



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

a-Si:H/c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİNDE
a-Si:H İNCE FİLM KATMANLARININ ÜZERİNE H₂ MİKTARININ ETKİSİ

ÖMER CAN ECER

Mayıs 2018

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

a-Si:H/c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİNDE
a-Si:H İNCE FİLM KATMANLARININ ÜZERİNE H₂ MİKTARININ ETKİSİ

ÖMER CAN ECER

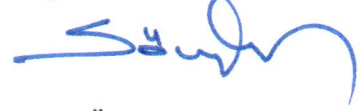
Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN

Mayıs 2018

Ömer Can ECER tarafından Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN danışmanlığında hazırlanan “a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Hücrelerinde a-Si:H İnce Film Katmanlarının Üzerine H₂ Miktarının Etkisi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Savaş SÖNMEZOĞLU, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Recep ZAN, 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.



Ömer Can ECER

ÖZET

a-Si:H/c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİNDE a-Si:H İNCE FİLM KATMANLARININ ÜZERİNE H₂ MİKTARININ ETKİSİ

ECER, Ömer Can

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN

Mayıs 2018, 67 sayfa

Güneş hücresi, güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen fotovoltaik aygıtlardır. Günümüz popüler araştırma konularından birisi olan c-Si heteroeklem (HIT) güneş hücreleri yenilikçi ve maliyet verimli olmalarının yanı sıra ticari kullanıma en uygun aday durumundadırlar. Bu tez çalışmasında c-Si heteroeklem (HIT) güneş hücresinde a-Si:H katmanının optik özelliklerinin geliştirilerek daha yüksek verimli c-Si:HIT güneş hücresi üretimi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda a-Si:H katmanlarının üretiminde kullanılan H₂ plazma parametreleri değiştirilerek belirlenen amaç doğrultusunda %19.78 verimli c-Si:HIT güneş hücresi üretilmiştir.

Anahtar Sözcükler: c-Si:HIT güneş hücresi, a-Si:H ince filmler, pasivasyon

SUMMARY

THE EFFECTS OF H₂ CONTENT IN a-Si:H THIN FILMS ON a-Si:H/c-Si HETEROJUNCTION SOLAR CELLS

ECER, Ömer Can

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assistant Prof. Ayşe SEYHAN

May 2018, 67 Pages

Solar cell is a photovoltaic device that convert sunlight directly into electricity. c-Si:HIT, one of the most popular research topics in recent years, is innovative, cost-efficient and the best candidate for commercial applications. The aim of this thesis was to increase the efficiency of c-Si:HIT solar cells by improving the optical properties of a-Si:H thin films. As a result of successful application of optimized H₂ plasma parameters, the solar cell with 19.78% efficiency were achieved.

Keywords: c-Si:HIT solar cell, a-Si:H thin film, passivation

ÖNSÖZ

Fosil yakıtlardan elde edilen enerji pahalı olmakla birlikte çevre kirliliğine neden olmakta, insan sağlığını tehdit etmekte ve küresel ısınmaya yol açarak gelecek nesiller için yaşanılmayacak bir dünyaya sebep olmaktadır. Bu nedenle, dünyanın daha ucuz ve çevre kirliliğine neden olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçmesi bugün hayati bir sorun haline gelmiş bulunmaktadır. Güneş enerjisi, bu alternatif yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en çok bulunan ve en ucuzudur. Güneş hücrelerinin sıfır emisyonlu olması, çevreye bir zararının bulunmaması ve tamamen doğa dostu oluşu onları yenilenebilir alternatif enerji kaynakları içerisinde ön plana çıkartmaktadır. Bugün, güneş enerjisinin tüketici elektroniğinden çatı sistemlerine, güneş enerjili araçlardan yüzlerce megavatlık güneş tarlalarına kadar birçok kullanımı mevcuttur. Üzerinde yaşadığımız dünyamızı korumak, gelecek nesillere daha güzel ve yaşanabilir bir dünya bırakmak için ülkemizin ve hatta tüm dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneleceğini, yenilenebilir enerjinin geleceğimizin enerjisi olacağını ve bir birey olarak bu konuda duyarlı olmamız gerektiğini düşünmekteyim.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez çalışmam esnasında tecrübelerine başvurduğum Doç. Dr. Recep ZAN, Dr. Filiz KELEŞ ve Uzm. Esra KILAVUZ'a ve bu tezin hazırlanması esnasında sık sık yardımlarına başvurduğum kıymetli arkadaşlarım Ar. Gör. Tolga ALTAN, YL Öğrencisi Emre KARTAL ve YL Öğrencisi Ali ALTUNTEPE'ye müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi koruyuculuğumu üstlenen babam Mahmut G. ECER'e, annem Ayşe ECER'e ve kardeşlerim Aykut ve Alparslan ECER'e ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLERDİZİNİ.....	x
FOTOĞRAFLAR V.B. MALZEMELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II a-Si:H/c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRESİ.....	5
2.1 a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi.....	8
2.2 a-Si:H/c-Si Güneş Hücresi Katmanları.....	9
2.2.1 a-Si:H ince filmler.....	9
2.2.1.1 Katkılanmamış (i) a-Si:H ince filmler.....	11
2.2.1.2 Katkılanmış a-Si:H ince filmleri.....	13
2.2.1.3 a-Si:H ince filmlerinde absorpsiyon.....	14
2.2.2 Transparan iletken oksit tabaka (TCO).....	16
2.2.3 Metalizasyon.....	17
2.3 PECVD Sistemi.....	17
2.3.1 PECVD sistemi ile a-Si:H ince film biriktirmesi.....	18
2.3.2 Plazma parametreleri ve materyal özellikleri arasındaki ilişki.....	19
2.3.2.1 Plazma Gücü.....	19
2.3.2.2 Gaz akış hızı.....	20
2.3.2.3 Altaş sıcaklığı.....	20

2.3.2.4 Basınç	21
2.3.2.5 Hidrojen seyreltme oranı	21
2.4 a-Si:H ince film büyütme mekanizması.....	22
2.5 a-Si:H katkılama işlemi	24
BÖLÜM III c-Si:HIT GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİMİ İÇİN DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
3.1 a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Hücresinin PECVD Kullanılarak Üretimi: Temel Bilgiler	27
3.2 Yüksek Verimli a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Hücresi Fabrikasyonu.....	30
3.2.1 a-Si:H biriktirmesi öncesi ıslak kimyasal temizlik	31
3.2.2 H ₂ miktarının a-Si:H ince filmleri üzerine etkisinin incelenmesi	31
3.2.3 Endüstriyel boyutlu (156x156 mm) a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş hücresi üretimi.....	32
BÖLÜM IV DENEYSEL BULGULAR	34
4.1 Elipsometre	34
4.2 a-Si:H İnce Filmlerin Geçirgenlik Ölçümleri	38
4.3 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)	40
4.4 Taşıyıcı Yaşam Süresi Ölçüm.....	43
4.5 Güneş Simulatörü	46
4.6 Fotoluminesans (PL) ve Elektrolüminesans (EL).....	49
BÖLÜM V SONUÇ	53
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	66
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Alttaş kalınlığının verimliliğe etkisi (Taguchi vd., 2009)	9
Çizelge 2.2. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum malzeme özellikleri (Poortmans ve Arkhipov, 2006)	12
Çizelge 4.1. n tipi a-Si:H biriktirmesi için 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H ₂ gaz akışı için elipsometrik ölçüm sonuçları	36
Çizelge 4.2. p tipi a-Si:H biriktirmesi için 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H ₂ gaz akışı için elipsometrik ölçüm sonuçları	37
Çizelge 4.3. a-Si:H ince filmleri için muhtemel pik pozisyonları (Smets, 2002; Oever vd., 2007; Peng vd., 2009).....	41
Çizelge 4.4. n tipi a-Si:H biriktirmesi için 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H ₂ gaz akışı için azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi sonuçları.....	43
Çizelge 4.5. p tipi a-Si:H biriktirmesi için 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H ₂ gaz akışı için azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi sonuçları.....	44
Çizelge 4.6. 1 Güneş aydınlatması (1000 W/m ²) altında elde edilen güneş simulatörü verileri.....	47
Çizelge 4.7. n ve p katmanı için 500 sccm H ₂ miktarı kullanılarak üretilen güneş hücresinin, 1güneş aydınlatması (1000 W/m ²) altında elde edilen güneş simulatörü verileri	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Güneş Hücresi teknolojileri	2
Şekil 1.2. Güncel güneş hücresi teknolojileri verimlilikleri (NREL, 2018)	3
Şekil 2.1. c-Si heteroeklem güneş hücresi yapısı.....	6
Şekil 2.2. c-Si HIT güneş hücresi enerji-band diyagramı (Liu vd., 2014).....	6
Şekil 2.3. Tek kristalli silisyum (a) ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum'un (b) atomik yapısı (Fahrner, 2013).....	10
Şekil 2.4. i katmanın taşıyıcı yaşam süresine etkisi (De Wolf vd., 2012)	14
Şekil 2.5. i ve p katmanlarının kalınlıklarındaki artışın Jsc üzerindeki etkisi (De Wolf vd., 2012)	15
Şekil 2.6. SiH ₄ /H ₂ plazmasıyla a-Si:H ince film biriktirmesinin şematik olarak gösterimi (Steckelmacher, 1996)	19
Şekil 2.7. Malzeme özelliklerinin; alttaş sıcaklığının (a) ve RF gücünün (b) hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğunun değişimlerini gösteren biriktirme koşullarına bağımlılığını; film büyütme hızının (c); güç ve argon seyreltmesine bağımlılığını gösterir (Pearton, 1992).....	22
Şekil 2.8. SiH ₃ radikallerinin, hidrojen ile sonlandırılmış silisyum yüzeyi arasındaki etkileşime dayanan a-Si:H ince filmlerin biriktirmesinin standart görünümü (van Sark vd., 2012).....	23
Şekil 2.9. SiH ₃ radikalleri ile oluşan yüzey reaksiyon prosesinin genel konsepti (Matsuda, 2004)	24
Şekil 2.10. a-Si:H büyütme işleminin şematik gösterimi (Matsuda, 2004)	24
Şekil 2.11. Standart bir c-Si ağ yapısı (Honsberg ve Bowden, 2018)	25
Şekil 2.12. n tipi katkılanmış a-Si:H yapısı (Honsberg ve Bowden, 2018).....	26
Şekil 2.13. p tipi katkılanmış a-Si:H yapısı (Honsberg ve Bowden, 2018).....	26
Şekil 3.1. Tipik bir PECVD sisteminin şematik gösterimi	28
Şekil 3.2. Tipik bir PVD sisteminin şematik gösterimi	29
Şekil 3.3. Güneş hücresi üretim adımları.....	30
Şekil 4.1. n tipi a-Si:H ince film biriktirme kalınlığı ile H ₂ miktarı arasındaki ilişki.....	36
Şekil 4.2. p tipi a-Si:H ince film biriktirme kalınlığı ile H ₂ miktarı arasındaki ilişki.....	37

Şekil 4.3. n tipi a-Si:H üretiminde kullanılan hidrojen miktarı ile bant aralığı arasındaki ilişki	38
Şekil 4.4. p tipi a-Si:H üretiminde kullanılan hidrojen miktarı ile bant aralığı arasındaki ilişki	38
Şekil 4.5. n tipi a-Si:H ince film geçirgenliği ile H ₂ miktarı arasındaki ilişki.....	39
Şekil 4.6. p tipi a-Si:H ince film geçirgenliği ile H ₂ miktarı arasındaki ilişki.....	40
Şekil 4.7. Tipik bir FT-IR sisteminin şematik gösterimi	41
Şekil 4.8. n tipi a-Si:H için IR bölgesinde FT-IR ATR ile elde edilen absorpsiyon grafiği	42
Şekil 4.9. p tipi a-Si:H için IR bölgesinde FT-IT ATR ile elde edilen absorpsiyon grafiği	42
Şekil 4.10. n tipi a-Si:H ince film azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi ile H ₂ miktarı arasındaki ilişki.....	44
Şekil 4.11. p tipi a-Si:H ince film azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi ile H ₂ miktarı arasındaki ilişki.....	45
Şekil 4.12. Azınlık akım taşıyıcı yoğunluğunun, yaşam süresine olan grafiği.....	46
Şekil 4.13. Tipik bir güneş simülatörü sisteminin şematik gösterimi.....	47
Şekil 4.14. %19.78 verimli c-Si:HIT güneş hücresinin I-V karakteristiği	48
Şekil 4.15. n ve p katmanında 500 sccm H ₂ kullanılarak üretilen güneş hücresinin I-V karakteristiği	49

FOTOĞRAFLAR V.B. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde Kullanılan Meyer Burger marka PECVD/PVD sistemi.....	29
Fotoğraf 4.1. Üretilen yüksek verimli güneş hücresinin EL görüntüsü.....	50
Fotoğraf 4.2. Hücre performansına ciddi şekilde etki edebilecek bir mikro çatlakın PL görüntüsü (GreatEyes, 2017).....	50
Fotoğraf 4.3. Üretilen yüksek verimli güneş hücresinin EL görüntüsü.....	51
Fotoğraf 4.4. Metalizasyonunda ciddi sorunlar barındıran örnek bir EL görüntüsü (GreatEyes, 2017).....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Açıklama

°C	Santigrat Derece
µm	Miktometre
cm	Santimetre
cm ²	Santimetrekaire
cm ³	Santimetreküp
dk	Dakika
g	Gram
I	Akım
K	Kelvin
L	Litre
m ²	Metrekare
mm ²	Milimetrekare
ms	Milisanıye
nm	Nanometre
sa	Saat
V	Voltaj
W	Watt
τ	Azınlık Akım Taşıyıcı Yaşam Süresi

