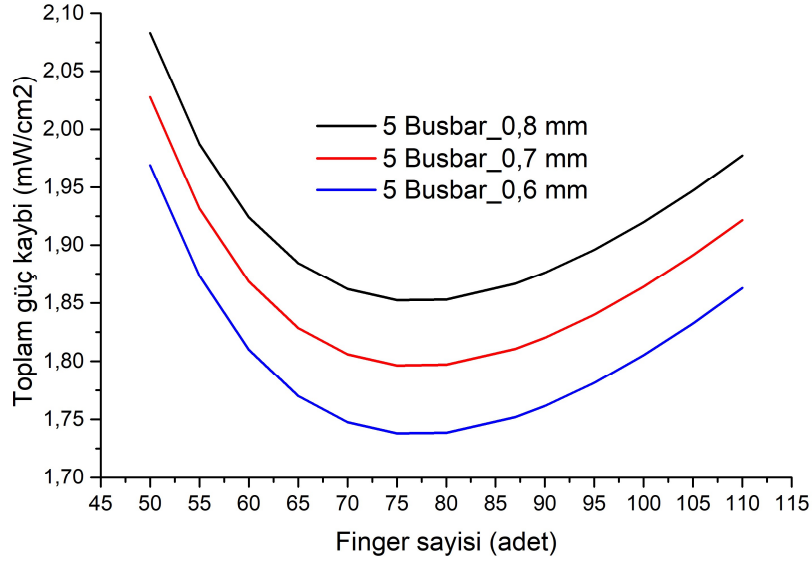
5 Busbarlı tasarımda diğer tasarımlara göre güç kaybı değerinin daha az olması nedeniyle 5 busbarlı tasarım için busbar genişliğinin optimizasyonun yapılması son işlem olacaktır.

Busbar kalınlığının olabildiğince inceltilmesi gölgeleme ve maliyet açısından daha uygun olacağından 5 busbarlı bir tasarım için 0,08, 0,07 ve 0,06 cm busbar genişlikleri için hesaplanan değerler Çizelge 4.6’da gösterildiği gibidir. Ayrıca bu 3 farklı genişlikteki 5 busbarlı tasarımlar için toplam güç kaybı değerlerinin finger sayısına göre değişimi Şekil 4.22’de görülebilir.

Yapılan optimizasyon hesaplamalarının sonucunda toplam güç kaybı değerinin en az olduğu metalizasyon tasarımının 5 adet busbar, 75 adet finger, 0,06 cm busbar genişliği ve 0,206 cm fingerlar arası mesafeye sahip olan tasarım olduğu görülmüştür. Bu tasarım 1,741 mW/cm² değeri ile optimizasyon kısmında elde edilen en düşük güç kaybına sahip dizayndır.

Çizelge 4.6. Aynı gölgeleme oranına sahip 3, 4 ve 5 busbarlı dizaynlar için hesaplanan değerler

Busbar sayısı	Busbar genişliği (cm)	Finger sayısı	r_{finger}	r_{busbar}	$r_{üst}$	r_{temas}	$r_{alttaş}$	r_{Toplam} ($\Omega.cm$)	Gölgeleme (%)	Toplam güç kaybı (mW/cm^2)
5	0,08	50	0,210	0,010	0,579	0,155	0,054	1,004	5,48	2,0829
		55	0,191	0,009	0,479	0,140	0,054	0,870	5,77	1,9871
		60	0,175	0,009	0,402	0,129	0,054	0,765	6,06	1,9240
		65	0,161	0,008	0,343	0,119	0,054	0,682	6,35	1,8843
		70	0,150	0,008	0,296	0,110	0,054	0,615	6,64	1,8618
		75	0,140	0,008	0,258	0,103	0,054	0,559	6,93	1,8523
		80	0,131	0,008	0,226	0,097	0,054	0,513	7,22	1,8529
		87	0,121	0,007	0,191	0,089	0,054	0,459	7,63	1,8666
		90	0,116	0,007	0,179	0,086	0,054	0,440	7,81	1,8761
		95	0,110	0,007	0,160	0,081	0,054	0,411	8,10	1,8959
		100	0,105	0,007	0,145	0,077	0,054	0,385	8,39	1,9198
		105	0,100	0,007	0,131	0,074	0,054	0,363	8,68	1,9472
		110	0,095	0,007	0,120	0,070	0,054	0,343	8,97	1,9774
5	0,07	50	0,210	0,011	0,579	0,155	0,054	1,009	5,16	2,0274
		55	0,191	0,010	0,479	0,140	0,054	0,874	5,45	1,9315
		60	0,175	0,010	0,402	0,129	0,054	0,770	5,74	1,8683
		65	0,161	0,010	0,343	0,119	0,054	0,687	6,03	1,8285
		70	0,150	0,009	0,296	0,110	0,054	0,619	6,32	1,8060
		75	0,140	0,009	0,258	0,103	0,054	0,563	6,61	1,7965
		80	0,131	0,009	0,226	0,097	0,054	0,517	6,90	1,7971
		87	0,121	0,008	0,191	0,089	0,054	0,463	7,31	1,8107
		90	0,116	0,008	0,179	0,086	0,054	0,443	7,49	1,8202
		95	0,110	0,008	0,160	0,081	0,054	0,414	7,78	1,8400
		100	0,105	0,008	0,145	0,077	0,054	0,389	8,07	1,8639
		105	0,100	0,008	0,131	0,074	0,054	0,367	8,36	1,8912
		110	0,095	0,008	0,120	0,070	0,054	0,347	8,65	1,9214
5	0,06	50	0,210	0,013	0,579	0,155	0,054	1,010	4,84	1,9724
		55	0,191	0,012	0,479	0,140	0,054	0,876	5,13	1,8764
		60	0,175	0,012	0,402	0,129	0,054	0,771	5,42	1,8131
		65	0,161	0,011	0,343	0,119	0,054	0,688	5,71	1,7732
		70	0,150	0,011	0,296	0,110	0,054	0,621	6,00	1,7507
		75	0,140	0,010	0,258	0,103	0,054	0,565	6,29	1,7411
		80	0,131	0,010	0,226	0,097	0,054	0,518	6,58	1,7416
		87	0,121	0,010	0,191	0,089	0,054	0,464	6,99	1,7552
		90	0,116	0,010	0,179	0,086	0,054	0,445	7,17	1,7647
		95	0,110	0,009	0,160	0,081	0,054	0,416	7,46	1,7844
		100	0,105	0,009	0,145	0,077	0,054	0,390	7,75	1,8083
		105	0,100	0,009	0,131	0,074	0,054	0,368	8,04	1,8356
		110	0,095	0,009	0,120	0,070	0,054	0,348	8,33	1,8658



Şekil 4.22. Farklı busbar kalınlığına sahip 5 busbarlı dizaynlar için güç kaybı değimi

Metalizasyon optimizasyonu kısmında yapılmış çalışmalar ve sonuçları özetleyecek olursak;

-90-150 mikron aralığındaki finger genişlikleri için en uygun değerin 90 mikron olduğu görülmüş ve tasarımlarda 90 mikron finger genişliği kullanılmıştır

-Finger sayısı ve fingerlar arası mesafenin optimizasyon işlemi yapılmış ve 3 busbarlı bir dizayn için toplam güç kaybı değerlerinin en az olduğu finger sayısının 87 ve fingerlar arası mesafenin 0,178 cm olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca 3 busbarlı dizaynlar için maliyet açısından en uygun olan dizaynın 75 adet finger ve 0,206 cm fingerlar arası mesafeye sahip olan dizayn olduğu hesaplanmıştır.

-En iyi performansa sahip busbar sayısı belirlenmiş ve 5 busbarlı dizaynın 3 ve 4 busbarlı dizaynlara göre daha az güç kaybına sahip olduğu görülmüştür.

-Son olarak en az güç kaybına sahip tasarımın 0,06 cm busbar genişliğine sahip 5 busbarlı ve 0,206 cm fingerlar arası mesafeye sahip 75 fingerlı dizayn olduğu görülmüştür.

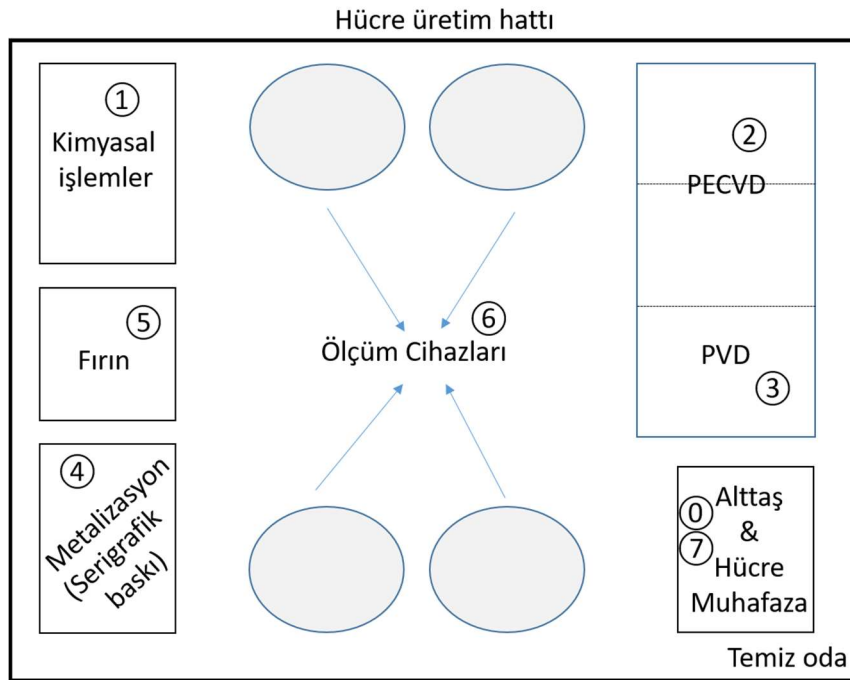
BÖLÜM V

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇ

Bu bölümde ilk olarak üretimi gerçekleştirilen HIT güneş hücrelerinin adım adım üretim aşamalarına değinilmiştir. Ardından yapılan metalizasyon optimizasyonu sonucunda elde edilen tasarım verilerinin HIT güneş hücrelerine uygulanması gerçekleştirilmiş ve elde edilen verim değerleri sunulmuştur. Ayrıca ön yüz metalizasyon işleminde maske yardımıyla PVD yönteminin uygulanmasının detayları bu kısımda verilmiştir. Tez çalışması sonucunda elde edilen bilgi ve sonuç kısmının verilmesinin ardından yapılan bu çalışma ışığında gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