Kısaltmalar

Açıklama

µ	Mobilite
a-Si:H	Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum
CdTe	Kadmiyum Tellür
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenid
c-Si	Kristal Silisyum
c-Si:HIT	Kristal Silisyum Heteroeklem

CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
Cz	Czochralski
DC	Doğru Akım
EL	Elektrolüminesans
EQE	Dış Kuantum Verimliliği
eV	Elektron Volt
FF	Doldurma Faktörü
FT-IR	Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektroskopisi
HF	Hidroflorik Asit
HIT	Heteroeklem Katkısız İnce Katman
HJT	Heteroeklem Teknolojsi
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenit
I _{pm}	Maksimum Güç Noktasındaki Akım
IR	İnfrared
I _{sc}	Kısa Devre Akımı
ITO	İndiyum Kalay Oksit
J _{sc}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
MFC	Kütle Akış Kontrolörü
MHz	Megahertz
M _{pp}	Maksimum Güç Noktası
n	Negatif
N	Serbest Taşıyıcı Konsantrasyonu
p	Pozitif
PECVD	Plazma İle Zenginleştirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme
PL	Fotolüminesans
P _{max}	Maksimum Güç
PV	Fotovoltaik
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
RCA	Amerikan Radyo Şirketi
RF	Radyo Frekans
R _s	Seri Direnç
R _{sh}	Kısa Devre Direnci
s	Yapışma Olasılığı

scm	Dakikada Standart Kübik Santimetre
TCO	Geçirgen İletken Oksit Tabaka
TMB	Trimetil Boron
UV	Ultraviyole
VHF	Çok Yüksek Frekans
Voc	Açık Devre Voltajı
Vpm	Maksimum Güç Noktasındaki Voltaj
Xe	Zenon
β	Toplam Kayıp Olasılığı
γ	Rekombinasyon Olasılığı
Δ	Faz Değişimi
ε	Psödo Dielektrik Fonksiyonu
Ψ	Genlik

BÖLÜM I

GİRİŞ

Dünya nüfusu gün be gün artmakta ve dünyaya gelen her yeni birey enerji ihtiyacı ile dünyaya gelmektedir. Bu durum enerjiye olan talebin sürekli bir şekilde arttığını ve artacağını göstermektedir. Günümüz modern dünyasında enerji talebi gün be gün artarken yeni, alternatif enerji kaynakları bulmak artık hayati bir sorun haline gelmiş durumdadır. Dünya üzerindeki enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğu fosil yakıtlardan karşılanmakta ve fosil yakıtlar yakıldığında su ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Ek olarak bu fosil yakıtlardan elektrik enerjisi üretildiğinde atmosfere bol miktarda karbondioksit ve karbonmonoksit gibi oldukça zararlı gazlar salınması, dünyanın ısısını artırmakta ve küresel ısınmaya da neden olmaktadır. Ayrıca bu fosil yakıtların bir gün biteceği düşünüldüğünde de dünya üzerindeki yaşamın devamlılığı için, dünyanın; daha az emisyonlu, daha temiz, çevreci ve yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarına yönelmesi hayati bir sorun haline gelmiş durumdadır. Bu tez çalışmasında, alternatif enerji kaynakları içinde en umut vaat edici aday olan güneş enerjisi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Antik çağlardan beri dünyadaki yaşama hayat veren sonsuz güneş enerjisi, bu alternatif enerji kaynaklarının içerisinde en bol bulunanı ve en ucuzudur. Güneş, sonsuz bir enerji kaynağıdır ve günümüzde bilim adamları bu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için büyük çaba sarf etmektedirler.

Güneş hücreleri, güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen fotovoltaik aygıtlardır. Sıfır emisyonlu bu aygıtlar çevre kirliliğine neden olmamakla birlikte oldukça uzun ömürlüdürler.

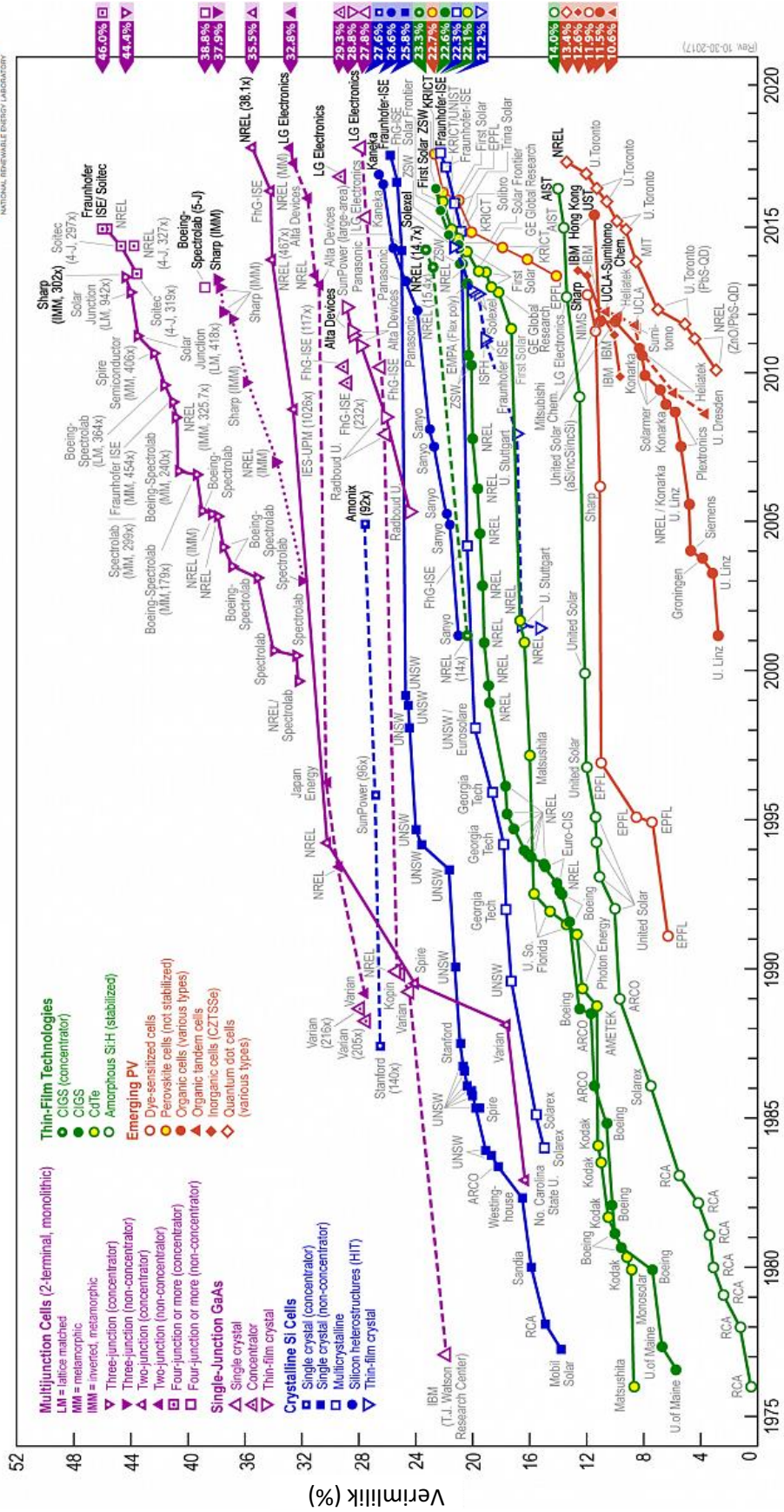
Birinci nesil güneş hücreleri yüksek üretim ve kurulum maliyetinden mustariplerdi, İkinci nesil güneş hücreleri ise daha az maliyetli polikristal yarıiletken ince filmler olarak geliştirildiler. Ancak verimlilikleri birinci nesil güneş hücrelerinden çok daha düşüktü. Üçüncü nesil güneş hücrelerinin birinci ve ikinci nesil güneş hücrelerine göre daha ekonomik ve daha yüksek verimli olmalarından dolayı güncel popüler araştırma konuları üçüncü nesil güneş hücreleri üzerine yoğunlaşmış durumdadır (Asim vd., 2012).

Fotovoltaik olarak adlandırılan, güneş enerjisinden elektrik elde edilmesine olanak sağlayan teknoloji için ilk fotovoltaik gözlemler 1839 yılında A.E. Becquerel tarafından sağlanmıştır. Becquerel'in gözlemlerinin ardından, 1954'te ilk güneş hücresi üretildi ve 1950'lerin sonlarında dünyanın yörüngesindeki uyduların enerji ihtiyaçları için geliştirildiler (Goetzberger vd., 2003). 1970'lerde güneş hücrelerinin üretim ve performanslarındaki geliştirmelerle düşük güç gerektiren sinyal ve telekomünikasyon cihazlarında da kullanılmaya başlandılar. 1970'lerdeki enerji krizinden sonra güneş hücrelerini geliştirmek için önemli derecede çaba harcandı ve 1980'lerde popüleritesi artarak tüketici elektroniğinde, saatlerde, hesap makinelerinde, radyolarda ve düşük enerji gerektiren diğer bazı sistemlerde güç kaynağı olarak kullanılmaya başlandı. Günümüzde de güneş enerjisi santralleri, sokak aydınlatmaları, mesken uygulamaları, tüketici elektroniği uygulamaları olarak güneş enerjisinin kullanıldığını görmekteyiz.

Günümüzde, silisyum heteroeklem, çok kristalli, ince film, organik, perovskit güneş hücreleri gibi birçok hücre teknolojisi mevcuttur. Şekil 1.1'de güncel olarak çalışan güneş hücresi teknolojileri, şekil 1.2'de güncel olarak çalışılan güneş hücresi teknolojilerinin verimlilik değerleri verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, bu güneş hücresi teknolojilerinden kristal silisyum (c-Si) heteroeklem teknolojisi üzerine odaklanılarak, bu hücrelerden daha yüksek verim elde edebilmek için heteroeklem güneş hücrelerinin hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) ince film katmanlarının optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Çok Eklemler Hücreler	Tek Eklemler GaAs Hücreler	Kristal Silisyum Hücreler	İnce Film Teknolojileri	Yenilikçi Teknolojiler
<ul style="list-style-type: none"> • İki eklemler • Üç eklemler • Dört ya da daha fazla eklemler 	<ul style="list-style-type: none"> • Tek kristalli • İnce film kristal 	<ul style="list-style-type: none"> • Tek kristalli • Çok kristalli • İnce film kristal • Silisyum heteroeklem (HIT) 	<ul style="list-style-type: none"> • CIGS • CdTe • Amorf silisyum 	<ul style="list-style-type: none"> • Boya duyarlı • Perovskit • Organik • Organik tandem • İnorganik • Kuantum nokta

Şekil 1.1. Güneş Hücresi teknolojileri



Şekil 1.2. Güncel güneş hücresi teknolojileri verimlilikleri (NREL, 2018)

Silisyum heteroeklem güneş hücreleri, kristal silisyum ve ince film güneş hücresi teknolojilerini birleştiren yüksek verimli bir güneş hücresi teknolojisidir (Wolf vd., 2012; Liu vd., 2014; Patel ve Tyagi, 2014; Taguchi vd., 2014). c-Si/a-Si:H heteroeklem güneş hücrelerinin yüksek verimlilikleri kullanılan yüksek kaliteli c-Si alttaşa dayanmaktadır. Bu konsept üstün ince film teknolojisi ile birleştirilerek a-Si ince filmlerinin görünür ışıktaki yüksek absorpsiyonu ve kolaylıkla n ve p tipi olarak katkılanabilme özelliklerinden faydalanılarak performansı daha da yükseltilebilmektedir (Asim vd., 2012; Wolf vd., 2012; Yamamoto vd., 2015). Ayrıca daha az enerji gerektiren düşük sıcaklıklarda a-Si:H ile yüksek kalitede pasive edilebilmesi heteroeklem teknolojisini maliyet-etkin kılarak başarısını daha da artırmaktadır (Jay vd., 2014).

Yüksek verimli güneş hücreleri üretmek için farklı kalınlıklarda ve tiplerde alttaşlar kullanılması, farklı yüzey desenlendirme çalışmalarının yapılması, farklı metalizasyon teknikleri ve materyallerinin kullanılması gibi yöntemler önerilebilir. Bu çalışmanın amacı, a-Si:H/c-Si güneş hücrelerinde kullanılan a-Si:H ince film katmanlarını optimize ederek daha yüksek verimli s-Si:H/c-Si güneş hücreleri üretmektir.

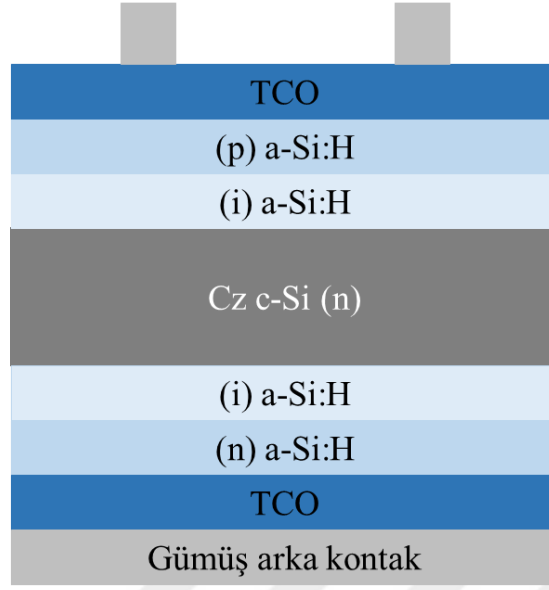
BÖLÜM II

a-Si:H/c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRESİ

Silisyum heteroeklem güneş hücreleri c-Si alttaş üzerine biriktirilmiş daha geniş bant aralıklı, nanometre mertebesinde a-Si:H ince filmleri içerir (Şekil 2.1) (Tanaka vd., 1992; De Wolf vd., 2012; Liu vd., 2014; Patel ve Tyagi, 2014; Taguchi vd., 2014). Bu tasarım endüstriyel üretim seviyesinde %20'nin üzerinde enerji dönüşüm verimine olanak sağlar (Tsunomura vd., 2009; Taguchi vd., 2014). Bunun dışında bu heteroeklem tasarımı; (i) güneş hücrelerini bant aralığı daralmasının olumsuz etkilerinden ve yüksek seviyede katkılanmış homoeklemin emitöründeki katkılamaya bağlı mobilite bozulmalarından korur (De Wolf vd., 2012). (ii) a-Si:H ince filmleri sadece c-Si yüzeyindeki boş bağları doyurup onları pasive etmekle kalmaz, aynı zamanda hetero arayüzdeki azınlık akım taşıyıcıları için yansıma bariyeri oluşturur (şekil 2.2), bu bariyerler c-Si yüzey rekombinasyonunu etkin bir şekilde pasive eder ve ayrıca emitör kontak rekombinasyonunu korur (De Wolf vd., 2012; Liu vd., 2014). (iii) a-Si:H'nin daha geniş bant aralığı heteroeklemdeki yarı fermi seviyesi ayrımını genişletir ve Voc artışının yolunu açar. Dahası, Heteroeklem güneş hücrelerinin her işlem adımı 200°C'ın altında uygulandığı için hücrede sıcaklığa bağlı oluşacak hasarları ve bozulmaları azaltır. Ancak a-Si:H'un sağladığı olumlu etkilerle birlikte hetero arayüzde taşıyıcıların çoğunluğu için bloke edici bariyerlere neden olur. Bloke edici bariyerler çoğunluk akım taşıyıcılarının arayüz üzerindeki akışını engeller ve bu durum cihaz performansını olumsuz etkiler. Çoğunluk akım taşıyıcıların tünellemesi, bloke edici bariyerlerin olumsuz etkilerini telafi eder (De Wolf vd., 2012; Liu vd., 2014).

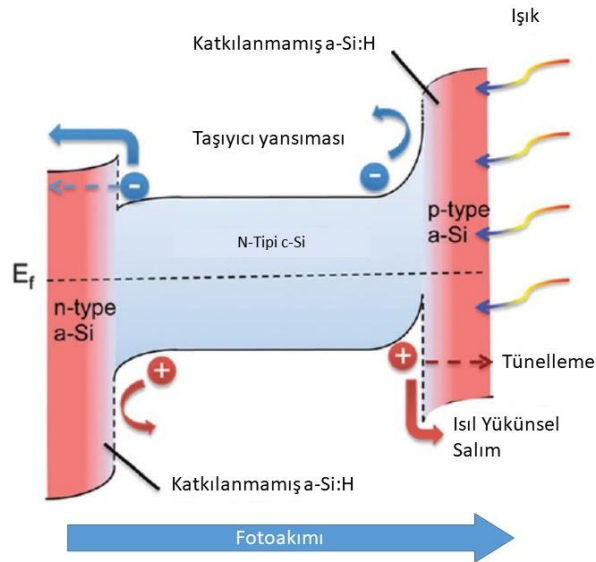
Şekil 2.1, standart bir c-Si:HIT güneş hücrelerinin iç yapısını göstermektedir. a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş hücrelerinin performansları eklem kalitesine doğrudan bağlıdır. Maksimum verim ve minimum rekombinasyon için a-Si:H ince film biriktirmesi öncesi kimyasal ön hazırlık, optimum a-Si:H katkılaması ve a-Si:H/c-Si yapısına uygulanacak termal işlemler oldukça önemlidir (Angermann vd., 2008; De Wolf vd., 2012; Taguchi vd., 2014).

İpek Baskı gümüş ön kontaklar



Şekil 2.1. c-Si heteroeklem güneş hücresi yapısı

c-Si:HIT aygıtların başarılarının anahtarı, c-Si üzerine yapılan daha geniş bant aralıklı a-Si:H biriktirmesi ile kristal yüzeyden son derece aktif rekombinasyonlu metal kontaktların elektriksel olarak ayrılmasıdır (De Wolf vd., 2012). Si-HJT aygıtlar için a-Si:H ince filmleri c-Si'dan daha geniş bant aralığına sahip oldukları ve kolaylıkla n ve p tipi olarak katkılanabildikleri için iyi bir tampon katman adaydırlar.



Şekil 2.2. c-Si HIT güneş hücresi enerji-band diyagramı (Liu vd., 2014)

Sıklıkla başlangıç materyali olarak n-tipi c-Si alttaş kullanılır. N-tipi alttaş kullanmanın bazı avantajları vardır. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir: (i) alttaş maliyeti, saflığı ile doğrudan bağlantılıdır. Aynı kirlilik konsantrasyonundaki n-tipi materyalin balk azınlık akım taşıyıcılarının yaşam süresi (τ_{bulk}), genellikle p-tipi benzerlerine göre daha yüksektir. (ii) boron ve oksijen ya da boron ve demir eş zamanlı olarak verildiğinde p-tipi c-Si alttaşın τ_{bulk} 'ı çok zararlı bir şekilde etkilenir. N-tipi alttaşlarda böyle etkiler gözlenmez. (iii) p-tipi c-Si alttaşların pasivasyonu, n-tipi alttaşların pasivasyonuna göre daha zordur (De Wolf vd., 2012).

a-Si:H ince film yapıları c-Si heteroeklem güneş hücrelerinde iki temel amaca hizmet eder. Bunlar, (i) yüzey pasivasyonu ve (ii) ön ve arka kontaklarının oluşturulmasıdır. Ayrıca toksik olmayışı, n ve p tipi olarak kolaylıkla katkılanabilmesi ve düşük sıcaklıklarda (<230°C) PECVD ile geniş alanlara kolaylıkla uygulanabilmesi bakımından c-Si heteroeklem güneş hücrelerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar.

a-Si:H ince filmlerinin iletkenlikleri en iyi dielektrik filmlere eşdeğer olduğundan dolayı (Lachenal vd., 2010; De Wolf vd., 2012), a-Si:H eklemleri ve yapılacak metalizasyon arasında elektriksel bağlantıyı sağlayabilmek için bu ince film katmanlarının üzerine düşük yüzey direncine sahip olan ve ayrıca yansıtma engelleyici özelliği bulunan iletken oksit (TCO) katmanı PVD (fiziksel buhar biriktirme) ile kaplanır.

Metalizasyon ise güneş hücresinde üretilen akımı toplamak için gerekli olan bir adımdır. Metalizasyon, güneş hücreleri üzerinde gölgeleme yaparak aktif hücre alanını azaltsa da üretilen akımı toplayıp bu akımı "ribbon" adı verilen dış devre akım toplayıcılar ile dış devre bağlantısına aktarabilmek için gerekli bir adımdır. Metalizasyon malzemesi olarak genellikle gümüş kullanılmakla birlikte maliyeti düşürmek için gümüş yerine bakır ve alüminyum da kullanılmaktadır (José Luis vd., 2012; ur Rehman ve Lee, 2013; Geissbühler vd., 2014; Taguchi vd., 2014).

Güneş hücresi üretim maliyetinin büyük bir çoğunluğunu c-Si alttaşlar oluşturmaktadır (Jay vd., 2014). Bu nedenle güneş hücresi maliyetini düşürmek ve aynı zamanda yüksek verimli güneş hücreleri üretebilmek için yüksek ışık yakalama kabiliyetli daha ince c-Si alttaşlar ve yüksek kalitede pasive edilmiş alttaş yüzeyi gereklidir (Taguchi vd., 2009).

2.1 a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi

İlk a-Si:H/c-Si hetero yapısı 1974 yılında Fuhs ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır (Fuhs vd., 1974). Birkaç yıl sonra da katkısız a-Si:H ince filmlerinin c-Si yüzeylerini belirgin derecede pasive ettiği bulunmuştur (Pankove ve Tarn, 1979). Silisyum heteroeklem yapısı kullanan ilk güneş hücresi 1983 yılında Hamakawa ve arkadaşları tarafından Honeymoon hücresi olarak adlandırılan tandem eklemli güneş hücresindeki bir a-Si:H/poli-Si heteroeklem alt hücresi formunda bildirilmiştir (Hamakawa vd., 1983). Aynı zamanda, katkılanmış a-Si:H ve c-Si arasındaki elektronik eklemeler de araştırılmıştır (Matsuura vd., 1984a; Matsuura vd., 1984b). 1980'lerin sonlarında Sanyo, c-Si alttaş tabanlı güneş hücrelerine heteroeklem teknolojisini uygulamaya başladı. Bu, ince film poli-Si güneş hücreleri için uygulanabilir düşük sıcaklık emiterlerinin detaylı özelliklerinin çalışılması ile sağlanmıştır (De Wolf vd., 2012). İlk hücrelerde n-tipi c-Si alttaş ve bor katkı (p) a-Si:H ince film emitör kullanılmış ve bu hücrelerde %12'ye yakın verimlilik sağlamıştır. Bu güneş hücreleri, oldukça az doldurma faktörüne (FF) sahipti (De Wolf vd., 2012). Arayüz durum yoğunluğunu azaltmak için, HIT (Katkısız ince filmler heteroeklem) yapısı adı verilen, katkılanmış emiter ve alttaş arasındaki katkılanmamış a-Si:H ince tampon katman kullanılmasıyla büyük bir gelişme sağlandı ve bu uygulama, verimliliği %14.5'e kadar yükseltti (De Wolf vd., 2012). Genel olarak Silisyum heteroeklem güneş hücrelerinin yüksek Voc ve yüksek verimliliklere ulaşabilmesinin önünü açan en büyük özellik katkısız tampon katmandır. Pasive edilmiş bir arka kontak ile Sanyo, benzer bir hetero yapı kullanıldığında hücre verimliliğini %18'in üzerine çıkartmıştır (Tanaka vd., 1992). 1992'de 1 cm²'lik c-Si alttaş üzerine (i) a-Si:H ince filmleri kaplayarak %18.1 verime ulaşılmasının (Tanaka vd., 1992) ardından 2010 yılına kadar Si heteroeklem güneş hücrelerini üreten tek firma Sanyo olmuştur.

2009 yılında Sanyo, 98µm ve >200µm kalınlıklarda silisyum alttaşlar kullanarak kalınlığın etkisini kıyaslamıştır. Daha ince silisyum alttaş kullanıldığında; daha düşük mekanik mukavemete bağlı daha düşük kazanç, daha düşük ışık emilimi ve dolayısıyla daha düşük Isc ve güneş hücresinin ömründe azalma beklendiğini belirtmiştir. Yapılan çalışmada, güneş hücresinin kalınlığının artması Voc'de düşüşe neden olurken daha yüksek Isc'nin kapısını araladığı görülmüştür (Taguchi vd., 2009). Çizelge 2.1'de iki ayrı hücrenin kıyaslaması verilmiş durumdadır. Hücre kalınlığı azaldıkça Isc'de meydana gelen düşüşün önüne geçmek için optik ve rekombinasyon kayıplarının önüne geçilmesi

gerekmektedir. Optik kayıpları azaltmak, yüksek verimli HIT güneş hücresi üretim sürecinin ilk adımıdır. Optik kayıplar; hücre yüzeyinden meydana gelen yansıma, ön yüzdeki elektrotların yaptığı gölgeleme ve a-Si:H ile TCO katmanlarında absorbe edilen ışık kaybı olarak sıralanabilir. Rekombinasyon kayıpları için de yüksek kalitede (i) a-Si:H ince filmlerinden faydalanılabilir (Taguchi vd., 2009).

Çizelge 2.1. Alttaş kalınlığının verimliliğe etkisi (Taguchi vd., 2009)

Verimlilik	%22.8	%23.0
Hücre kalınlığı (μm)	98	>200
Isc (A)	3.696	3.968
Voc (V)	0.743	0.729
F.F. (%)	79.1	80.0
Pmax (W)	2.290	2.314
Toplam hücre alanı (cm^2)	100.3	100.4

Sanyo HIT güneş hücresi teknolojisinde 98 μm kalınlığında ve 101.8 cm^2 'lik güneş hücresi alanı ile rapor ettiği ve bağımsız bir firma tarafından onaylanan %24.7'lik verimliliğe 2013 yılında ulaşmasının ardından yine başka bir Japon firması KANEKA ışık yönetimi üzerinde çalışarak 2015 yılında optik ayırıcı teknolojisi ile 6 inç, 100 μm 'lik c-Si güneş hücresi ve perovskit güneş hücresi kombinasyonu ile 26.4'lük verime ulaşmış, ardından 2017 yılında arka kontak teknolojisi ile %26.6 verime ulaşmış durumdadır. Ulaşılan bu %26.4'lük verimi elde edebilmek için kullanılan optik ayırıcı kısa dalga boylu ışınları geniş bant aralıklı perovskit/a-Si güneş hücresine yönlendirirken, uzun dalga boylu ışınları c-Si heteroeklem güneş hücresine geçirmekte ve böylece her iki hücreyi de efektif olarak kullanarak daha yüksek verimliliklere ulaşmakta (Taguchi vd., 2009; Taguchi vd., 2014; Yamamoto vd., 2015).