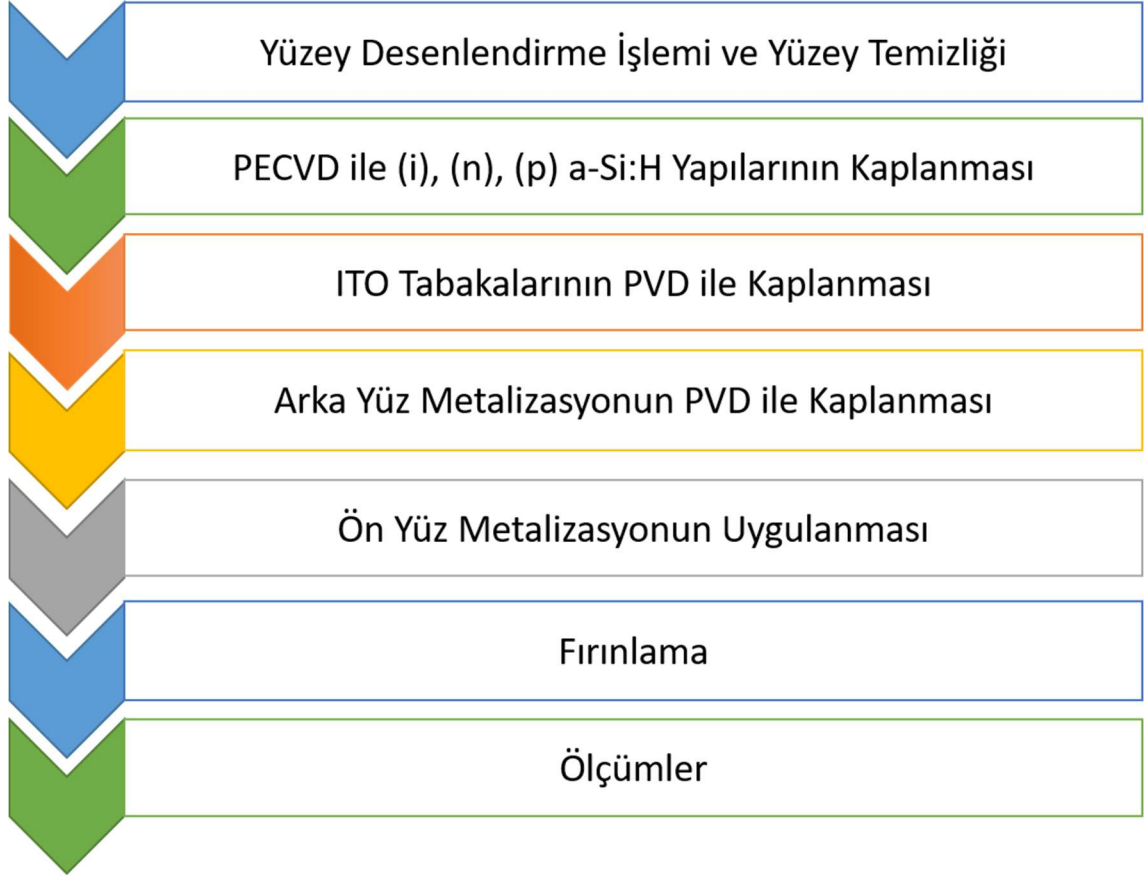
5.1 NÖHÜNAM’da HIT Güneş Hücresi Üretimi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde (NÖHÜNAM) gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında HIT güneş hücrelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim ve test adımlarının gerçekleştirildiği 1/10000 partikül sayısına sahip temiz oda ve üretim hattı Şekil 5.1’de verildiği gibidir.



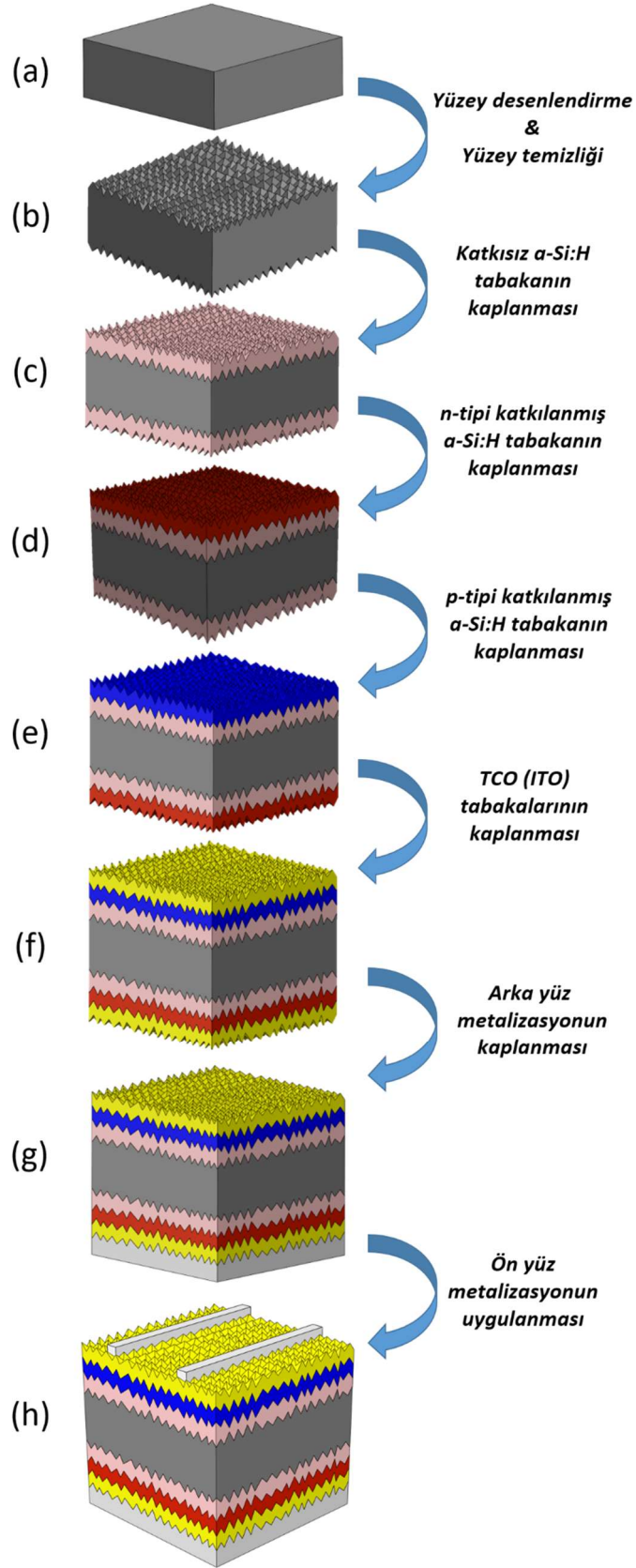
Şekil 5.1. NÖHÜNAM’da bulunan temiz oda üretim hattı

HIT güneş hücreleri hakkında detaylı bilgi ve literatür özetinin verildiği 3. bölümde değinildiği gibi literatür ışığında HIT güneş hücrelerinin NÖHÜNAM'da üretimi Şekil 5.2'de verilen sıralama ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2. NÖHÜNAM'da üretilen yüksek verimli HIT güneş hücrelerinin standart üretim adımları

Ayrıca her bir üretim adımının hücre üzerinde oluşturduğu görselin şematik gösterimi Şekil 5.3'de verildiği gibidir. Güneş hücreleri $156 \times 156 \text{ mm}^2$ (6 inç) boyutlarında, CZ n-tipi katkılanmış pseudo kare biçimli, 3 ohm.cm öz dirence sahip ve 180 mikron kalınlıklardaki alttaşlar üzerine üretilmiştir. Her bir üretim adımının detayları sıralanan başlıklarda verildiği gibidir.



Şekil 5.3. HIT güneş hücresi üretim adımları c-Si alttaş (a) yüzey desenlendirilmiş ve temizlenmiş alttaş (b) i tipi a-si:H tabakanın kaplanması (c) n tipi a-si:H tabakanın kaplanması (d) p tipi a-si:H tabakanın kaplanması (e) ITO tabakalarının kaplanması (f) arka yüzey metalizasyonun kaplanması (g) ön yüzey metalizasyonun uygulanması (h)

5.1.1 Yüzey desenlendirme işlemi ve ıslak kimyasal yüzey temizliği

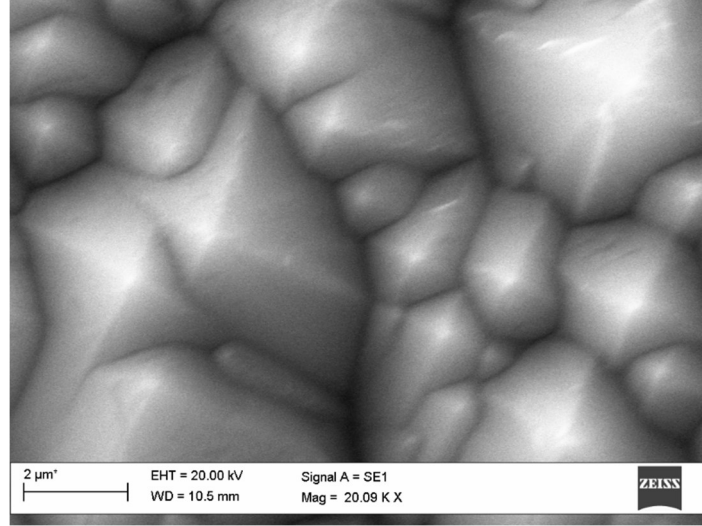
Hücre üretiminin ilk adımı olan kimyasal işlemler Fotoğraf 5.1’de verilen ıslak tezgahta iş güvenliği kurallarına uygun koruyucu ekipman eşliğinde gerçekleştirilmiştir. KOH ile yüzey desenlendirme işlemi literatüre uygun olarak gerçekleştirilmiş ve Şekil 5.4’de verildiği gibi yüzey deseni elde edilmiştir.



Fotoğraf 5.1. Kimyasal işlemlerin yapıldığı ıslak kimyasal tezgâh (wet-bench)

Desenlendirme işleminin ardından ıslak kimyasal temizlik olarak standart RCA-2 işlemi uygulanmamış olup RCA-1 ve HF daldırma işlemi yapılmıştır. Partikül, organik malzeme ve metal kaynaklı kirlilikleri temizlemek amacıyla uygulanan RCA-1 temizliği ve oksit tabakayı uzaklaştırmak amacıyla uygulanan HF temizliğinin detayları aşağıda verildiği gibidir;

- RCA-1: Alttaşılar 70 °C’de 1/7 oranında NH_4OH (%27), 1/7 oranında H_2O_2 (%30) ve 5/7 oranında saf su karışımında 15 dk bekletilmiştir. 15 dakika sonunda alttaşılar çözeltiden çıkarılıp saf su ile durulanmıştır.
- HF: RCA-1 işleminin ardından alttaşılar oda sıcaklığında 90 saniye boyunca %2 oranında seyreltilmiş HF karışımında bekletilmiştir. Ardından saf su ile durulanarak azot ile kurutma uygulanmıştır.



Şekil 5.4. Yüzey desenlendirme işlemi sonucunda elde edilen alttaş yüzeyinin SEM görüntüsü

Yüzey temizliğinin son adımı olan HF daldırma işleminin hemen ardından alttaşlar zaman kaybetmeden a-Si:H tabakaların kaplanacağı PECVD sistemine yüklenmiştir. Her iki işlemde Şekil 5.1’de görülebileceği gibi aynı temiz oda içerisinde gerçekleştirilmesi ile alttaş yüzeylerinde yeniden doğal oksit oluşumunun minimum düzeyde olduğu kritik 5 dakikayı (Fahrner, 2013) aşmadan kaplama adımına geçilmiştir.

5.1.2 PECVD yardımıyla a-Si:H tabakaların kaplanması

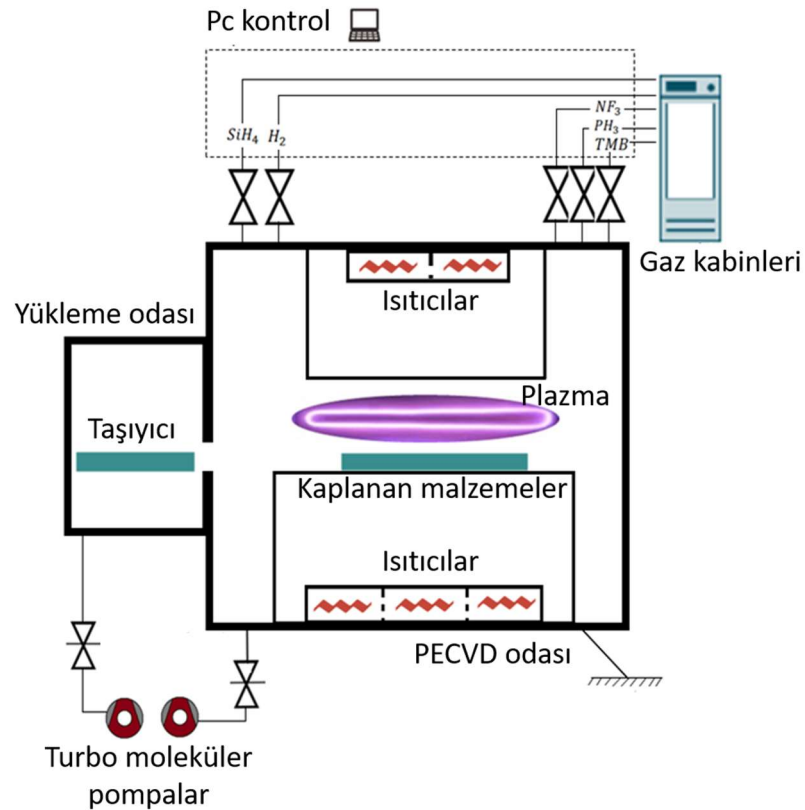
Alttaş temizliği işleminin hemen ardından PECVD ile a-Si:H tabakaların kaplanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Katkılı ve katkısız a-Si:H tabakaların üretimi 13,56 MHz frekansa sahip RF PEVCD ile Çizelge 5.1’de verilen koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.1. 13,56 MHz frekans RF PECVD ile kaplanan a-Si:H tabakalar için kaplama koşulları