2.2 a-Si:H/c-Si Güneş Hücresi Katmanları

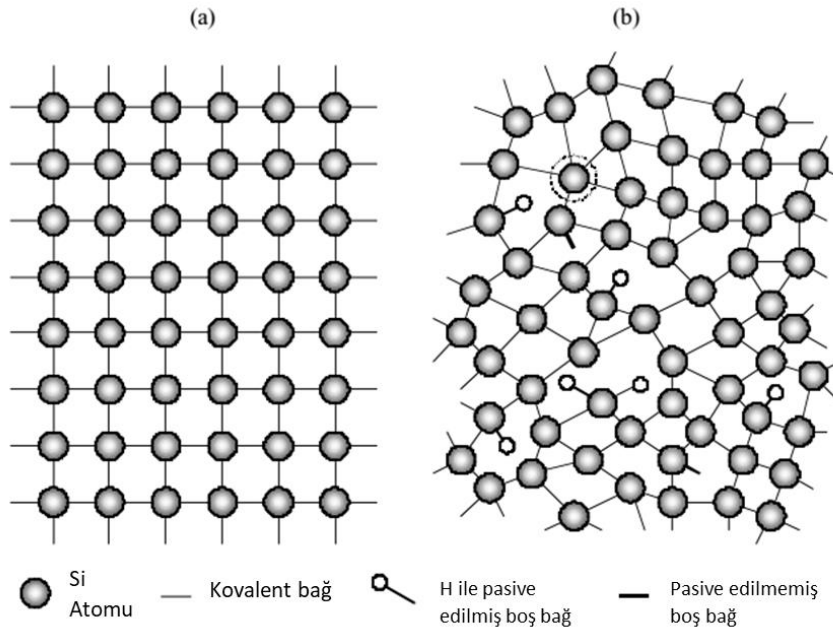
2.2.1 a-Si:H ince filmler

Yarıiletken arayüzlerinin elektronik pasivasyonu çoğu elektronik ve fotovoltaik cihazın performansında kritik bir öneme sahiptir. c-Si heteroeklem güneş hücrelerinin performansı da onların üzerine biriktirilen, verimli bir emiter ve bir arka yüzey kontağı

gibi davranan a-Si:H ince filmlerin özelliklerine doğrudan bağlıdır ve ayrıca yüzey pasivasyonu da bu filmlerin yerine getirmeleri gereken önemli bir roldür (Tanaka vd., 1992; van Sark vd., 2012; Taguchi vd., 2014).

a-Si:H ince filmleri, güneş hücrelerinin görünür ışık bölgesinde yüksek absorpsiyon katsayısı ile birkaç yüz mikrometre kalınlığında üretilmesine olanak sağlar. Şekil 2.3 kristal silisyum ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum yapılarının aralarındaki farklılıkları göstermektedir.

Şekil 2.3 (a) tek kristalli, atomları kristal örgü boyunca düzenli ve simetrik bir şekilde dizilmiş c-Si (kristal silisyum) yapısını gösterirken; şekil 2.3 (b) de atomları rastgele dizilmiş ve yapısal bir düzen göstermeyen a-Si:H (hidrojenlendirilmiş amorf silisyum) yapısını göstermektedir. c-Si yapıda her silisyum atomu komşu dört silisyum atomuyla kovalent bağ kurmuş ve tüm bağlar birbirine eşdeğer durumdadır, ancak a-Si malzemenin düzensiz yapısı nedeniyle bazı atomların boş bağları vardır. Fiziksel olarak, bu boş bağlar rastgele dizilmiş ağdaki kusurları temsil eder ve anormal elektriksel davranışa neden olabilirler. Malzeme, boş bağlara bağlanan ve boş bağ yoğunluğunu çeşitli derecelerde azaltabilen hidrojen ile pasifleştirilebilir. (Collins vd., 2003; Myong vd., 2006; Fahrner, 2013).



Şekil 2.3. Tek kristalli silisyum (a) ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum'un (b) atomik yapısı (Fahrner, 2013)

5 mikronluk amorf silisyum şeritleri kullanılarak amorf Si'un yoğunluğu, 300 K'de 4.90×10^{22} atom/cm³ (2.285 g/cm³) olarak hesaplanmıştır ve bu yoğunluk 300 K'de kristal Si'dan 1.8 ± 0.1 daha az yoğundur (Custer vd., 1994). Silisyum, soğutma ile genişleyen ve sıvıdan ziyade katı olarak daha düşük yoğunluğa sahip birkaç elementten biridir.

Hidrojenlendirilmemiş a-Si çok yüksek kusur yoğunluğuna sahiptir, bu da zayıf fotoiletkenlik gibi istenmeyen özelliklere neden olur ve katılama yapılmasını zorlaştırmaktadır (Chittick vd., 1969; De Wolf vd., 2012; Fahrner, 2013). Amorf silisyum imalatı sırasında hidrojen ilavesi ile fotoiletkenlik önemli ölçüde artırılmış ve katılama mümkün hale getirilmiştir. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum, a-Si:H, 1969 yılında Chittick, Alexander ve Sterling tarafından silan gazı (SiH₄) öncüsü biriktirilerek imal edilmiş ve elde edilen malzeme daha düşük kusur yoğunluğu ve kirliliklerden dolayı daha yüksek iletkenlik göstermiştir (Chittick vd., 1969). Bu çalışmada, a-Si:H'un fosfin (n-tipi) ya da diboran/TMB (p-tipi) nin yerine geçecek dopingin etkisi araştırılmıştır. Si-H bağları için yaklaşık 2000 cm⁻¹'lik bir frekansa sahip IR titreşimi vasıtasıyla yaklaşık %10 atomik konsantrasyona sahip olduğu görülmüştür.

PV yarıiletkenlerinde kullanılan iki ortak malzeme kristal Si ve ince filmlerdir. Verimliliği ve performansı, ışık emme ve enerji dönüşüm verimliliklerine, ayrıca üretim teknolojisi ve üretim maliyetlerine dayanarak hesaplanır. c-Si'a göre, a-Si ince filmlerin üretim teknikleri daha hızlı ve ucuzdur (Asim vd., 2012). Bununla birlikte, c-Si ve a-Si:H ince filmlerinin büyük ölçekli ve düşük maliyetli üretime uygun olabilmesi için çok sayıda faktör düşünülmelidir. Bu faktörler arasında, (i) yeterli miktarda ham maddenin bulunması, (ii) düşük maliyetli saflaştırma ve biriktirme yöntemleri, (iii) kabul edilebilir performans aralığı içinde büyük bir alan ürünü elde etmek için kolay süreç kontrolü ve (iv) Güneş hücrelerinin uzun süre güneş ışığına maruz kalacağı düşünülürse, güneş hücresinin ömrü sayılabilir (Asim vd., 2012).

2.2.1.1 Katılanmamış (i) a-Si:H ince filmler

Daha önce de bahsedildiği gibi, c-Si güneş hücreleri için pasivasyon son derece önemlidir.

Katkısız a-Si:H ince filmlerin sağladıkları düşük arayüz kusur yoğunluğu, yüksek optik bant aralığı ve yüksek kalitedeki pasivasyon onları kristal silisyum arayüzlerini pasive

etmek için en uygun tampon katman adayı yapar (De Wolf vd., 2012; Ge vd., 2012) ve en iyi dielektrik filimlere eşdeğerdirler (Lachenal vd., 2010; De Wolf vd., 2012). (i) a-Si:H ince filmleri genellikle 13.56 MHz'lik plazma uyarım frekansında H₂ ile seyreltilmiş SiH₄ gazıyla PECVD sisteminde biriktirilir (De Wolf ve Kondo, 2007; Strahm vd., 2010; Descoedres vd., 2011). Biriktirme sıcaklığı genellikle 200 °C civarı ve basıncı ~0.1-1 torr kullanılır (De Wolf vd., 2012). Bununla beraber, 40 MHz (Descoedres vd., 2010; Descoedres vd., 2011), 70 MHz (De Wolf vd., 2008; Olibet vd., 2010) ve 110 MHz (Fahrner, 2013) gibi çok yüksek frekanslarda (VHF) ve doğru akım PECVD (Das vd., 2008), katalitik CVD (Gielis vd., 2008; Schüttauf vd., 2011), ECRCVD (elektron siklotron rezonans CVD) (Maydell vd., 2006) ve termal plazma (Illiberi vd., 2010) gibi diğer tekniklerde de iyi sonuçlar alındığı bildirilmiştir.

Çizelge 2.2. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum malzeme özellikleri (Poortmans ve Arkhipov, 2006)

Bant aralığı	1.4 - 1.9 eV
Hidrojen içeriği	% 10 - % 30
Yoğunluğu	% 10 H ₂ içeriğinde 2.2 g/cm ³ % 20 H ₂ içeriğinde 2.11 g/cm ³
Dielektrik sabiti	N _H =5e21 cm ⁻³ 'de 14 - N _H =17e21 cm ⁻³ 'de 6
Katkısız spesifik direnç	Oda sıcaklığında 2e10 ohm
Doping öncesi maksimum spesifik iletkenlik	Oda sıcaklığında 10 ⁻²
İletim bandı kenarında etkin durum yoğunluğu, N _c (cm ⁻³)	4.5e21 cm ⁻³
Valans bandı kenarında etkin durum yoğunluğu, N _v (cm ⁻³)	6.4e21 cm ⁻³
Orta bant aralığındaki durum yoğunluğu (cm ⁻³)	10 ¹⁷ - 10 ¹⁸ cm ⁻³
Rekombinasyon yaşam süresi (s)	10 ⁻⁹ - 10 ⁻² saniye
Sürüklenme mobilitesi (cm ² /Vs) elektronlar/boşluklar	1/0.01 cm ² /Vs

a-Si:H katmanları c-Si yüzeyindeki silisyum boş bağlarını hidrojen ile pasive eder ve arayüz kusur yoğunluğunu azaltır (Pankove ve Tarng, 1979). İyi bir pasivasyon için alttaş ve a-Si:H ince filmi arasındaki arayüz atomik açıdan keskin olmalıdır (Wang vd., 2006; De Wolf ve Kondo, 2007; Fujiwara ve Kondo, 2007). Filmler biriktirildikten sonra, biriktirme sonrası ısıtma işlemi, çalışılan numunelerin hem elektronik hem de materyal özelliklerini değiştirir ve daha fazla fiziksel bilgi edinmek için kullanılabilir. Düşük sıcaklıklarda ısıtma işleminin, bu tür ara yüzeylerin pasivasyonu için oldukça yararlı olduğu da kanıtlanmıştır (Burrows vd., 2008; De Wolf vd., 2008; Edwards vd., 2008; Illiberi vd., 2010; Schüttauf vd., 2011). a-Si:H tabakalarının biriktirmeleri esnasında özelliklerini olabildiğince doğru olarak kontrol etmek çok önemlidir. Hidrojenlendirilmiş amorf

silisyum tabakalar, spektroskopik elipsometre (Fujiwara ve Kondo, 2005; Levi vd., 2006; van den Oever, 2007), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) (Fujiwara ve Kondo, 2005), ikinci harmonik jenerasyon spektroskopisi (Gielis vd., 2008) ve taşıyıcı yaşam süresi ölçümleri (Neitzert vd., 1993) gibi çeşitli optik yöntemlerle incelenmiştir. PEVCD ile biriktirilen materyallerin özellikleri plazma özellikleriyle doğrudan bağlantılı olduğundan, plazma teşhisi de çok önemlidir; bu sayede biriktirme mekanizmalarının temel bilgileri alınabilir. Plazma optik emisyon spektroskopisi, bu amaçla kullanılan bir tekniktir (Bohm ve Perrin, 1991). Kuantum kaskadlı bir lazer kullanılarak gerçekleştirilen IR absorpsiyon spektroskopisi, biriktirme sırasında SiH₄ tüketimini yerinde ve yüksek çözünürlükte göstermektedir (Bartlome vd., 2009).

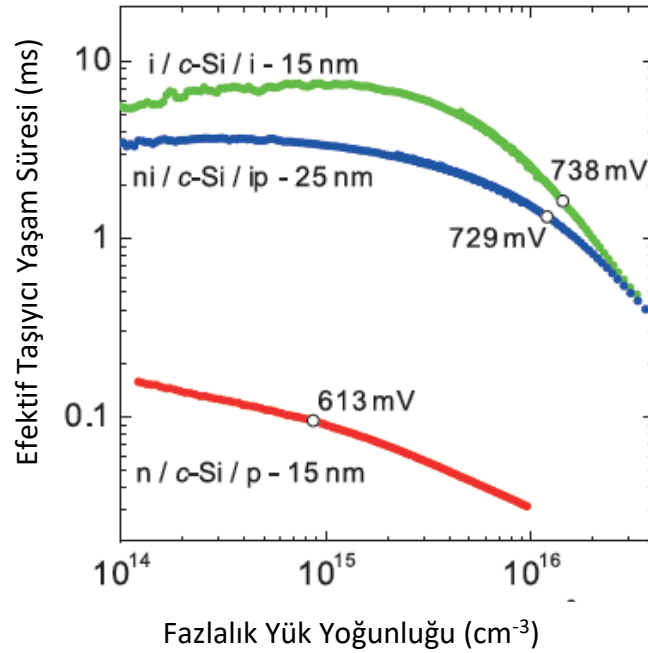
2.2.1.2 Katkılanmış a-Si:H ince filmleri

Heteroeklem aygıtları üretiminde emiter ve arka kontakları oluşturabilmek için katkılanmış a-Si:H ince filmlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu filmler genellikle katkısız tampon katman olan (i) a-Si:H ince filmleri ile benzer plazma sistemlerinde biriktirilir. p tipi katkılamada SiH₄ (Silan) gaz akışına karıştırılmış TMB (trimetilboron) ve B₂H₆ (diboron), n tipi katkılamada SiH₄ gaz akışına karıştırılmış PH₃ (fosfin) kullanılır. Bu katkılama gazları genellikle H₂ ile seyreltilirler (Seyhan vd., 2017).

Katkılanmış filmler özellikle alttaş ile olan arayüzde bir alan etkisi oluştursa da pasivasyon kaliteleri katkısız filmlerinkinden daha düşüktür (Korte ve Schmidt, 2008; Wolf ve Kondo, 2009). Katkılanmamış ve katkılanmış a-Si:H ince filmleri arasındaki pasivasyon kalitesinin farklılığı şekil 2.4'te verilmiştir. Bu grafikteki sonuçlar 200 µm kalınlığında rastgele piramit desenlendirmesi yapılmış alttaş üzerine biriktirilmiş a-Si:H filmlerinin sonuçlarını vermektedir. Daha ince filmlerdeki daha yüksek kusur yoğunluklarına rağmen (Schmidt vd., 2004) 7 ms'ye kadar yüksek azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi (fazlalık akım taşıyıcı yoğunluğu: 10¹⁵ cm⁻³) 15 nm'ye kadar ince katkısız filmler ile elde edilmiştir. 1 güneş aydınlatması altında örneğin fazlalık akım taşıyıcı yoğunluğu grafik üzerinde beyaz noktalarla Voc ile beraber gösterilmiştir. Doğrudan alttaş yüzeylerine biriktirilen katkılanmış filmler, daha zayıf pasivasyona sahiptir. Şekil 2.4, alttaş yüzeylerine 15 nm kalınlığında p ve n tipi filmler biriktirilmiş örneklerin yaşam süresi eğrisini göstermektedir. 10¹⁵ cm⁻³lük bir fazlalık taşıyıcı yoğunluğunda, 0.1 ms'den daha düşük bir taşıyıcı yaşam süresi elde edilmiştir. Bu sonuç, 1 güneş aydınlatması

altında sadece 613 mV'luk Voc değerine karşılık gelir. Benzer şekilde, heteroeklem aygıtların c-Si alttaşlarının yüzeyleri n ve p tipi gibi katkılanmış filmlerle doğrudan kaplandığında bu onların düşük Voc değerlerini kısıtlar (Maydell vd., 2006).

Bu kusur oluşumundan ötürü hem yüzey pasivasyonunu hem de katkılama gereksinimlerini aynı anda yerine getirmek zor olmaktadır. Bu nedenle, birkaç nanometre kalınlıktaki katkısız tampon katman, heteroeklem aygıt fabrikasyonu için c-Si yüzeyi ve katkılı a-Si:H filmleri arasında ilk defa Sanyo tarafından biriktirilmiştir (De Wolf vd., 2012). Katkılanan katmanların altına katkısız bir tampon katmanı yerleştirmenin yararı, toplam kalınlıkları 25 nm olan a-Si:H katmanları için Şekil 2.4'teki verilerle açıkça gösterilmiştir. 10^{15} cm^{-3} 'lük bir fazlalık akım taşıyıcı yoğunluğunda, 3 ms'den daha fazla taşıyıcı yaşam süresi elde edilmiştir. 1 güneş aydınlatması altında 729 mV'luk bir Voc değeri elde edilmiştir.

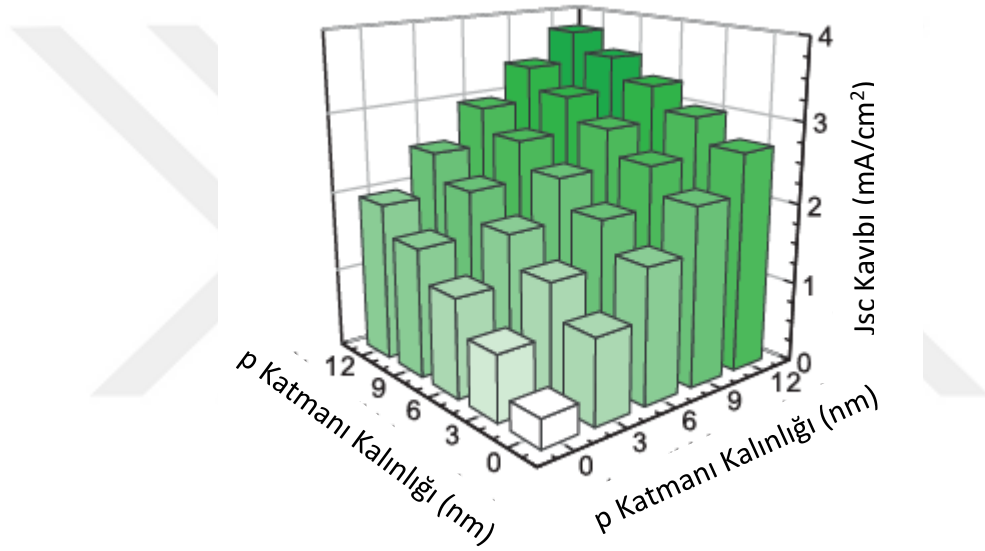


Şekil 2.4. i katmanının taşıyıcı yaşam süresine etkisi (De Wolf vd., 2012)

2.2.1.3 a-Si:H ince filmlerinde absorpsiyon

Katkısız a-Si: H tampon tabakaları tarafından sağlanan pasivasyon, Şekil 2.4'te gösterilen yüksek taşıyıcı ömrünü sağlar. Yük taşıyıcıları bu tür tabakalar üzerinden akabilir ve rekombinasyon-aktif metalizasyon ile alttaş arasında doğrudan kontak yapma ihtiyacını ortadan kaldırır. Bu iki husus, Si-HJT hücrelerinin bilinen yüksek Voc'lerine izin verir.

Bununla birlikte, a-Si:H tabakalarında üretilen azınlık taşıyıcılarının ömrü, özellikle katkılı tabakalarda çok kısa olduğundan, bu tabakalardaki emilim çoğunlukla gürültüdür. Bu, hücrenin arka tarafındaki bir sorun değildir, çünkü alttaş tüm görünür ışığı emer. Ancak hücrenin önündeki a-Si:H kaplaması ile emilen ışık kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) kayıplarına yol açar (Holman vd., 2012). Taguchi ve arkadaşları ilk olarak n-tipi silisyum heteroeklem aygıtlarındaki kusurca zengin p katmanının kısa dalga boyundaki dış kuantum verimliliğini (EQE) ve dolayısıyla akım yoğunluğu J_{sc} 'yi azalttığını ve p tabakasının inceltilmesinin J_{sc} 'de doğrusal bir artışa neden olduğunu göstermişlerdir (Taguchi vd., 2009).



Şekil 2.5. i ve p katmanlarının kalınlıklarındaki artışın J_{sc} üzerindeki etkisi (De Wolf vd., 2012)

Benzer şekilde, ön katkısız katmandaki kısa dalga boyundaki gürültü emilimi aynı zamanda heteroeklem güneş hücrelerinde J_{sc} 'de sürekli bir düşüşe neden olurken, çeşitli katkısız katman kalınlıkları için J_{sc} 'deki değişimin dikkatli bir analizi, üretilen taşıyıcıların yaklaşık %30'unun katkısız katmanda toplandığını gösterir (Holman vd., 2012). Yine, minimum tolere edilebilir kalınlık V_{oc} tarafından belirlenmiştir. Bu parametre, 5 nm'den daha ince olan i-tabakaları için hızla düşer ve FF'de de küçük bir düşüşe neden olur (Holman vd., 2012). Bu eğilim, (kusurlu) katkılanmış a-Si:H tabakaların c-Si yüzeyine gittikçe artan yakınlığından kaynaklanan zayıf yüzey pasivasyonundan kaynaklanmaktadır. Farklı katkısız ve p tipi tabaka kalınlıkları için 600 nm'nin altındaki dalga boylarında J_{sc} kayıplarının bir tahmini Şekil 2.5'te verilmiştir (De Wolf vd., 2012).

2.2.2 Transparan iletken oksit tabaka (TCO)

Katkılanmış a-Si:H ince filmlerinin iletkenlikleri zayıf olduğundan dolayı oluşturulan yükleri güneş hücresinin çıkışına ulaştırmak için güneş hücresinin ön ve arka yüzü TCO ile kaplanmalıdır. Ön yüzdeki TCO ayrıca silisyum heteroeklem aygıtlarında yansıma önleyici bir kaplama görevi görür ve çok yüksek taşıyıcı konsantrasyonları, örneğin 1100 nm'nin çok altında bir dalga boyu olan ışık için bile TCO'nun daha düşük bir kırılma indisine yol açar, bu da yansıma engelleme etkisinin kötüleşmesine neden olur ve bu nedenle orta dereceli taşıyıcı konsantrasyonlu materyallerin kullanılması faydalıdır (van Sark vd., 2012). Bu materyallerin biriktirilmesinde karşılaşılan zorluklar, esas olarak optimum yansıma engelleme etkisi için gereken düşük kalınlıktır. İzin verilen alttaş yüzey sıcaklığı a-Si:H/c-Si arayüzünün termal stabilitesi tarafından sınırlandırılır ve yaklaşık 200 °C'dir. TCO tabakasının kalınlığı kısıtlı olduğu gibi bu ince TCO tabakasının direncinin en aza indirgenmesi gerektiği anlamına gelir, 600 nm'de kırılma indisi yaklaşık olarak 2 olan ITO'nun yansıma kayıplarını en aza indirmek için kalınlığı kalınlığı "t" ise yaklaşık 75 nm'dir (De Wolf vd., 2012; van Sark vd., 2012). Önceden belirlenmiş kalınlık ve mobilite (μ) malzeme seçimi ile sınırlandırıldığında, düşük kısa devre direnci (R_{sh}) ancak serbest taşıyıcı konsantrasyonu N artırılarak elde edilebilir. Dahası, artan N genellikle mobilitede azalmaya neden olur (Ellmer ve Mientus, 2008). Ön TCO katmanını optimize etmek ve yüksek mobiliteli TCO kullanmak güneş hücresi performansını artırmak için önemlidir. TCO malzemesi olarak kullanılacak çok sayıda seçenek mevcuttur, bunlar arasında indiyum oksit ve çinko oksit bazlı malzemeler en çok kullanılanlardır (van Sark vd., 2012).

İki yüzü silisyum heteroeklem güneş hücrelerinde arka yüz için de benzer özelliklere sahip bir TCO tabakası gereklidir. Arka yüzü tam metalizasyona sahip hücrelerde TCO tabakası da yaygın olarak kullanılır. Arka yüzü tam metal kaplı hücrelerdeki arka TCO tabakası öncelikle bir temas ve optik katmanı olarak hizmet verir. Ayrıca temas direnci kayıplarına maruz kalmadan mümkün olduğunca şeffaf olmalıdır.

TCO filmlerin performansı optik özelliklerinin yanı sıra elektriksel performanslarına da bağlıdır. Genellikle optik geçirgenlik ve elektrik iletkenliği özel fiziksel niteliklerdir. Çoğu katıda elektrik akımı serbest elektronlarla taşınır ve bu durum, ışık gibi elektromanyetik radyasyonla güçlü bir etkileşim gösterir. Parlak bir metal yüzeyi cam

gibi bir yalıtkan ile karşılaştırırken bu etki belirgindir. Bu nedenle bağımsız olarak optimize edilemezler ve bu iki özelliğin dikkatli bir şekilde dengelenmesi gerekir (De Wolf vd., 2012; van Sark vd., 2012).

2.2.3 Metalizasyon

Güneş hücresi metalizasyonu, hücre üretiminin son aşamasında gerçekleştirilen önemli bir basamaktır. Metalizasyon hücre üzerinde gölgeleme yapıp aktif hücre alanını azaltsa da, hücre üzerine düşen fotonların oluşturduğu elektrik akımı metalizasyon sayesinde toplanıp dış devre bağlantılarına iletilmektedir. Metalizasyon tekniği, malzeme seçimi ve ısı işlem süresi hücre performansını doğrudan etkileyen faktörlerdir.

Metalizasyon için ipek baskı, inkjet, elektro kaplama, hibrit (ipek baskı – elektro kaplama) gibi birçok teknik olsa da ipek baskı tekniği basitlik, maliyet ve seri üretime yatkınlığından dolayı pazarın en baskın metalizasyon teknolojisidir.

2.3 PECVD Sistemi

Plazma, maddenin dördüncü hali olarak bilinir. Sıcaklık artırılıp basınç sabit tutulduğunda, termal dengedeki katı bir madde sıvı duruma geçer. Sıcaklık daha da arttığında sıvı fazlar gaz fazlarına dönüşür. Sıcaklık yeterince yüksek olduğunda, gazdaki moleküller ayrışır ve bir atom gazı oluşturur. Bu atomlar rastgele yönlerde serbestçe hareket ederler ve birbirleriyle çarpışırlar. Daha yüksek sıcaklıklarda atomlar serbestçe hareket eden yüklü parçacıklar (elektronlar ve pozitif iyonlar) haline gelir ve madde plazma durumuna geçer. Plazma halindeki madde nötr radikaller, iyonlar ve elektronları içerir.