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

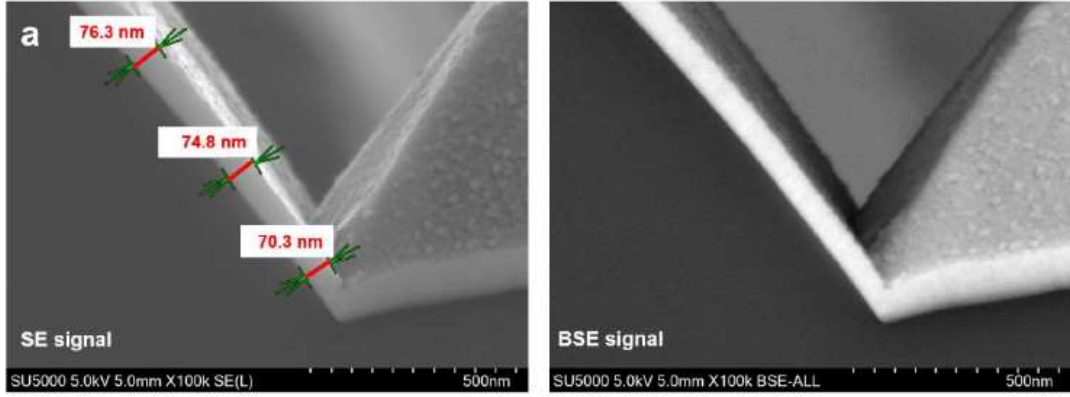
a-Si:H tabakaların üretiminde ilk adım yüzey pasivasyonu sağlanması amacıyla katkısız a-Si:H tabakaların alttaşın her iki yüzeyine kaplanması işlemidir. Bu işlem silan ve

hidrojen gazı eşliğinde 200 °C’de yapılmıştır. Katkısız a-Si:H tabakalarının kaplanmasının ardından katkılı a-Si:H tabakaların kaplanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hücrenin arka yüzeyine BSF yapısı sağlayıp arka yüzey rekombinasyonunun engellenmesi amacıyla n-tipi katkılı a-Si:H tabakalar silan ve hidrojen gazına ek olarak PH₃ gazı kullanımı ile kaplanmıştır. Ön yüzeyde ise p-n eklem yapısının oluşturulması amacıyla katkısız a-Si:H üzerine p-tipi katkılı a-Si:H tabakalar silan ve hidrojen gazına ek olarak TMB gazı kullanımı ile kaplanmıştır. Katkısız a-Si:H tabakaların kaplanması Fotoğraf 5.2’de görülen çoklu odalı ince film üretim istasyonunun PECVD-1 odasında gerçekleştirilirken katkılı a-Si:H tabakaların kaplanması işlemi ise PECVD-2 odasında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ayrı oda kullanımı ile çapraz kontaminasyon önlenmiş ve katkısız a-Si:H tabakaların kalitesi korunmuştur. Buna ek olarak PECVD-2 odasında n-tipi ve p-tipi kaplamaların arasında oda temizleme prosedürü NF₃ plazma temizliği yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PECVD sisteminin detaylı şematik yapısı Şekil 5.5’de verildiği gibidir.



Şekil 5.5. PECVD sisteminin şematik gösterimi

Daha öncede değinildiği gibi yüzey desenlendirme işleminin getirdiği avantajların yanında desenli yüzeyler üzerine nanometre boyutlarındaki ince filmlerin uniform bir şekilde kaplanması zor ve önemli bir noktadır. Şekil 5.6 desenli yüzeyler üzerine yapılan bu kaplama işlemlerinin gayet başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 5.6. Desenli yüzeyler üzerine kaplanan ince filmlerin uniform dağılımı (Seyhan vd., 2017)

a-Si:H tabakaların PECVD sistemi ile kaplanmasının ardından bir sonraki üretim adımı PVD ile TCO görevi görecek ince filmlerin kaplanması olmuştur.

5.1.3 ITO tabakalarının PVD ile kaplanması

TCO malzemesi olarak kaplanan ITO, hücrenin her iki yüzeyine DC magnetron sıçratma metodu ile PVD yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf 5.2’de görülen çoklu odalı ince film üretim istasyonunun PVD odasında gerçekleştirilen kaplama işleminin parametreleri Çizelge 5.2’de verildiği gibidir.

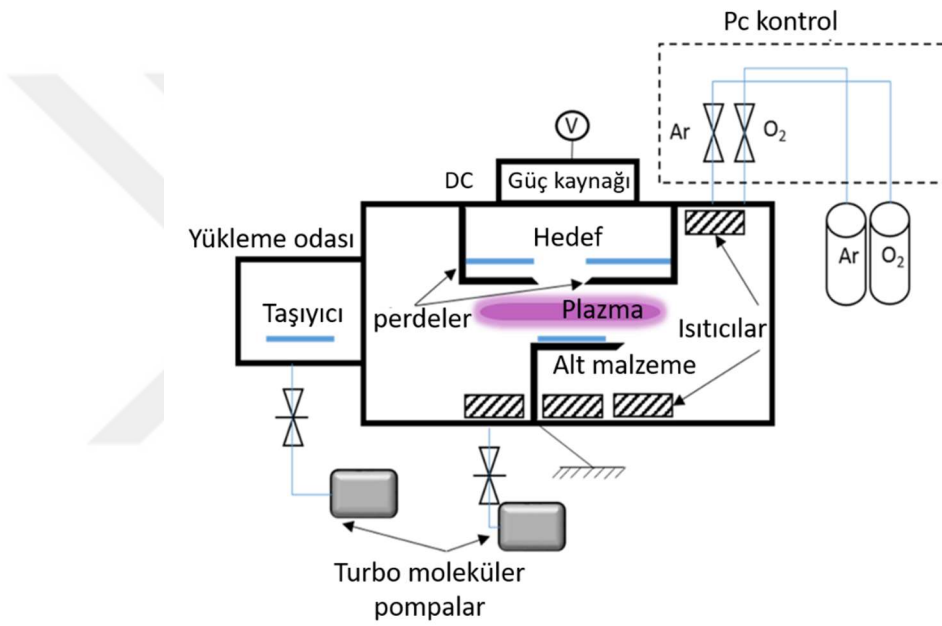
5.1.4 Arka yüz metalizasyonun PVD ile kaplanması

İnce film kaplama işlemlerinin son adımı olan arka yüzeyin tamamına gümüş kaplanması işlemi tıpkı ITO işlemi gibi Fotoğraf 5.2’de görülen çoklu odalı ince film üretim istasyonunun PVD odasında gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 180-220 nm kalınlığında gerçekleştirilen arka metalizasyon kaplama işleminin parametreleri Çizelge 5.2’de verildiği gibidir. Fotoğraf 5.3’de arka yüzeyinin tamamı gümüş kaplanmış hücrenin resmi

verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.7 Kullanılan PVD sisteminin detaylı şematik yapısını göstermektedir.

Çizelge 5.2. PVD yöntemi ile gerçekleştirilen ITO ve arka yüzey Ag kaplama koşulları

Tabaka	Sıcaklık	Güç	Basınç	Ar	O ₂	Kalınlık
	(°C)	(W)	(mbar)	(sccm)		(nm)
ITO	200	1900	2	200	3,5	80-100
Ag	200	2000	2	200	-	180-220



Şekil 5.7. PVD sisteminin detaylı şematik gösterimi



Fotoğraf 5.2. Çoklu odalı ince film üretim istasyonu



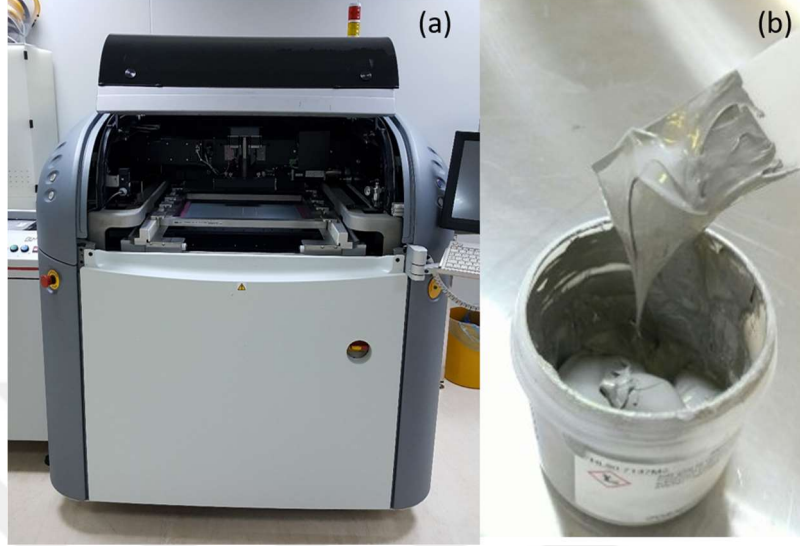
Fotoğraf 5.3. PVD ile arka yüzeyi tamamen gümüş kaplanmış hücre

5.1.5 Ön yüz metalizasyon işleminin serigrafik baskı yöntemi ile uygulanması

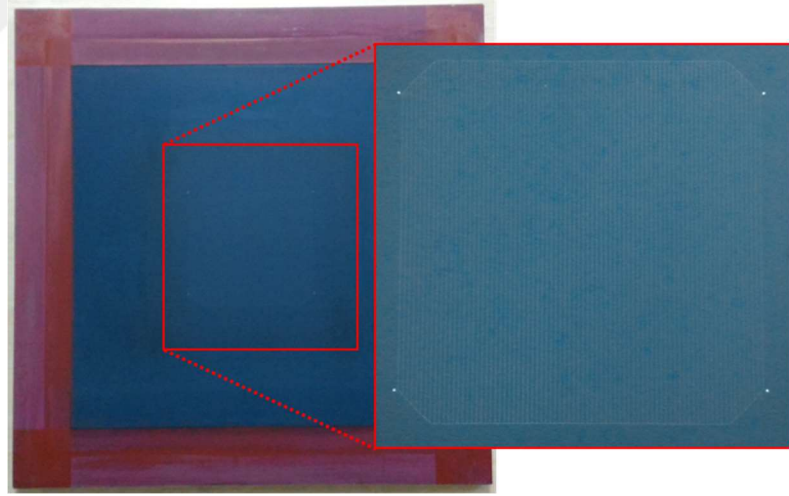
Serigrafik baskı aşaması Fotoğraf 5.4 (a)'da gösterilen cihaz vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Cihaz yan kısmında vakum tutucu bulunmakta ve metalizasyon işlemi yapılacak olan hücre cihaza buradan yüklenmektedir. Cihaz kontrol panelinden yapılacak olan metalizasyon işleminin ayarları ve süreci kontrol edilebilmektedir. HIT güneş hücrelerinde 3. bölümde bahsedildiği gibi 200 °C koşulları için üretilmiş olan özel metalizasyon gümüş pastası Fotoğraf 5.4 (b)'de gösterildiği gibidir. Macun kıvamında olan gümüş pasta metalizasyon işlemine başlamadan hemen önce elek üzerine ve rakle hareket yoluna sürülmektedir. Rakle hareketi sonucu elek üzerindeki dizayn hücre ön yüzüne aktarılmaktadır. Metalizasyonu tamamlanmış hücre vakumlu tutucu yardımıyla cihaz dışından alınmaktadır.