İki çeşit plazma vardır; Elektronlar, iyonlar ve nötr türler yerel termodinamik dengede bulunuyorsa buna "termal plazma" denir. Eğer, elektronlar ve iyonlar nötr türe göre daha enerjik ise, bu bir dengesizlik demektir ve soğuk plazma olarak adlandırılır (Gohary, 2010). Dengesiz ışımaya deşarj plazmaları genellikle bir radyo frekansı (RF) elektrik alanı tarafından oluşturulur. Elektrik alanının uygulanmasıyla, elektronlar iyonlardan çok daha hafif olduğundan, negatif yüklü elektrotlar tarafından daha hızlı çekilirken ağır iyonlar daha yavaş kalırlar. Elektronların elektrik alanında hareketi sırasında, yüksek enerji

elektronları ve gaz türleri arasında, yeni iyonlar, elektronlar ve sistemin gaz sıcaklığını arttırmadan uyarılmış nötraller veya serbest radikalleri üreten yüksek derecede reaktif türler arasında esnek olmayan çarpışmalar olacaktır. Plazmanın merkez bölgesi kalan pozitif iyonlar nedeniyle elektrotlara göre biraz daha pozitif bir potansiyele sahiptir. Topraklanmış elektrotta bulunan, iyonların alttaşa doğru hızlandırılabilceği maksimum değer plazma potansiyelidir. Bu potansiyel, iyon yüzey etkileşimi yaratan iyon bombardımanına neden olur.

Tüm iyonlaşma ve ayrışma işlemleri, plazma içerisinde oluşmaktadır. Pozitif iyonlar ve nötr radikaller sırasıyla sürüklenme ve difüzyon ile alttaşa ulaşır ve ince film biriktirme sırasında yüzey ve yüzey altı reaksiyonları geçirir. Film biriktirmesi, reaktif nötr türlerin difüzyonuyla başlatılır. Pozitif iyonlar alttaşa doğru ivme kazanır ve büyüyen filme sürüklenirler. Negatif iyonların hareketi, plazmanın içinde sınırlanır ve parçacıklara dönüştürülür.

2.3.1 PECVD sistemi ile a-Si:H ince film biriktirmesi

Plazma teknikleriyle a-Si:H filmlerin biriktirilmesi sırasında esasen üç süreç ortaya çıkar (Abelson, 1993; Steckelmacher, 1996; Ferlauto vd., 2001; Agarwal vd., 2002; Van Sark, 2002);

- Gaz fazı / plazma prosesleri,
- Yüzey işlemleri,
- Alt yüzey işlemleri

Gaz fazı-plazma reaksiyonunda işlem, elektronlarla çarpışmanın sonucunda SiH_4 'ün hem nötr radikallere hem de iyonik türlere ayrışmasıyla başlar. Bu birincil tepki olup gaz akış hızı, plazma gücü ve gaz basıncı gibi biriktirme parametreleri tarafından kontrol edilir. Gaz fazında bazen reaktif moleküller ve plazmada üretilen radikaller arasında da reaksiyonlar görülür (Kasap, 2006). Bu ikincil reaksiyonların önemi, H atomlarının silana tepkimesiyle, en önemli radikal olan SiH_3 radikalini üretmek ve a-Si:H biriktirmesi için gaz fazı soğurucularından yüklenmeden film yüzeyine ulaştırmaktır. Öte yandan, yüksek plazma gücü ve/veya basınç koşulları altında ikincil işlemler, reaktif SiH_2 'nin SiH_4 ile zararlı ardışık yerleştirme reaksiyonlarına yol açmaktadır. Sonuç olarak, plazmada daha

kalitesi ve toz oluşumu gibi bir takım dezavantajlara sahiptir. Düşük güç değerlerinde, SiH_4 ayrışımı düşüktür. Sonuç olarak, filmler sadece silikon monohidridleri içerir diğer bir yandan, yüksek güç seviyelerinde, SiH_4 kuvvetli bir şekilde ayrışır ve filmler büyük miktarda SiH_2 içerir. Güç arttıkça filmlerdeki hidrojen içeriğinin artması nedeniyle, optik bant aralığı genişlemektedir. Yüksek güç uygulanmasında film yapısında mikrokristal silisyum oluşur ve böylece hidrojen içeriği ve bant boşluğu azalır. Özetle, yüksek kaliteli filmler optimum güç seviyeleri gerektirir.

RF gücü ile hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğunun değişimlerini gösteren grafik şekil 2.7b'de; film büyütme hızı ve argon seyreltmesine etkisi ise şekil 2.7c'de verilmiştir.

2.3.2.2 Gaz akış hızı

Bir molekülün filmle birleştirilme olasılığının bir ölçüsü olan ağır ve kısa ömürlü radikallerinin plazmada kalma süresi, gaz akış hızı düştüğünde artar (Rahman, 2010). Radikallerin plazmada kalma süresindeki artış moleküllerin ince film büyümesine olan katkısını da artırır ve filmin yapısal ve elektronik kalitesinde zayıflığa yol açar. Öte yandan, daha yüksek gaz akış hızlarında, gaz kullanım oranı düşüktür (Guha, 2000), bu da akış oranının iyi kalitede filmler elde etmek için optimize edilmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

2.3.2.3 Alttaş sıcaklığı

Yüzey sıcaklığı, doğrudan adsorpsiyon (yüzey tutunum) ve desorpsiyon (yüzeyden salınma) kinetiklerini, yüzey difüzyonunu ve büyüme öncüllerini dahil ettiğinden, biriktirilmiş filmin yapısı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Yüksek alttaş sıcaklığı SiH_x adatomlarına yüksek enerji verir ve hareketliliklerini artırır. Bu sayede adatomlar alttaş yüzeyi boyunca kolaylıkla dağılabilir ve enerjik açıdan olumlu bir konum bulabilir (Guha, 2000). Öte yandan, yüzey sıcaklığında daha fazla artış, yüzeyden hidrojen kaybına yol açarak çok sayıda boş bağ oluşturur. Bu nedenle, 200°C ila 300°C (Guha, 2000; Van den Donker vd., 2007) aralığında ince film büyümesi için optimum bir alttaş sıcaklığı vardır. Alttaş sıcaklığı ile hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğunun değişimlerini gösteren grafik şekil 2.7a'da verilmiştir.

2.3.2.4 Basınç

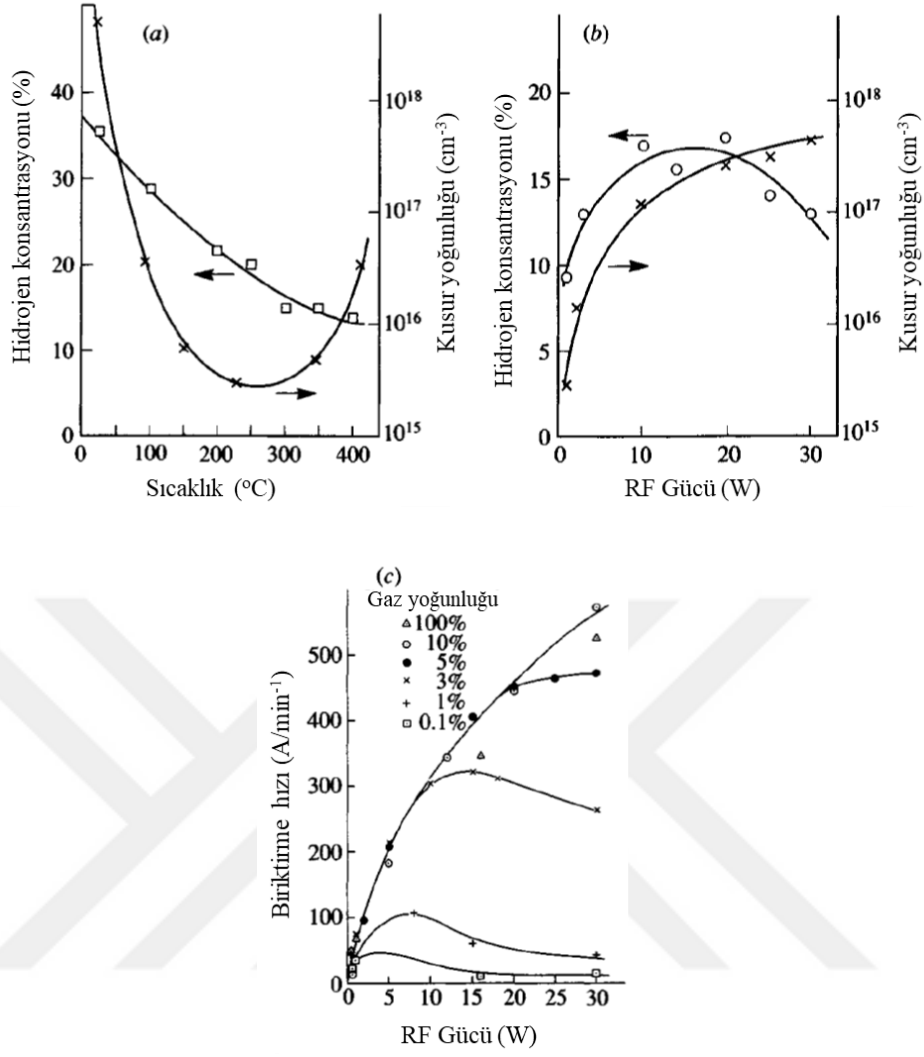
İnce film biriktirmesi sırasında, Paschen Yasası'na göre iki basınç bölgesi vardır. Düşük basınç bölgesinde çökeltme yüzey reaksiyonu ile sınırlanırken, yüksek basınç bölgesinde çökeltme gaz fazındaki kimyasal işlemlerle sınırlandırılmıştır (Estrada vd., 1999). Yüksek basınç rejiminde (>1 Torr), ikincil reaksiyonlar nedeniyle plazma hacminde Si_mH_x (SiH_3 gibi) daha yüksek seviyelerde Si-H bağlanmasının oluşması düşük basınç rejiminde olduğundan daha fazla beklenir (Guha, 2000) basınç arttığında ince filmlerin birikim hızı önemli derecede artar ve plazma içindeki toz oluşumu yüksek basınç rejiminde başlar (Guha, 2000).

2.3.2.5 Hidrojen seyreltme oranı

Hidrojen ile seyreltme, filmlerde kristalliği sağlamak için kullanılan ana parametrelerden biridir. Hidrojen seyreltmesinin temel avantajları aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Halindintwali, 2005):

- H_2 atomları daha iyi yüzey pasivasyonu ve homojen film büyümesi sağlar.
- Hidrojen seyreltmesindeki artış ile hidrojen türlerinin SiH_4 ile reaksiyonundan dolayı $[SiH_3]/[SiH_2]$ oranı artar.
- Hidrojen radikalleri, alt yüzey bölgesindeki zayıf Si-Si bağlarını kırar ve yoğun, yüksek kaliteli materyal oluşturur.

Öte yandan hidrojen seyreltmesinde daha fazla artış, biriktirme oranını düşürür. Bunun nedeni, vakum odasındaki SiH_4 'ün oransal olarak azalması film büyümesi için ayrışan daha az türe yol açmasıdır. Buna ek olarak, vakum odasında bulunan daha fazla H_2 büyüyen yüzeydeki aşındırma oranını artıracaktır.



Şekil 2.7. Malzeme özelliklerinin; alttaş sıcaklığının (a) ve RF gücünün (b) hidrojen konsantrasyonu ve kusur yoğunluğunun değişimlerini gösteren biriktirme koşullarına bağlılığını; film büyütme hızının (c); güç ve argon seyreltmesine bağlılığını gösterir (Pearton, 1992)

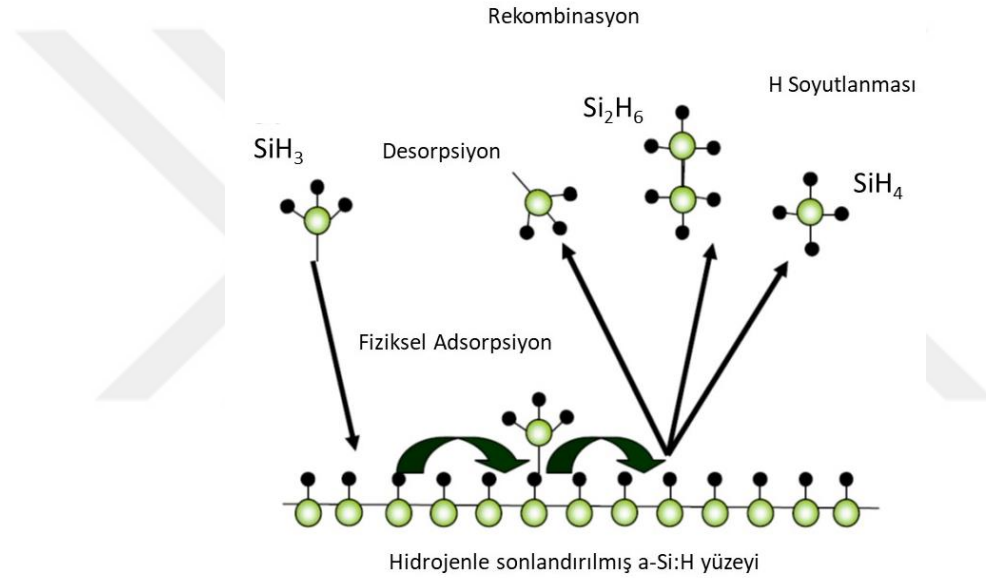
2.4 a-Si:H ince film büyütme mekanizması