Ön yüz metalizasyonu yapılacak hücreye ilk olarak finger dizaynının aktarılması gerçekleştirilir. Finger dizaynı oluşturulduktan sonra hücre fırınlama işlemine tabi tutulur. Fırın adımıdan hemen sonra hücre ön yüzüne bu kez busbar dizaynının aktarılması işlemi gerçekleştirilir. Finger metalizasyonu yapılmış hücre fırınlama işlemine tabi tutulmadan direkt olarak busbar aşamasına geçilmemesi hücre yüzeyindeki dizaynın dağılmaması açısından önemlidir. Busbar dizaynı oluşturulan hücre tekrar fırınlama işlemine tabi tutulur ve ön yüz metalizasyon süreci tamamlanmış olur. Fotoğraf 5.5 finger dizaynının hücre yüzeyine aktarılmasında kullanılan eleğin bir örneğini

gösterirken, Fotoğraf 5.6 busbar dizaynının hücre yüzeyinde oluşturulmasında kullanılan elekleri göstermektedir. Fotoğraf 5.6 (a) üç busbarlı dizayn için kullanılan eleği, Fotoğraf 5.6 (b) ise beş busbarlı dizayn için kullanılan eleği göstermektedir.

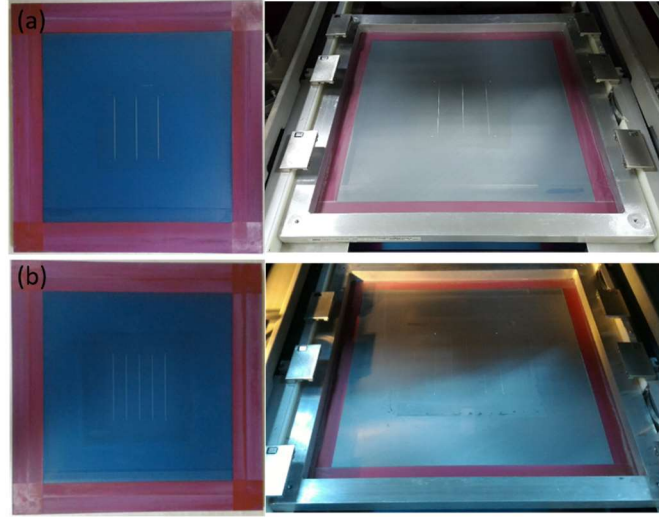


Fotoğraf 5.4. Ön yüz metalizasyon işleminde kullanılan serigrafik baskı cihazı (a) ve gümüş pasta (b)



Fotoğraf 5.5. Ön yüz metalizasyon işleminde finger tasarımının basılması için kullanılan eleğin örnek görüntüsü

Kullanılması gereken ön yüz metalizasyon dizaynının belirlenmesi için 4. bölümünde verildiği gibi optimizasyon işlemi gereklidir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler ışığında belirlenen dizaynlar uygulanmıştır. Başlık 5.2’de detaylar verilmiştir.



Fotoğraf 5.6. Ön yüz metalizasyon işleminde kullanılan elekler (a) 3 busbar (b) 5 busbar

5.1.6 Fırınlama işlemi

NÖHÜNAM’da kullanılan standart metalizasyon yöntemi olan serigrafik baskı yöntemi ile ön yüz metalizasyonun yapılmasından hemen sonra fırınlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Fırınlama yapılmadan önce hücre yüzeyindeki metalizasyon dizaynının bozulmaması için her türlü temastan kaçınılmış ve önceden 200 °C’ye ayarlanmış olan fırında 8-15 dakika boyunca fırınlama yapılmıştır. Fırınlama işleminin gerçekleştirildiği fırın Fotoğraf 5.7’de verilmiştir.

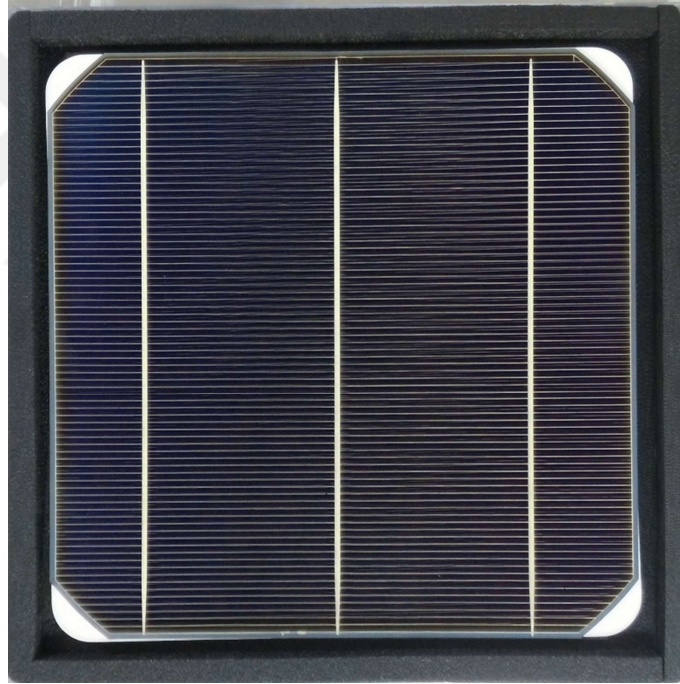


Fotoğraf 5.7. Fırınlama adımıında kullanılan fırın

Üretim adımlarının son adımı olan fırınlama işleminden sonra HIT güneş hücresi üretimi tamamlanmış ve ardından verim değerleri ölçülmüştür.

5.2 Optimizasyonu Gerçekleştirilen Ön Yüz Metalizasyon Dizaynlarının Uygulanması

Tez çalışmasının 4. bölümünde maliyet ve performans açısından önemli olan ön yüz metalizasyon dizaynının optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalar ile üç farklı dizayn ön plana çıkmış ve üretilen HIT güneş hücrelerine uygulanmıştır. 87 fingerlı 3 busbarlı, 75 fingerlı 3 busbarlı ve 75 fingerlı 5 busbarlı dizaynlara sahip hücreler üretilmiş ve verim değerleri ölçülmüştür. Fotoğraf 5.8 üç busbarlı dizaynlar içerisinde maliyet olarak en makul sonuçların alındığı, 75 adet finger ve 3 busbara sahip hücreyi göstermektedir. Fotoğraf 5.9 optimizasyon işlemi sonucunda 3 busbarlı dizaynlar içerisinde en düşük güç kaybının gerçekleştiği dizayn olan 87 adet finger ve 3 busbara sahip hücrenin görüntüsüdür.



Fotoğraf 5.8. 3 Busbarlı ve 75 adet fingerlı dizaynın uygulandığı hücre

Fotoğraf 5.10 üretilen 5 busbarlı hücreyi göstermektedir. Bu hücre busbar sayısının optimizasyonu sonucunda elde edilen ve tüm dizaynlar içerisinde en düşük güç kaybının hesaplandığı tasarım olan 75 adet finger ve 5 busbar (0.06 cm busbar genişliği) dizaynına sahiptir.

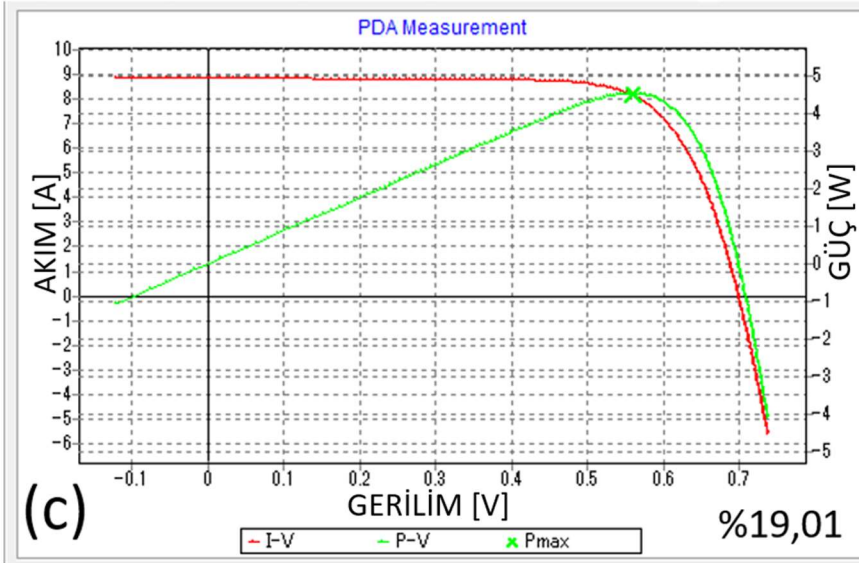
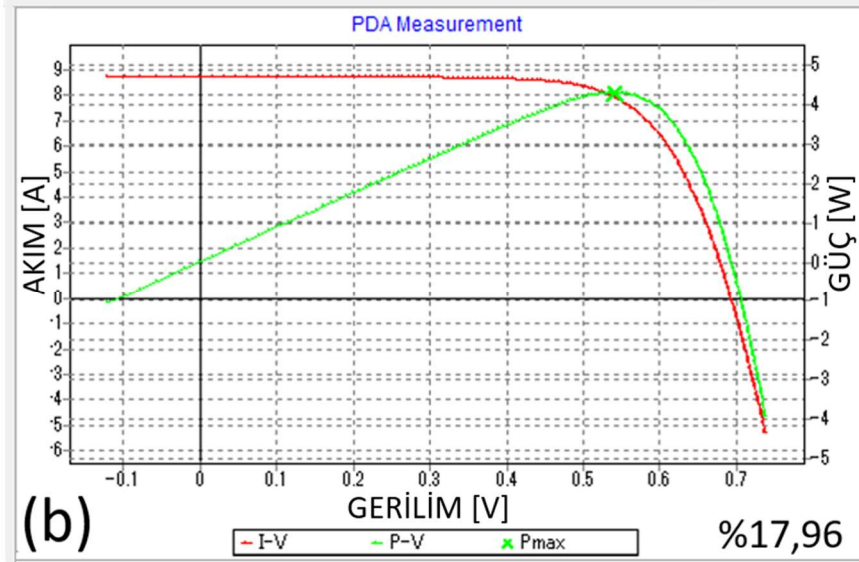
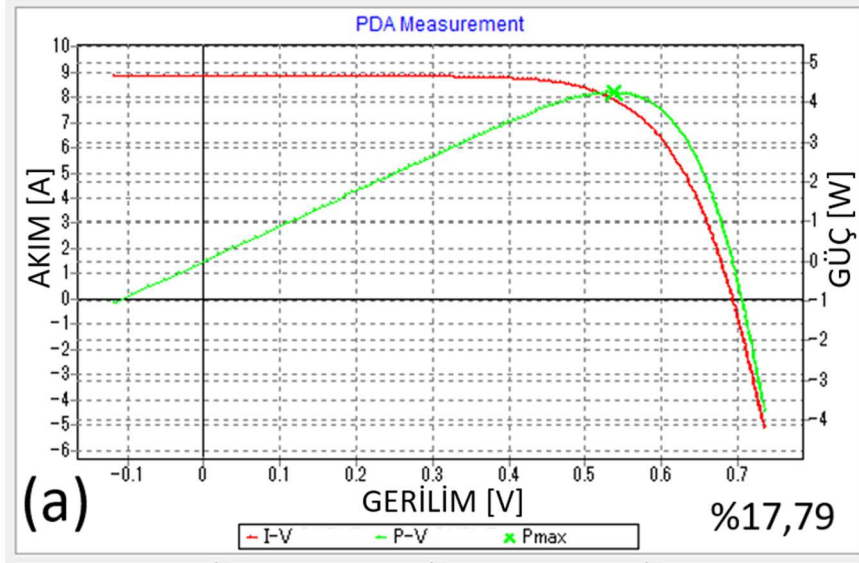
3 busbar 75 finger Tasarım-I, 3 busbar 87 finger Tasarım-II ve 5 busbar 75 finger Tasarım-III olarak adlandırılmış ve üretilen bu üç farklı tasarıma sahip hücrelerin performans değerleri ölçülmüş ve Şekil 5.8’de verilen I-V eğrileri elde edilmiştir. Verim değerleri Tasarım-I için %17,79, Tasarım-II için %17,96 ve Tasarım-III için %19,01 olarak ölçülmüştür.



Fotoğraf 5.9. 3 Busbarlı ve 87 adet fingerlı dizaynının uygulandığı hücre



Fotoğraf 5.10. 5 Busbarlı ve 75 adet fingerlı dizaynının uygulandığı hücre

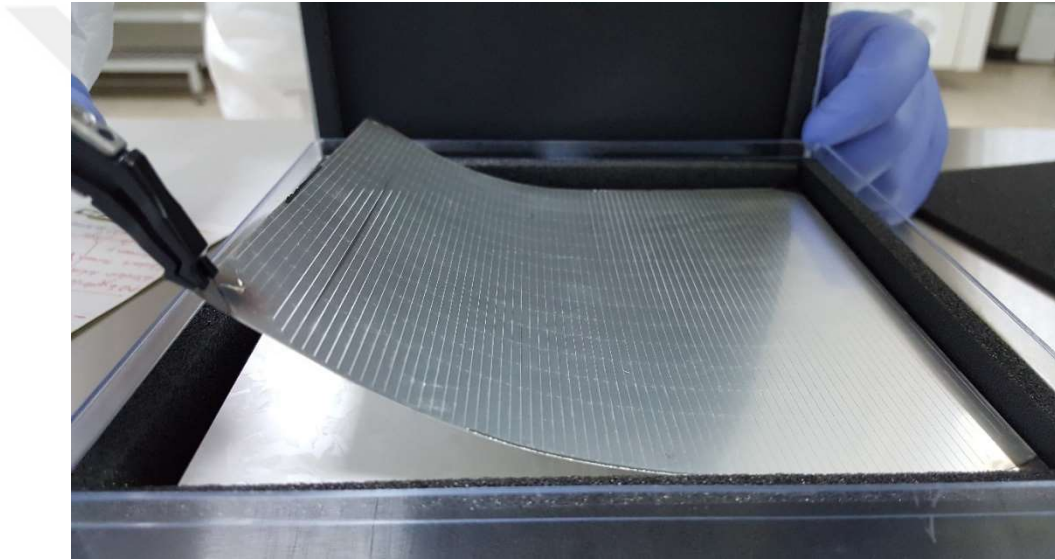


Şekil 5.8. Tasarım-I (a), Tasarım-II (b) ve Tasarım-III (c) için I-V eğrileri

Ayrıca ön yüz metalizasyon işleminde kullanılan serigrafik baskı işleminin yanında farklı bir ön yüz metalizasyon işlemi uygulaması bir sonraki başlıkta detayları verilen maske yardımıyla PVD ile gerçekleştirilmiştir.

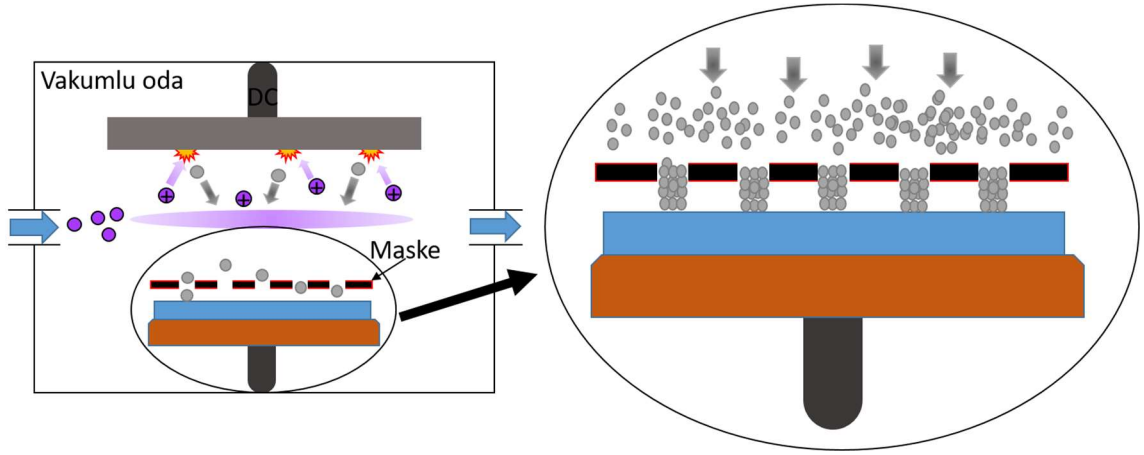
5.3 PVD Yönteminin Ön Yüz Metalizasyon İşleminde Kullanımı

Arka yüz metalizasyon işleminde kullanılan PVD yönteminin ön yüz metalizasyonda kullanılabilmesi için çalışmalar yapılmış ve maske yardımı ile PVD yönteminin ön yüz metalizasyon işlemine uygulanması gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz çelik, lazer kesim ve 120 mikron kalınlığında olan bu maske Fotoğraf 5.11’de verildiği gibidir.



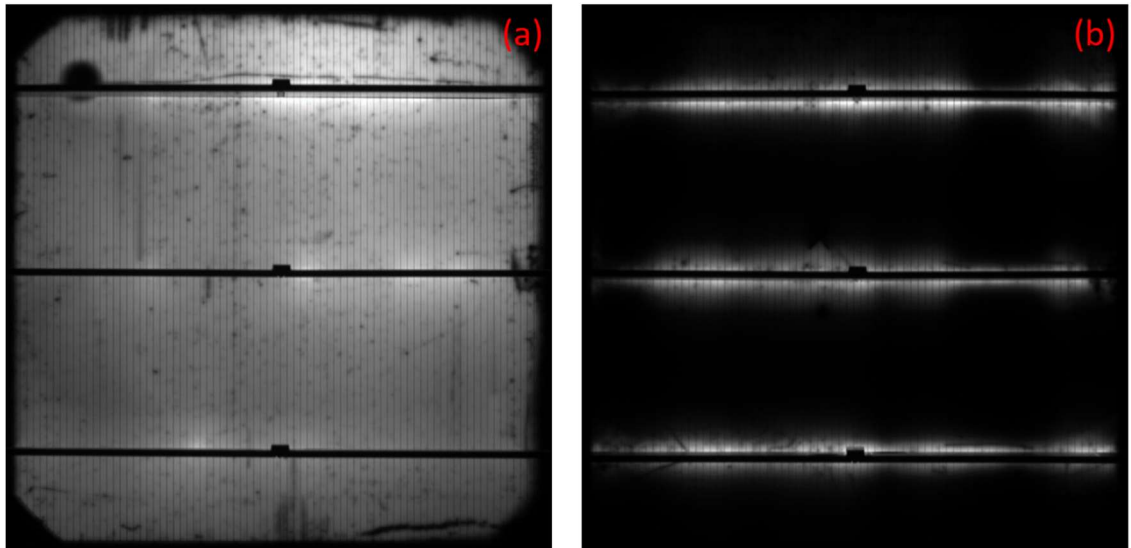
Fotoğraf 5.11. Maske yardımıyla gerçekleştirilen PVD ön yüz metalizasyon işleminde kullanılan metal maske

Maske yardımı ile PVD yönteminin uygulanmasının şematik gösterimi Şekil 5.9’da gösterildiği gibidir. Şekilden anlaşıldığı üzere maske kaplama yapılacak olan hücre üzerine yerleştirilmiş ve lazer kesim yardımıyla finger hatlarının belirlendiği maske açıklıklarından hedef malzeme atomları geçip hücre üzerinde birikmiştir.

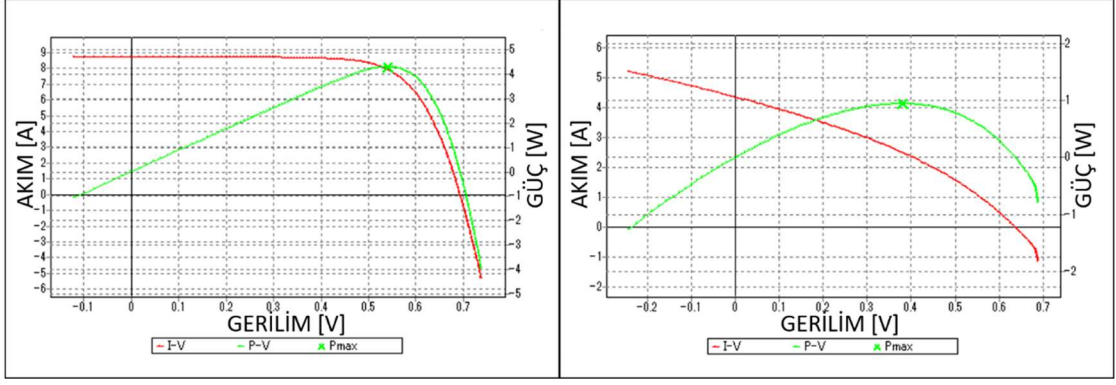


Şekil 5.9. PVD sisteminde maske kullanımının detaylı şematik gösterimi

Arka yüzey kaplamadan tek farkı maske kullanımı olan bu yöntem sayesinde PVD yönteminin ön yüzeye uygulanması gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile üretilen ilk hücrenin verim değeri %17,7 olarak ölçülmüştür. Optimizasyonu henüz tamamlanmamış bu yöntem için gayet yüksek bir verim değerinin elde edilmesi yöntemin ön yüz metalizasyon işleminde kullanılabilirliğini göstermesi açısından önemlidir. Fakat birkaç uygulama sonucunda yüzeydeki finger desenlerinde kesikli yapılar görülmüş ve en son üretilen hücrenin verim değeri %3,9 seviyelerine düşmüştür. İlk ve son üretilen hücrelerin EL görüntüsü Şekil 5.10’da verildiği gibidir. Ayrıca ilk ve son üretilen hücelere ait I-V eğrileri Şekil 5.11’de verilmiştir.

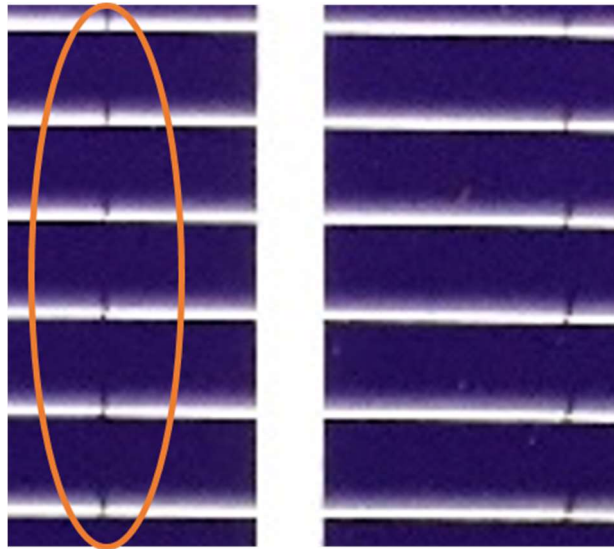


Şekil 5.10. Maske yardımıyla gerçekleştirilen PVD ön yüz metalizasyon işlemi ile üretilen hücrelerin EL görüntüleri; ilk üretilen %17,7 verim değerine sahip hücre (a) son üretilen %3,9 verim değerine sahip hücre (b)



Şekil 5.11. Maske yardımıyla gerçekleştirilen PVD ön yüz metalizasyon işlemi ile üretilen hücrelerin I-V eğrileri: ilk üretilen %17,7 verim değerine sahip hücre (a) son üretilen %3,9 verim değerine sahip hücre (b)