Biriktirilen a-Si:H ağınnın yapısı büyütme parametreleri ile tanımlanır ve bu nedenle biriktirme işleminin detaylarına bağlıdır. Dolayısıyla, elektronik özelliklerin büyütme koşullarına göre değişeceği ve büyütme mekanizmalarının ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasının, elektronik özelliklerin optimizasyonu için gerekli olduğu düşünülmektedir.

a-Si:H biriktirmesi için birçok model mevcuttur. Bu modellerin en popülerlerinden biri SiH₃ radikallerinin ince filmin büyütüldüğü yüzeye ulaştığında yüzeye yayıldığını

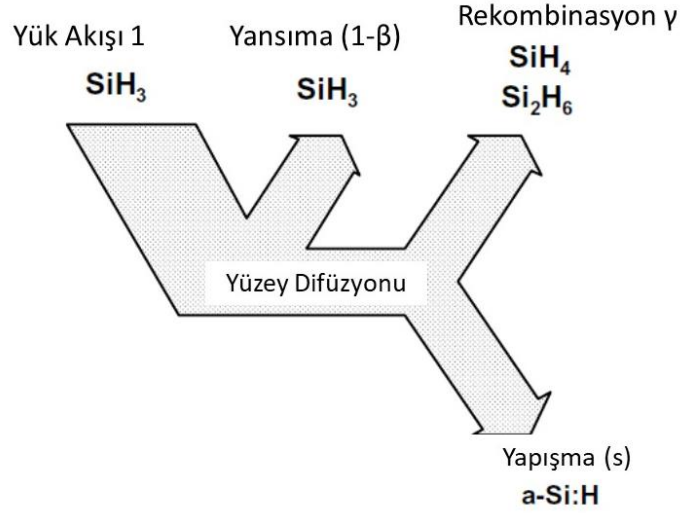
söyleyen modeldir (van Sark vd., 2012). Bu difüzyon işlemi sırasında çeşitli yüzey reaksiyonları meydana gelir; böylece gelen SiH_3 radikallerinin bazıları plazmaya geri döndürülür ve/veya bazıları yüzeyde adsorbe edilir. SiH_3 'ün adsorpsiyonundan sonra, yüzey üzerinde üç farklı mekanizma Şekil 2.8, 2.9 ve 2.10'da olduğu gibi gerçekleşir

(i) Yüzeyde başka bir SiH_3 radikali ile birleşebilir ve Si_2H_6 molekülü üretebilir. Desorpsiyon, yüzeyde tutunan taneciklerin yüzeyden ayrılması; adsorpsiyon da bir yüzey veya ara kesit üzerinde bir maddenin birikmesi ve derişiminin artması olarak tanımlanabilir.



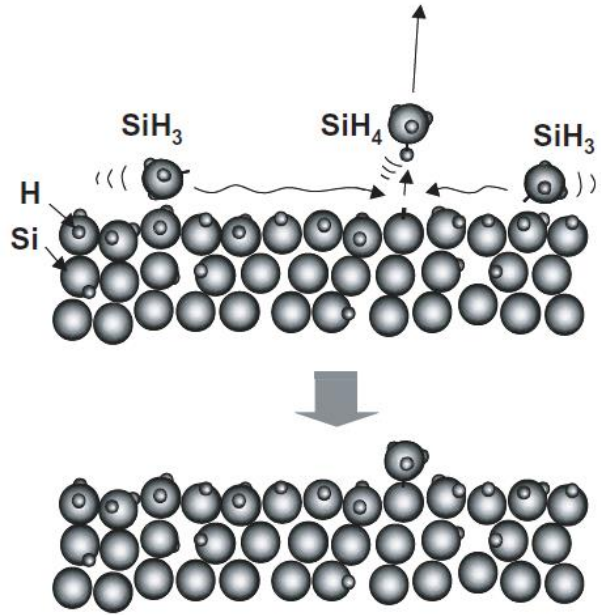
Şekil 2.8. SiH_3 radikallerinin, hidrojen ile sonlandırılmış silisyum yüzeyi arasındaki etkileşime dayanan a-Si:H ince filmlerin biriktirmesinin standart görünümü (van Sark vd., 2012)

(ii) SiH_3 radikalleri, yüzeyden H atomuyla bir bağ oluşturabilir, SiH_4 oluşturur ve yüzey üzerinde boşta bir bağ bırakır. Şekil 2.9, yüzey reaksiyonu sürecinin genel bir konseptini göstermektedir. SiH_3 'ün birim akış yoğunluğunun bir kısmı olduğu gibi yansır (yansıma olasılığı). SiH_3 'ün kalan kısmı yüzey tarafından adsorbe edilir, SiH_3 ayrılmaları, yüzey kaplamasına bağlanmış H'yi oluşturan SiH_4 veya iki SiH_3 radikalini, yüzey üzerinde oluşmakta ve Si_2H_6 oluşturmaktadır ve yüzeyi difüze edici SiH_3 , Si-Si bağını oluşturan boş bağlara yapışır. Toplam kayıp olasılığı (β) rekombinasyon olasılığı γ ve yapışma olasılığı (s)'nin toplamı ile verilir ($\gamma+s$) ve yansıma olasılığı ($1-\beta$) olarak ifade edilir.



Şekil 2.9. SiH_3 radikalleri ile oluşan yüzey reaksiyon prosesinin genel konsepti (Matsuda, 2004)

(iii) SiH_3 boş bağ ile kimyasal bir bağ oluşturur ve güçlü Si-Si bağı oluşturur.

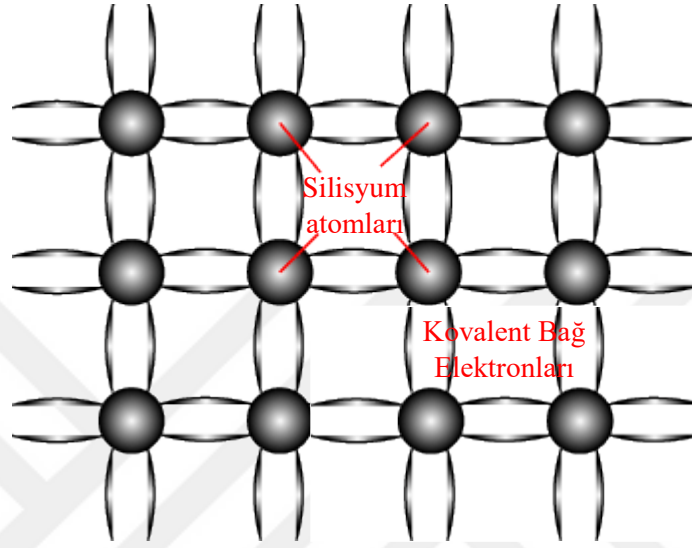


Şekil 2.10. a-Si:H büyütme işleminin şematik gösterimi (Matsuda, 2004)

2.5 a-Si:H katkılama işlemi

Silisyum gibi yarıiletkenler birbirlerine bir düzenle bağlanmış ayrı ayrı atomlardan oluşurlar ve periyodik yapıları bir düzen oluşturur ve bu sayede her atom 8 elektron ile çevrili olur. Atomun elektron ve proton sayısı eşittir yani atom elektriksel anlamda tam

olarak nötrdür. Yarıiletkende elektronların çevrelediği her atom kovalent bağın bir parçasıdır. Kovalent bağ tek bir elektronu paylaşan iki atomdan oluşur. Her atom çevresindeki 4 atomla 4 kovalent bağ oluşturur. Böylece her atomun ve çevresindeki 4 atomun arasında 8 elektron paylaşılmış olur. Şekil 2.11 standart bir c-Si ağı göstermektedir.

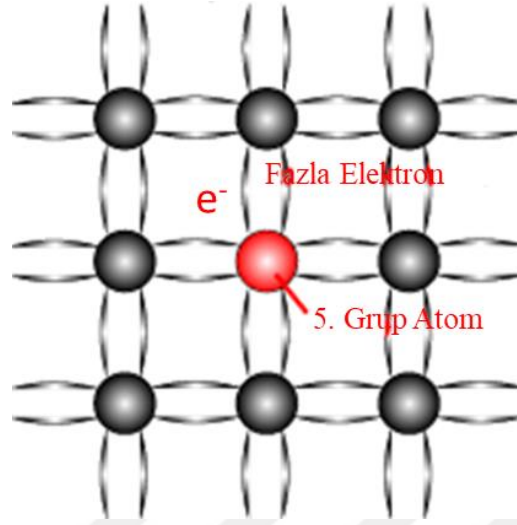


Şekil 2.11. Standart bir c-Si ağı yapısı (Honsberg ve Bowden, 2018)

Doping ya da diğer bir deyişle katkılama, malzemenin elektriksel iletkenliğini kontrol edebilmek için kontrollü olarak spesifik safsızlık atomlarının yapıya eklenmesidir. Fosfor atomları ve bor atomları kullanılarak kusurların yerini dolduracak donörler ve alıcıların oluşumu a-Si:H'daki ana katkılama mekanizmasıdır (Poortmans ve Arkhipov, 2006). a-Si:H'nin katkılaması kaçınılmaz bir şekilde boş bağlar oluşturur. Katkılanmış a-Si:H içerisindeki yük taşıyıcılarının difüzyon uzunluğu, kusur yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle tek kristalli silisyuma göre daha küçüktür. Bu yüzden a-Si:H, c-Si:HIT güneş hücrelerinde p-n birleşimi için kullanılamaz, bunun yerine daha az kusurlu bir katman, p tipi ve n tipi katmanlarının arasında kullanılmalıdır.

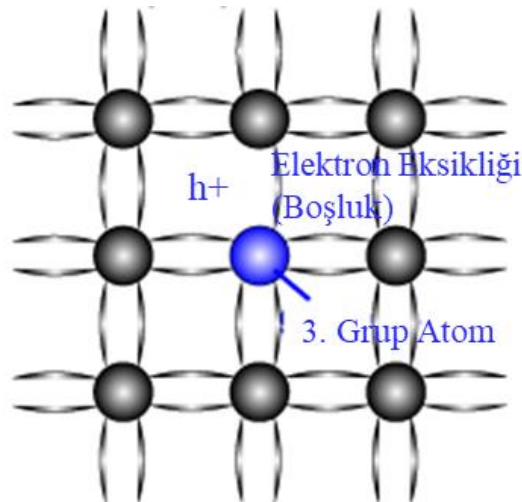
Saf silisyumun iletkenliği atomlara katkı maddesi eklenerek artırılabilir. Bu atomlar, valans bandında 5 elektron bulduran arsenik (As), fosfor (P), bizmut (Bi) ve antimondur. Saf silisyum, son yörüngesinde 5 elektron bulduran fosfor ile katkılandığında silisyum ve fosfor atomları arasında oluşan kovalent bağ şekil 2.12'de gösterilmiştir. Silisyumun son yörüngesindeki 4 elektron, fosforun son yörüngesindeki 4 elektron ile kovalent bağ kurar fakat fosforun son yörüngesindeki beşinci elektron hiçbir

atomla bağ kuramaz ve açıktta kalır. Bu fazlalık elektron, yapıyı negatif yapar ve n tipi katkılama yapılmasına olanak sağlar.



Şekil 2.12. n tipi katkılanmış a-Si:H yapısı (Honsberg ve Bowden, 2018)

P tipi katkılamada, saf silisyum son yörüngesinde 3 elektron bulunduran alüminyum (Al), bor (B) ve germanyum (Ge) ile katkılanabilir. Saf silisyum, son yörüngesinde 4 elektron bulunduran bor ile katkılandığında silisyum ve bor atomları arasında oluşan kovalent bağ şekil 2.13'te gösterilmiştir. Silisyumun son yörüngesindeki 4 elektron, borun son yörüngesindeki 3 elektron ile kovalent bağ kuracak fakat silisyumun son yörüngesindeki dördüncü elektron hiçbir atomla bağ kuramaz ve boşta bir bağ bırakır. Bu boş bağ, diğer bir deyişle delik ya da "hole", yapıda elektron eksikliği meydana getirir ve yapıyı pozitif yapar.



Şekil 2.13. p tipi katkılanmış a-Si:H yapısı (Honsberg ve Bowden, 2018)

BÖLÜM III

c-Si:HIT GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİMİ İÇİN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, ultra yüksek vakumlu plazma ile zenginleştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD) tekniğini kullanarak a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş hücresi üretim prosesini içeren, bu tez çalışmasında kullanılan deneysel teknikler sunulacaktır.

3.1 a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Hücresinin PECVD Kullanılarak Üretimi: Temel Bilgiler

Plazma ile zenginleştirilmiş kimyasal buhar biriktirme tekniğinde, silan gazı (SiH_4), silan moleküllerinin ayrışmasına neden olan 13.56 MHz plazma uyarım frekansı ile uyarılıp ve daha sonra ayrışan ürünlerin ısıtılmış altaş üzerine biriktirilmesiyle ince bir tabaka oluşturulur.

PECVD ile ince film biriktirmenin önemli bir avantajı, cihazın biriktirme sıcaklığının genellikle 150 °C - 200 °C arasında olmasıdır. Düşük sıcaklık prosesi; cam, paslanmaz çelik ve esnek plastik folyolar gibi düşük maliyetli malzemelerin de bir altaş olarak kullanılmasına olanak sağlar. PECVD sisteminin diğer bir ana avantajı da numuneleri hava kirliliğine maruz bırakmadan aynı sistem içerisinde a-Si:H tabakalarını biriktirebilmesidir.