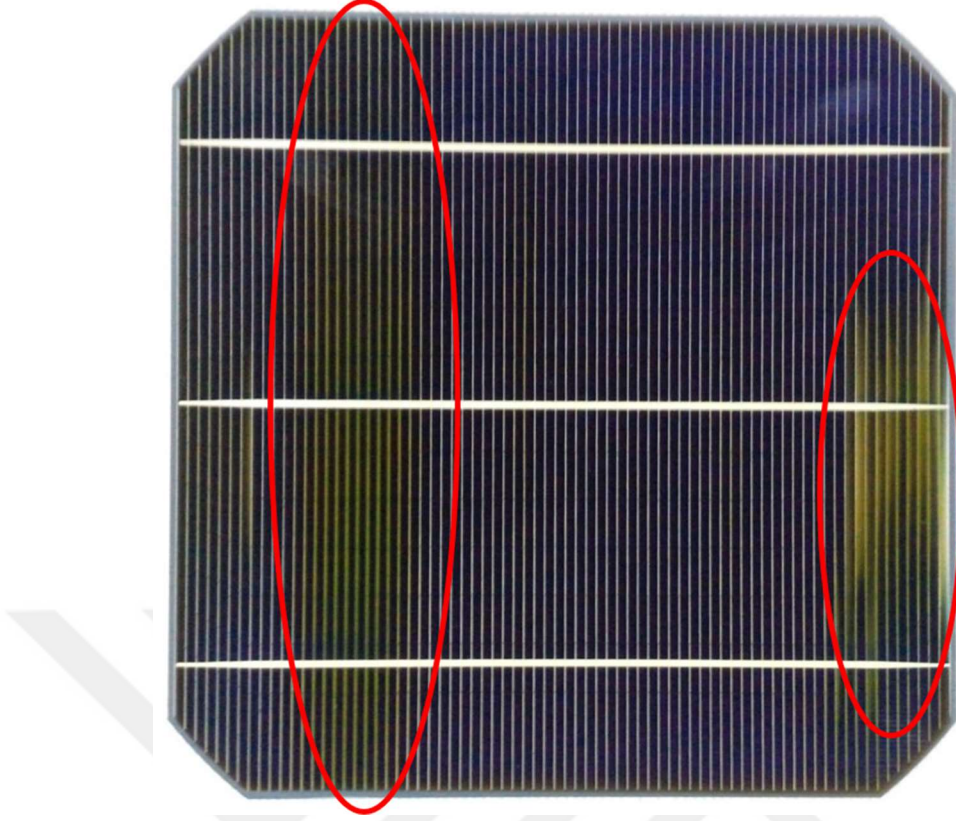
Son hücrenin metalizasyon işlemi, EL görüntüsünden anlaşılabileceği üzere fingera sahip olmayıp sadece busbara sahip olan bir hücre görüntüsü vermektedir. Ancak hücre üzerinde Şekil 5.12’de görüldüğü gibi fingerlar mevcuttur fakat burada kesikli yapı sebebiyle fingerlar topladığı akımı busbara iletememektedir. Maske açıklıklarının 90 mikron olması nedeniyle birkaç kaplama sonrası açıklıkların tıklandığı anlaşılmıştır. Maskelerin tekrar kullanımı için temizlik işlemi şarttır. Fakat maske malzemesinin ve kaplanan malzemenin metal olması sebebiyle HNO_3 gibi metallerin çözündürülmesinde kullanılan kimyasal bir solüsyon kullanılamamıştır. Temizleme işleminde alkol tarzı bir kimyasal solüsyon kullanımı hassas olan maske üzerine güç uygulanması gerektirdiğinden ötürü maskeyi kullanışsız hale getireceği için bu tarz bir uygulamada gerçekleştirilememiştir.



Şekil 5.12. PVD yöntemi ile kaplanan kesikli finger

PVD yönteminin serigrafik baskı yöntemine göre birkaç avantajının olduğu düşünülebilir bunlar;

- Serigrafik baskı yönteminde kullanılan gümüş pasta içerisinde katkı malzemelerinin bulunması nedeniyle iletim ve direnç değerleri saf gümüş gibi değildir. Fakat PVD ile kaplanan gümüş atom atom biriktiğinden neredeyse saf gümüş özelliği gösterir. Bu da daha iyi bir iletkenlik ve daha düşük bir direnç sağlar.
- Serigrafik baskı yöntemi ile yapılan metalizasyon işleminde gümüş pasta akışkanlığı sebebiyle yayılma gösterir. Fakat PVD yöntemi ile bu tarz bir yayılma olmayacak ve istenilen genişlik tam olarak hücre yüzeyinde gerçekleştirilecektir. Ayrıca PVD yöntemi ile finger kalınlığının 200 nm dolaylarında kaplanması sayesinde maliyette oldukça düşecektir.
- PVD yöntemi ile ön yüz metalizasyon işleminin yapılması ile serigrafik baskı cihazı gibi ek bir cihaz kullanımına gerek kalmayacağından tek bir cihazla hem ön hem arka metalizasyon işlemi yapılabilecektir.
- Dezavantaj olarak kullanılan hassas maskenin temizliğinin zor olması sayılabilir. Ayrıca Fotoğraf 5.12 PVD ile ön yüz metalizasyonu gerçekleştirilen hücreyi göstermektedir. Fotoğrafta görüldüğü gibi maske hücre yüzeyinde istenmeyen gölgeleme sorunlarına sebep olmuştur. Maskenin çok ince olması bu tarz sorunları beraberinde getirdiği gibi çok kalın bir maske kullanımı kaplama yapılmasının önüne geçecektir. Bu açıdan kullanılan maskenin kalınlığının optimizasyonunda gereklidir.



Fotoğraf 5.12. Maske yardımıyla gerçekleştirilen PVD ön yüz metalizasyon işlemi ile üretilen hücredeki gölgeleme sorunları

5.4 Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Fosil yakıtların her geçen gün rezervlerinin azalmasının yanında çevreye ve insan sağlığına olan zararları ile yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerjiler içerisinde güneş enerjisinin konumu tartışmasız ön plana çıkmaktadır. Güneş enerjisi sistemlerinin verim değerinin artırılması ve maliyetinin düşürülmesi başlıca çalışma konularıdır. Bu tez kapsamında düşük maliyetli ve yüksek verimli olarak üretilen HIT güneş hücrelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca maliyet üzerinde alttaşı maliyetinden sonra en etkili maliyet unsuru olan metalizasyon işlemi tez kapsamında incelenen konu olmuştur.

HIT güneş hücresi üzerine literatürde bulunan çalışmalar incelenmiş, teknoloji ve üretimi hakkında teorik bilgiler edinilmiştir. Ayrıca literatüre uygun olarak HIT güneş hücrelerinin endüstriyel boyutta (156 mm x 156 mm) üretimi gerçekleştirilmiştir. Halihazırda yüksek verimli ve düşük maliyetli üretilen HIT güneş hücrelerinin tez kapsamında 180 mikron incelikteki alttaşı kullanımı ve metalizasyon optimizasyonu

sayesinde gümüş pasta kullanımının düşürüldüğü optimum dizaynlar sayesinde daha az maliyetle üretimi gerçekleştirilmiş ve yine optimum metalizasyon dizaynlarının kullanımı ile verim değerleri %19'lu seviyelere yükseltilmiştir.

Maliyet ve verim açısında kritik öneme sahip olan ön yüz metalizasyon işlemi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ön yüz metalizasyon dizaynının optimizasyonu ile hücre performansı için en uygun tasarım belirlenmiş ve üretilen hücrelere uygulanmıştır. Optimizasyon hesapları sonucunda 3 busbara sahip hücre dizaynları için 3 busbarlı 75 fingerlı dizayn maliyet açısından, 3 busbarlı 87 fingerlı dizayn ise verim açısından en uygun değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kullanılacak busbar sayısının ve genişliğinin optimizasyonunun yapılması sonucunda 75 finger ve 5 busbarlı (0,06 cm genişlik) dizaynın en az güç kaybı olacak tasarım olduğu görülmüştür. Bu üç tasarımın hücreye uygulanmasının ardından verim değerleri ölçülmüş ve sırasıyla %17,79, %17,96 ve %19,01 verim değerlerine sahip hücreler üretilmiştir. Üretilen hücrelerin verim değerleri yapılan optimizasyon işleminin doğruluğunu teyit etmektedir.

Ön yüz metalizasyon işleminde serigrafik baskı yöntemine alternatif olarak maske yardımı ile PVD yönteminin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ön yüz metalizasyon işleminin PVD yöntemi ile gerçekleştirildiği güneş hücresinin verim değeri %17,7 olarak ölçülmüştür. İlk alınan verim değerleri yöntemin kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Fakat birkaç kullanım sonrası maske açıklıklarının dolması sebebiyle verim düşüşleri görülmüş. Tıkanma sebebiyle metal maskenin her uygulama sonrası temizleme işlemine tabi tutulması gerektiği anlaşılmıştır. Maske malzemesinin metal ve kalınlığının çok ince olması temizleme işlemini olanaksız kılmıştır. Kuartz gibi farklı bir maske malzemesi kullanımı ile temizlik işlemi mümkün hale getirilebilir. Metal maskenin sahip olduğu dezavantajlardan dolayı endüstriyel uygulamalarda kullanımı için ARGE çalışmalarına ihtiyaç vardır. Gelecekteki çalışmalarımızda kalın akım toplayıcıların (busbar) PVD ile üretilmesi ve farklı maske malzemesi kullanımı ile metalizasyon çalışmaları HIT güneş hücresi için yapılacaktır.

KAYNAKLAR

Adachi, D., Hernández, J. L. and Yamamoto, K., "Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline silicon solar cell with 25.1% efficiency", *Applied Physics Letters* 107(23): 233506, 2015.

Adams, W. G. and Day, R., "V. The action of light on selenium", *Proceedings of the Royal Society of London* 25(171-178): 113-117, 1877.

Aguilar, A., Herasimenka, S. Y., Karas, J., Jain, H., Lee, J., Munoz, K., Michaelson, L., Tyson, T., Dauksher, W. J. and Bowden, S., "Development of Cu plating for silicon heterojunction solar cells", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2016 IEEE 43rd*, 2016.

Akova, İ., "Dünya Enerji Sorunu ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı", *Coğrafya Dergisi* (11)2003.

Ali, K., Khan, S. A. and Jafri, M. Z. M., "Structural and optical properties of ITO/TiO₂ anti-reflective films for solar cell applications", *Nanoscale research letters* 9(1): 175, 2014.

Angermann, H., "Passivation of structured p-type silicon interfaces: Effect of surface morphology and wet-chemical pre-treatment", *Applied Surface Science* 254(24): 8067-8074, 2008.

ASTM G173-03, Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37 tilted surface, **PA: ASTM International**, West Conshohocken, United States, 2003

Balasundaraprabhu, R., Monakhov, E., Muthukumarasamy, N., Nilsen, O. and Svensson, B., "Effect of heat treatment on ITO film properties and ITO/p-Si interface", *Materials Chemistry and Physics* 114(1): 425-429, 2009.

Ballif, C., Descoeudres, A., Despeisse, M. and De Wolf, S., "Advances in crystalline silicon heterojunction research and opportunities for low manufacturing costs", *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd*, 2015.

Barrio, R., González, N., Cárabe, J. and Gandía, J. J., "Optimisation of NaOH texturisation process of silicon wafers for heterojunction solar-cells applications", *Solar energy* 86(3): 845-854, 2012.

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

Beaucarne, G., Hoornstra, J. and Schubert, G., "Lessons from the 2nd workshop on metallization of crystalline silicon solar cells", *Futur. Photovolt* 2010.

Beaucarne, G., Schubert, G. and Hoornstra, J., "Summary of the 5th workshop on metallization for crystalline silicon solar cells", *Energy Procedia* 67: 2-12, 2015.

Beaucarne, G., Schubert, G., Tous, L. and Hoornstra, J., "Summary of the 6th Workshop on Metallization and Interconnection for Crystalline Silicon Solar Cells", *Energy Procedia* 98: 2-11, 2016.

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): 1, 1839.

Bender, M., Seelig, W., Daube, C., Frankenberger, H., Ocker, B. and Stollenwerk, J., "Dependence of oxygen flow on optical and electrical properties of DC-magnetron sputtered ITO films", *Thin Solid Films* 326(1-2): 72-77, 1998.

Biswas, P. K., De, A., Dua, L. and Chkoda, L., "Work function of sol-gel indium tin oxide (ITO) films on glass", *Applied Surface Science* 253(4): 1953-1959, 2006.

Black, L. E., New perspectives on surface passivation: Understanding the Si-Al₂O₃ interface, **Springer**, 2016.

Boonyopakorn, N., Sripongpan, N., Thanachayanont, C. and Dangtip, S., "Effects of substrate temperature and vacuum annealing on properties of ITO films prepared by radio-frequency magnetron sputtering", *Chinese Physics Letters* 27(10): 108103, 2010.

Burgers, A. R., New metallisation patterns and analysis of light trapping for silicon solar cells, **Energieonderzoek Centrum Nederland**, 2005.

Caballero, L. J., Contact definition in industrial silicon solar cells, **InTech**, 2010.

Cahyono, Y., Maslakah, U., Muttaqin, F. D. and Darminto, "Reduced energy bandgap of a-Si: H films deposited by PECVD at elevating temperatures", *AIP Conference Proceedings*, 2017.

Chapin, D. M., Fuller, C. and Pearson, G., "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power", *Journal of Applied Physics* 25(5): 676-677, 1954.

Chu, A., Wang, J., Tsai, Z. and Lee, C., "A simple and cost-effective approach for fabricating pyramids on crystalline silicon wafers", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 93(8): 1276-1280, 2009.

Clement, C., Bell, H., Vogg, F., Rebenklau, L., Gierth, P. and Partsch, U., "Inert drying system for copper paste application in PV", *Energy Procedia* 38: 423-429, 2013.

Conibeer, G., "Third-generation photovoltaics", *Materials today* 10(11): 42-50, 2007.

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

Demircioğlu, O., Optimization of Metalization in Crystalline Silicon Solar Cells, *Middle East Technical University*, 2012

Descoeudres, A., Barraud, L., Bartlome, R., Choong, G., De Wolf, S., Zicarelli, F. and Ballif, C., "The silane depletion fraction as an indicator for the amorphous/crystalline silicon interface passivation quality", *Applied Physics Letters* 97(18): 183505, 2010.

Descoeudres, 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, 2011.

Drabczyk, K. and Panek, P., "Influence of screen printing parameters on the front metallic electrodes geometry of solar cells", *Circuit World* 40(1): 23-26, 2014.

Dupré, O., Vaillon, R. and Green, M. A., Thermal behavior of photovoltaic devices: physics and engineering, **Springer**, 2016.

Ebong, A., Cooper, I. B., Rounsaville, B., Rohatgi, A., Dovrat, M., Kritchman, E., Brusilovsky, D. and Benichou, A., "On the ink jetting of full front Ag gridlines for cost-effective metallization of Si solar cells", *IEEE Electron Device Letters* 33(5): 637-639, 2012.

Energytrend, <https://pv.energytrend.com/pricequotes.html>, 2017.

Fahrner, W. R., Amorphous silicon/crystalline silicon heterojunction solar cells, **Springer**, 2013.

Franklin, E., Fong, K., McIntosh, K., Fell, A., Blakers, A., Kho, T., Walter, D., Wang, D., Zin, N. and Stocks, M., "Design, fabrication and characterisation of a 24.4% efficient interdigitated back contact solar cell", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 24(4): 411-427, 2016.

Fraunhofer ISE, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>, 2014.

FraunhoferISE, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>, 2017.

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

Fujishima, D., Inoue, H., Tsunomura, Y., Asaumi, T., Taira, S., Kinoshita, T., Taguchi, M., Sakata, H. and Maruyama, E., "High-performance HIT solar cells for thinner silicon wafers", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE*, 2010.

Futako, W., Yoshino, K., Fortmann, C. M. and Shimizu, I., "Wide band gap amorphous silicon thin films prepared by chemical annealing", *Journal of Applied Physics* 85(2): 812-818, 1999.

Geissbühler, J., De Wolf, S., Faes, A., Badel, N., Jeangros, Q., Tomasi, A., Barraud, L., Descoedres, A., Despeisse, M. and Ballif, C., "Silicon heterojunction solar cells with copper-plated grid electrodes: status and comparison with silver thick-film techniques", *IEEE Journal of Photovoltaics* 4(4): 1055-1062, 2014.

Gizachew, Y., Escoubas, L., Simon, J., Pasquinelli, M., Loiret, J., Leguen, P., Jimeno, J., Martin, J., Apraiz, A. and Aguerre, J., "Towards ink-jet printed fine line front side metallization of crystalline silicon solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95: S70-S82, 2011.

Goetzberger, A., Knobloch, J. and Voss, B., Crystalline silicon solar cells, **Wiley Online Library**, 1998.

Green, M. A., "Solar cells: operating principles, technology, and system applications", 1982.

Green, M. A., Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion, 12, **Springer Science & Business Media**, 2006.

Green, M. A., "The path to 25% silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17(3): 183-189, 2009.

Green, M. A., Blakers, A. W., Shi, J., Keller, E. M. and Wenham, S. R., "High-efficiency silicon solar cells", *IEEE Transactions on Electron Devices* 31(5): 679-683, 1984.

Green, M. A., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J. and Ho-Baillie, A. W., "Solar cell efficiency tables (version 50)", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 25(7): 668-676, 2017.

Greenpeace, E., <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf>, "Solar generation 6. Solar photovoltaic electricity empowering the world, Greenpeace Report." 2011.

Haedrich, I., Eitner, U., Wiese, M. and Wirth, H., "Unified methodology for determining CTM ratios: Systematic prediction of module power", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 131: 14-23, 2014.

Hall, R. N., "Electron-hole recombination in germanium", *Physical review* 87(2): 387, 1952.

Hamakawa, Y., Fujimoto, K., Okuda, K., Kashima, Y., Nonomura, S. and Okamoto, H., "New types of high efficiency solar cells based on a-Si", *Applied Physics Letters* 43(7): 644-646, 1983.

Han, Y., Kim, D., Cho, J.-S., Koh, S.-K. and Song, Y. S., "Tin-doped indium oxide (ITO) film deposition by ion beam sputtering", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 65(1-4): 211-218, 2001.

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.

Hanyecz, I., Budai, J., Szilágyi, E. and Tóth, Z., "Characterization of pulsed laser deposited hydrogenated amorphous silicon films by spectroscopic ellipsometry", *Thin Solid Films* 519(9): 2855-2858, 2011.

Harrison, S., Nos, O., D'Alonzo, G., Denis, C., Coll, A. and Munoz, D., "Back contact heterojunction solar cells patterned by laser ablation", *Energy Procedia* 92: 730-737, 2016.

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.

Haynes, W. M., CRC handbook of chemistry and physics, **CRC press**, 2014.

Haynos, J., Allison, J., Arndt, R. and Meulenberg, A., "The COMSAT nonreflective silicon solar cell: a second generation improved cell", *Int. Conf. on Photovoltaic Power Generation*, 1974.

He, B., Zhao, L., Xu, J., Xing, H., Xue, S. and Jiang, M., "Influence of Substrate Temperature on Structural, Electrical and Optical Properties of ITO thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering", *Surface review and letters* 20(05): 1350045, 2013.

Her, S.-C. and Chang, C.-F., "Effect of sputtering power on optical and electrical properties of indium tin oxide films", *Sensors and Materials* 28(9): 975-981, 2016.

Hilali, M. M., Understanding and development of manufacturable screen-printed contacts on high sheet-resistance emitters for low-cost silicon solar cells, 2005

Honsberg, C. and Bowden, S., "Surface Texturing", *PVEducation.org* 2015.

Hossain, M., Abu-Safe, H. H., Naseem, H. and Brown, W. D., "Characterization of hydrogenated amorphous silicon thin films prepared by magnetron sputtering", *Journal of Non-Crystalline Solids* 352(1): 18-23, 2006.

Hörteis, M. and Glunz, S. W., "Fine line printed silicon solar cells exceeding 20% efficiency", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16(7): 555-560, 2008.

Hussain, S. Q., Oh, W.-K., Ahn, S., Le, A. H. T., Kim, S., Lee, Y. and Yi, J., "RF magnetron sputtered indium tin oxide films with high transmittance and work function for a-Si: H/c-Si heterojunction solar cells", *Vacuum* 101: 18-21, 2014.

IEC Standard 60904-3, Measurement Principles for Terrestrial PV Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data, **International Electrotechnical Commission**, Geneva, Switzerland, 2008

Iencinella, D., Centurioni, E., Rizzoli, R. and Zignani, F., "An optimized texturing process for silicon solar cell substrates using TMAH", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 87(1-4): 725-732, 2005.

Inoue, H., Tsunomura, Y., Fujishima, D., Yano, A., Taira, S., Ishikawa, Y., Nishiwaki, T., Nakashima, T., Asaumi, T. and Taguchi, M., "Improving the conversion efficiency and decreasing the thickness of the HIT solar cell", *MRS Online Proceedings Library Archive* 12102009.

ITRPV,
www.itrpv.net/cm4all/iproc.php/ITRPV%20Eighth%20Edition%202017.pdf?cdp=a, 2017.

Jadkar, S., Sali, J., Funde, A., Bakr, N. A., Vidyasagar, P., Hawaldar, R. and Amalnerkar, D., "Deposition of hydrogenated amorphous silicon (a-Si: H) films by hot-wire chemical vapor deposition (HW-CVD) method: Role of substrate temperature", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91(8): 714-720, 2007.

Jäger, K., Isabella, O., Van Swaaij, R. and Zeman, M., "Solar Energy Fundamentals", *Technology, and Systems*: 28-35, 2014.

Kalogirou, S., McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, **Academic Press**, 2017.

Kaneka, <http://www.kaneka.co.jp/en/service/news/nr201708252/>, 2017.

KanekaModule, http://www.kaneka.co.jp/wp-kaneka/wp-content/uploads/2017/06/1479120629_101.pdf, 2017.

Kasap, S. O., Principles of electronic materials and devices, 2, **McGraw-Hill New York**, 2006.

Keleşoğlu, E., "Sert Kaplamalar", ***İstanbul, 131s, İstanbul*** 2011.

Kern, W., "The evolution of silicon wafer cleaning technology", ***Journal of the Electrochemical Society*** 137(6): 1887-1892, 1990.

Kerr, M. J. and Cuevas, A., "General parameterization of Auger recombination in crystalline silicon", ***Journal of Applied Physics*** 91(4): 2473-2480, 2002.

Khanna, A., Advanced Metallisation Methods for Monocrystalline Silicon Wafer Solar Cells, 2015

Kurdesau, F., Khripunov, G., Da Cunha, A., Kaelin, M. and Tiwari, A., "Comparative study of ITO layers deposited by DC and RF magnetron sputtering at room temperature", ***Journal of Non-Crystalline Solids*** 352(9-20): 1466-1470, 2006.

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

Lammert, M. D. and Schwartz, R. J., "The interdigitated back contact solar cell: a silicon solar cell for use in concentrated sunlight", ***IEEE Transactions on Electron Devices*** 24(4): 337-342, 1977.

Lee, S. H., "Review of the potential of the Ni/Cu plating technique for crystalline silicon solar cells", *Materials* 7(2): 1318-1341, 2014.

Lee, Y., Han, S., Kim, S., Iftiquar, S. M., Lee, Y.-J., Yoo, J., Dao, V. A. and Yi, J., "Performance of hetero junction with intrinsic thin-layer solar cell depending upon contact resistivity of front electrode", *Journal of Photonics for Energy* 4(1): 043094, 2014.

Lindmayer, J. and Allison, J., "Violet cell: an improved silicon solar cell", *COMSAT Tech. Rev.:(United States)* 3(1)1973.

Liu, J., Yao, Y., Xiao, S. and Gu, X., "Review of status developments of high-efficiency crystalline silicon solar cells", *Journal of Physics D: Applied Physics* 51(12): 123001, 2018.

Mahmoud Al, A. and Lahlouh, B., "Silicon Pyramid Structure as a Reflectivity Reduction Mechanism", *Journal of Applied Sciences* 17: 374-383, 2017.

Maruyama, T. and Fukui, K., "Indium-tin oxide thin films prepared by chemical vapor deposition", *Journal of Applied Physics* 70(7): 3848-3851, 1991.

Masuko, K., Shigematsu, M., Hashiguchi, T., Fujishima, D., Kai, M., Yoshimura, N., Yamaguchi, T., Ichihashi, Y., Mishima, T. and Matsubara, N., "Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell", *IEEE Journal of Photovoltaics* 4(6): 1433-1435, 2014.

Meier, D., Good, E., Garcia, R., Bingham, B., Yamanaka, S., Chandrasekaran, V. and Bucher, C., "Determining components of series resistance from measurements on a finished cell", *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, 2006.

Meier, D. L., Chandrasekaran, V., Gupta, A., Yelundur, V. and Rohatgi, A., "Silver contact grid: inferred contact resistivity and cost minimization in 19% silicon solar cells", *IEEE Journal of Photovoltaics* 3(1): 199-205, 2013.

Meier, D. L. and Schroder, D. K., "Contact resistance: Its measurement and relative importance to power loss in a solar cell", *IEEE Transactions on Electron Devices* 31(5): 647-653, 1984.

Meng, F., Liu, J., Shen, L., Shi, J., Han, A., Zhang, L., Liu, Y., Yu, J., Zhang, J. and Zhou, R., "High-quality industrial n-type silicon wafers with an efficiency of over 23% for Si heterojunction solar cells", *Frontiers in Energy* 11(1): 78-84, 2017.

Meng, L.-j. and Dos Santos, M., "Properties of indium tin oxide films prepared by rf reactive magnetron sputtering at different substrate temperature", *Thin Solid Films* 322(1-2): 56-62, 1998.

Mertens, K., Photovoltaics: fundamentals, technology and practice, **John Wiley & Sons**, 2013.

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

Munoz, 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.

Nakamura, J., Asano, N., Hieda, T., Okamoto, C., Katayama, H. and Nakamura, K., "Development of heterojunction back contact Si solar cells", *IEEE Journal of Photovoltaics* 4(6): 1491-1495, 2014.

NASA, <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1958-002B>, 2018.

NREL, <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>, 2017.

Ohl, R. S., Light-sensitive electric device including silicon, USA, No: 2443542 dated 27.05.1941, 1941

Ohshita, Y., Kamioka, T. and Nakamura, K., "Technology Trend of High Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells", *AAPPS Bulletin* 27(3)2017.

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.

PanasonicModule, <https://news.panasonic.com/global/press/data/2016/03/en160302-2/en160302-2.html>, 2017.

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.

Papet, P., Nichiporuk, O., Kaminski, A., Rozier, Y., Kraiem, J., Lelievre, J.-F., Chaumartin, A., Fave, A. and Lemiti, M., "Pyramidal texturing of silicon solar cell with TMAH chemical anisotropic etching", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90(15): 2319-2328, 2006.

Paviet-Salomon, B., Tomasi, A., Descoeurdes, A., Barraud, L., Nicolay, S., Despeisse, M., De Wolf, S. and Ballif, C., "Back-contacted silicon heterojunction solar cells: optical-loss analysis and mitigation", *IEEE Journal of Photovoltaics* 5(5): 1293-1303, 2015.

Pearsall, N., The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment, **Woodhead Publishing**, 2016.

Petroleum, B., (2017), "BP statistical review of world energy", London: British Petroleum.

Poortmans, J. and Arkhipov, V., Thin film solar cells: fabrication, characterization and applications, 5, **John Wiley & Sons**, 2006.

Raoufi, D., "Morphological characterization of ITO thin films surfaces", *Applied Surface Science* 255(6): 3682-3686, 2009.

Richter, A., Hermle, M. and Glunz, S. W., "Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells", *IEEE Journal of Photovoltaics* 3(4): 1184-1191, 2013.

Rosa-Clot, M. and Tina, G. M., Submerged and Floating Photovoltaic Systems: Modelling, Design and Case Studies, **Academic Press**, 2017.

Rostan, P. J., "a-Si: H/c-Si heterojunction front-and back contacts for silicon solar cells with p-type base", 2010.

Ryu, K. S., Development of low-cost and high-efficiency commercial size n-type silicon solar cells, 2015

Sakata, H., Nakai, T., Baba, T., Taguchi, M., Tsuge, S., Uchihashi, K. and Kiyama, S., "20.7% highest efficiency large area (100.5 cm²) HIT/sup TM/cell", *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, 2000.

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.

Sawada, T., Terada, N., Tsuge, S., Baba, T., Takahama, T., Wakisaka, K., Tsuda, S. and Nakano, S., "High-efficiency a-Si/c-Si heterojunction solar cell", *Photovoltaic Energy Conversion, 1994., Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1994, 1994 IEEE First World Conference on*, 1994.

Schubert, G., Beaucarne, G., Tous, L. and Hoornstra, J., "The Future of Metallization and Interconnection—Forecast of Experts of the 6th Metallization Workshop", *Energy Procedia* 98: 12-22, 2016.

Schulze, T., Beushausen, H., Leendertz, C., Dobrich, A., Rech, B. and Korte, L., "Interplay of amorphous silicon disorder and hydrogen content with interface defects in amorphous/crystalline silicon heterojunctions", *Applied Physics Letters* 96(25): 252102, 2010.

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.

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.

Shockley, W. and Read Jr, W., "Statistics of the recombinations of holes and electrons", *Physical review* 87(5): 835, 1952.

Smith, D. D., Reich, G., Baldrias, M., Reich, M., Boitnott, N. and Bunea, G., "Silicon solar cells with total area efficiency above 25%", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2016 IEEE 43rd*, 2016.

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

Solanki, C. S. and Singh, H. K., Anti-reflection and Light Trapping in C-Si Solar Cells, **Springer**, 2017.

Spellman, F. R., Environmental impacts of renewable energy, **CRC press**, 2014.

Stang, J.-C., Haschke, J., Mews, M., Merkle, A., Peibst, R., Rech, B. and Korte, L., "Aluminium metallisation for interdigitated back-contact silicon heterojunction solar cells", *Japanese Journal of Applied Physics* 56(8S2): 08MB22, 2017.

Strahm, B., Lachenal, D., Bätzner, D., Frammelsberger, W., Legradic, B., Meixenberger, J., Papet, P., Wahli, G., Vetter, E. and Despeisse, M., "The Swiss Inno-HJT project: fully integrated R&D to boost Si-HJT module performance", **29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, 2014.

Street, R., "Hydrogenated Amorphous Silicon (Cambridge Solid State Science Series)", 1991.

Tabata, O., Asahi, R., Funabashi, H., Shimaoka, K. and Sugiyama, S., "Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions", **Sensors and Actuators A: Physical** 34(1): 51-57, 1992.

Taguchi, M., "Improvement of the conversion efficiency of polycrystalline silicon thin film solar cell", **proc. of Fifth PVSEC, 1990, Florida** 1990.

Taguchi, M., Kawamoto, K., Tsuge, S., Baba, T., Sakata, H., Morizane, M., Uchihashi, K., Nakamura, N., Kiyama, S. and Oota, O., "HITTM cells—high-efficiency crystalline Si cells with novel structure", **Progress in Photovoltaics: Research and Applications** 8(5): 503-513, 2000.

Taguchi, M., Tsunomura, Y., Inoue, H., Taira, S., Nakashima, T., Baba, T., Sakata, H. and Maruyama, E., "High efficiency HIT solar cell on thin ($< 100\ \mu\text{m}$) silicon wafer", **Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, 2009.

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.

Tanaka, M., Okamoto, S., Tsuge, S. and Kiyama, S., "Development of HIT solar cells with more than 21% conversion efficiency and commercialization of highest performance HIT modules", **Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on**, 2003.

Tanaka, M., Taguchi, M., Matsuyama, T., Sawada, T., Tsuda, S., Nakano, S., Hanafusa, H. and Kuwano, Y., "Development of new a-Si/c-Si heterojunction solar cells: ACJ-HIT (artificially constructed junction-heterojunction with intrinsic thin-layer)", *Japanese Journal of Applied Physics* 31(11R): 3518, 1992.

Terzini, E., Thilakan, P. and Minarini, C., "Properties of ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering at elevated substrate temperature", *Materials Science and Engineering: B* 77(1): 110-114, 2000.

Tohoda, S., Fujishima, D., Yano, A., Ogane, A., Matsuyama, K., Nakamura, Y., Tokuoka, N., Kanno, H., Kinoshita, T. and Sakata, H., "Future directions for higher-efficiency HIT solar cells using a thin silicon wafer", *Journal of Non-Crystalline Solids* 358(17): 2219-2222, 2012.

Tokuhisa, H., Yoshida, M., Itoh, U., Sumita, I., Sekine, S. and Kamata, T., "Glass-fritless Cu alloy pastes for silicon solar cells requiring low temperature sintering", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE*, 2011.

Tomasi, A., Paviet-Salomon, B., Lachenal, D., de Nicolas, S. M., Descoeur, A., Geissbühler, J., De Wolf, S. and Ballif, C., "Back-contacted silicon heterojunction solar cells with efficiency > 21%", *IEEE Journal of Photovoltaics* 4(4): 1046-1054, 2014.

Tsunomura, Y., Yoshimine, Y., Taguchi, M., Baba, T., Kinoshita, T., Kanno, H., Sakata, H., Maruyama, E. and Tanaka, M., "Twenty-two percent efficiency HIT solar cell", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 93(6-7): 670-673, 2009.

Tucci, M., De Rosa, R. and Roca, F., "CF₄/O₂ dry etching of textured crystalline silicon surface in a-Si: H/c-Si heterojunction for photovoltaic applications", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 69(2): 175-185, 2001.

Tucci, M., Salurso, E., Roca, F. and Palma, F., "Dry cleaning process of crystalline silicon surface in a-Si: H/c-Si heterojunction for photovoltaic applications", *Thin Solid Films* 403: 307-311, 2002.

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

Van Sark, W. G., Methods of deposition of hydrogenated amorphous silicon for device applications, **Elsevier**, 2002.

Vazsonyi, E., De Clercq, K., Einhaus, R., Van Kerschaver, E., Said, K., Poortmans, J., Szlufcik, J. and Nijs, J., "Improved anisotropic etching process for industrial texturing of silicon solar cells", ***Solar Energy Materials and Solar Cells*** 57(2): 179-188, 1999.

Wakisaka, K., Taguchi, M., Sawada, T., Tanaka, M., Matsuyama, T., Matsuoka, T., Tsuda, S., Nakano, S., Kishi, Y. and Kuwano, Y., "More than 16% solar cells with a new 'HIT' (doped a-Si/nondoped a-Si/crystalline Si) structure", ***Photovoltaic Specialists Conference, 1991., Conference Record of the Twenty Second IEEE***, 1991.

Willeke, G. P. and Weber, E. R., Advances in photovoltaics, 89, **Newnes**, 2013.

Yoshida, M., Tokuhisa, H., Itoh, U., Kamata, T., Sumita, I. and Sekine, S., "Novel low-temperature-sintering type Cu-alloy pastes for silicon solar cells", ***Energy Procedia*** 21: 66-74, 2012.

Yoshikawa, K., Kawasaki, H., Yoshida, W., Irie, T., Konishi, K., Nakano, K., Uto, T., Adachi, D., Kanematsu, M. and Uzu, H., "Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%", ***Nature Energy*** 2: 17032, 2017a.

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, 2017b.

Zhang, B., "Influence of oxygen flow rate on microstructural, electrical and optical properties of indium tin tantalum oxide films", ***Materials Science in Semiconductor Processing*** 13(5-6): 411-416, 2010.

Zheng, J. and Kwok, H. S., "Preparation of indium tin oxide films at room temperature by pulsed laser deposition", *Thin Solid Films* 232(1): 99-104, 1993.

Zhu, F., Huan, C., Zhang, K. and Wee, A., "Investigation of annealing effects on indium tin oxide thin films by electron energy loss spectroscopy", *Thin Solid Films* 359(2): 244-250, 2000.



ÖZGEÇMİŞ

Tolga ALTAN 23.01.1991 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Niğde’de tamamladı. 2010 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Haziran 2015’de mezun oldu. Yine aynı yıl içerisinde Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği tezli yüksek lisans programına başladı. Nisan 2017’de C sınıfı iş sağlığı ve güvenliği uzmanı belgesi aldı. Ocak 2018’de Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı Araştırma görevlisi alımı için yapılan sınavda başarılı olmuştur.

Laboratuvar deneyimi olarak PVD, PECVD ile malzeme üretimi yapabilmekte ve Serigrafik Baskı, Güneş Simülatörü, Elektrolüminesans, Fotolüminesans, Yaşam Süresi Ölçümü, Dört Nokta Direnç Ölçümü ve Profilometre gibi karakterizasyon cihazlarını kullanabilmektedir.

Bilim dalında ilgi alanları Güneş enerjisi teknolojileri, Hidrojen enerjisi teknolojileri, Nanoteknoloji ve Programlama üzerinedir.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet ulusal ve 1 (bir) adet uluslararası bildiri üretilmiştir.

Bu üretilen çalışma aşağıda sunulmuştur.

Altan, T., Alkan, M. ve A. Seyhan, A., “Front Metallization of Si-HIT Solar Cells with Screen Printing and PVD”, **13th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NANOTR-13)**, Antalya, Turkey, 2017.

Altan, T., Alkan, M. ve A. Seyhan, A., “HIT Güneş Hücresi Üretimi ve Alternatif Metalizasyon Yöntemi Kullanımı”, **6. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi (UGHEK2018)**, Eskişehir, Mayıs, 2018.