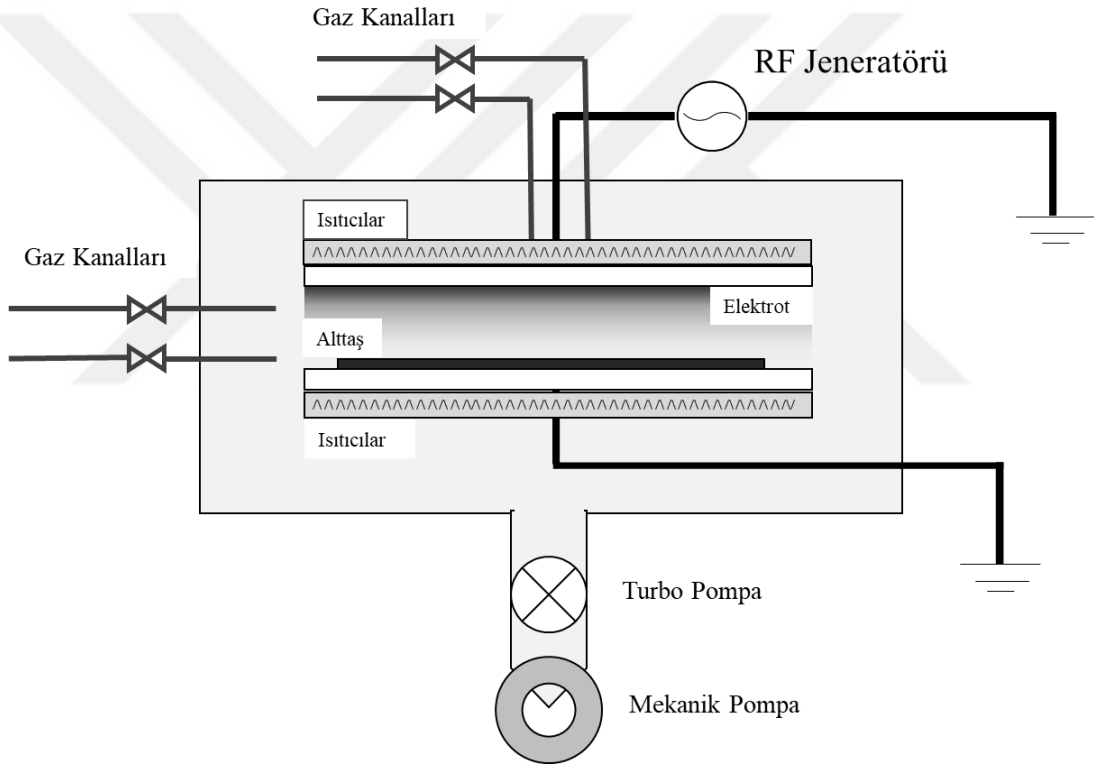
PECVD biriktirme sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmektedir. Bir PECVD sisteminin ana kısmı, turbo moleküler pompalar ve mekanik pompalar yardımıyla 10^{-9} Torr'a kadar vakumlanabilen paslanmaz çelik bir vakum odasıdır. Çoklu vakum odalı sistem yardımıyla art arda biriktirmeler arasında kalıntı gaz alışverişi önemli ölçüde azaltılarak çok keskin arayüzler oluşturulabilmektedir (Leu vd., 2011). Ek olarak, bir hava kilidi sisteminin kullanılması, arka plan vakumunun kalitesini artırır ve örneklerin hava ile temasını engelleyerek oluşacak kirliliği azaltır.

Biriktirilecek gaz karışımı, kütle akış kontrolörleri (MFC) ile sağlanır ve vakum odasının içindeki basınç, kelebek valfleri ve hassas kütle akış kontrolörleri ile sabit tutulur.

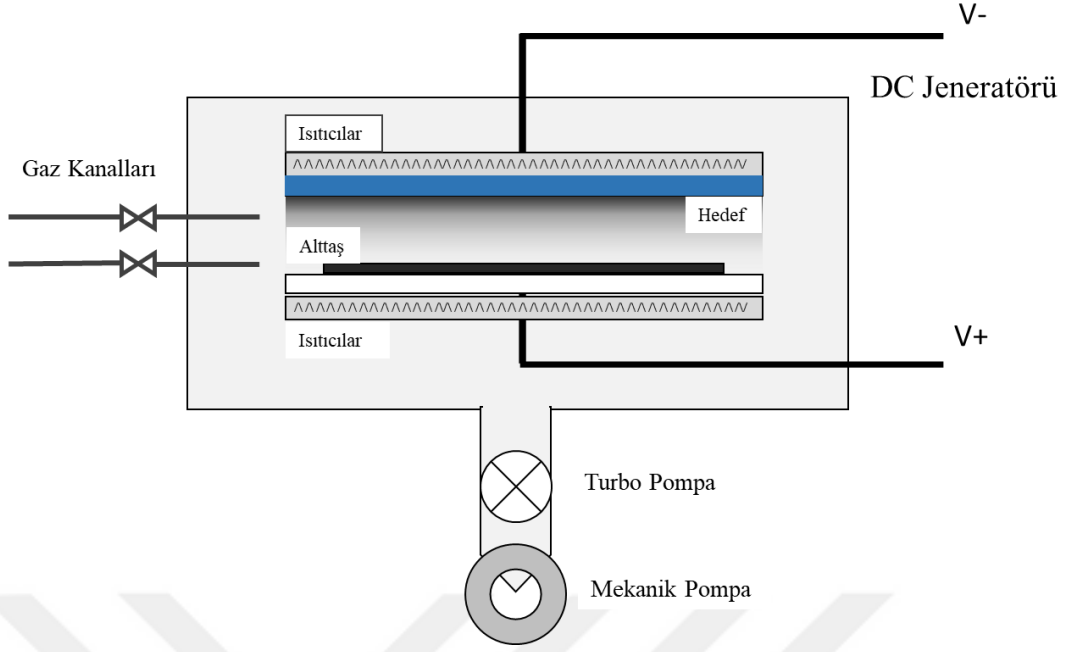
Plazma, uygun RF devresiyle reaktöre bağlanmış bir RF güç kaynağı vasıtasıyla oluşturulur ve proses gazları, ince filmler halinde biriken iyonlar ve radikallere ayrışırlar.

Kullanılan gazların çoğu tehlikelidir. Bu gazlar aşındırıcı, yanıcı, patlayıcı ve çok toksik olabilirler. Bu nedenle, bu gazlarla işlem yaparken çok dikkatli olunmalıdır. Egzoz sistemi, prosesde kullanılan gazları güvenli bir şekilde yakılarak atmosfere verilmesi için tasarlanmış yakıcı bir sistem içermektedir.

Son olarak, sistemde tüm vakum odası basıncını, vakum odası sıcaklığını, gaz akış oranını ve RF gücünü takip ve kontrol edebilen bir kontrol paneli bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Tipik bir PECVD sisteminin şematik gösterimi



Şekil 3.2. Tipik bir PVD sisteminin şematik gösterimi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kullanılan PVD/PECVD sistemi fotoğraf 3.1'de verilmiştir. Sistem, katkısız ve katkılı a-Si:H filmlerin biriktirilmesi için bir çift PECVD vakum odası, gümüş arka kontak ve ITO biriktirmesi için bir PVD (fiziksel buhar kaplama) vakum odası ve bir hava kilidi ünitesinden oluşur.

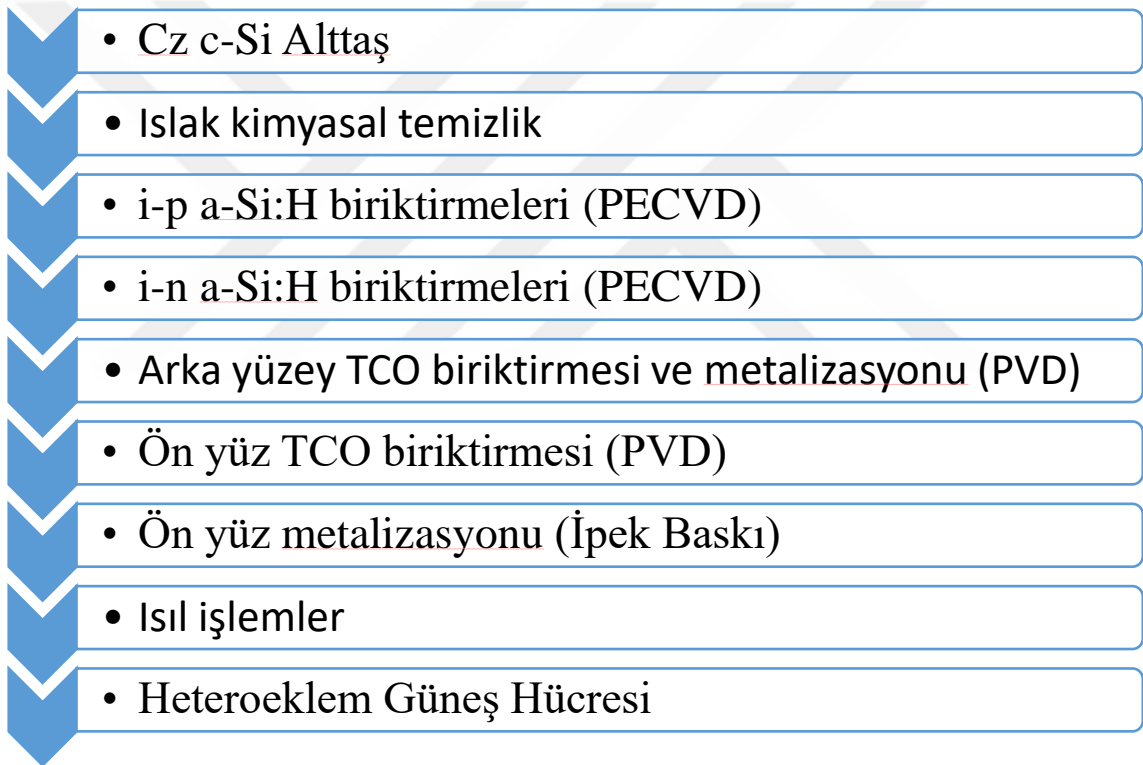


Fotoğraf 3.1. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde Kullanılan Meyer Burger marka PECVD/PVD sistemi

Yüksek verimli c-Si:HIT güneş hücresi üretiminin ilk adımı yüzey desenlendirmesidir. Ardından, altaş ıslak kimyasal temizlik adımından geçer. Bu adımda RCA 1-2 ve genellikle %1-2'lik HF (hidroflorik asit) kullanılır. Bu adımın temel amacı altaşı

kirliliklerden arındırmak ve yüzey kusurlarını azaltmaktır. Ayrıca HF ile yapılan ıslak kimyasal temizlik alttaş yüzeyinin pasivasyonuna da katkı sağlar.

Islak kimyasal temizliğin ardından alttaşın ön yüzüne sırayla (i) a-Si:H ve (p) a-Si:H ince filmleri, arka yüzeyi için de sırayla (i) a-Si:H ve (n) a-Si:H ince filmleri PECVD (plazmayla zenginleştirilmiş kimyasal buhar biriktirme) ile biriktirilir ve TCO katmanı PVD (fiziksel buhar biriktirme) yöntemi ile güneş hücresinin her iki yüzeyine de kaplanır. Gümüş arka kontaklar, TCO ile aynı PVD sisteminde kaplanır ve gümüş ön kontaklarda ipek baskı tekniği ile TCO'nun hemen üzerine uygulanır. Tüm bu işlemlerin ardından hücre yaklaşık 200°C'ın altında termal işleme tabii tutulur.



Şekil 3.3. Güneş hücresi üretim adımları

3.2 Yüksek Verimli a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Hücresi Fabrikasyonu

Bu tez çalışmasında c-Si:HIT güneş hücrelerinde hem tampon katman olarak hem de eklem olarak kullanılan a-Si:H tabakalarının optimizasyonları için farklı parametrelerde ince film biriktirilmeleri sağlanarak optimum ince film kaplama parametreleri sağlanmıştır.

3.2.1 a-Si:H biriktirmesi öncesi ıslak kimyasal temizlik

c-Si dilimleri için a-Si:H ince film biriktirmesi öncesi ıslak kimyasal temizlik adımı oldukça önemlidir. Bu adımda c-Si alttaş üzerine RCA-1, RCA-2 ve HF ile temizlik adımları uygulanmıştır.

Islak kimyasal temizlik; RCA adımımda c-Si alttaş üzerinden organik kalıntıların, filmlerin ve metal iyonlarının temizlenmesi için uygulanan, HF adımımda c-Si alttaş üzerinde oluşan oksit tabakasının kaldırılması için uygulanan bir adımdır.

Islak kimyasal temizlik aşağıdaki gibi üç adımda yapılmaktadır:

(i) RCA-1: Bu adım alttaşı organik ve film kalıntılarında temizlemek için uygulanmaktadır. Bu adımda c-Si alttaşlar 15 dakikalığına 70 °C'daki 1/7'lik %27 NH₄OH, 1/7'lik %30 H₂O₂ ve 5/7'lik saf su karışımında bekletilir. 15 dakikalık temizlik prosedürünün ardından alttaşlar saf su ile durulanarak azot ile kurutulur.

(ii) RCA-2: Bu adım alttaşı metal iyonlarından arındırmak için uygulanmaktadır. Bu adımda Alttaşlar 10 dakikalığına 70 °C'daki 1/8'lik %25 HCL, 1/8'lik %30 H₂O₂ ve 6/8'lik saf su karışımında bekletilir. 10 dakikalık temizlik prosedürünün ardından alttaşlar saf su ile durulanarak azot ile kurutulur.

(iii) HF: Bu adım c-Si alttaş yüzeyinde oluşan oksit tabakasını temizlemek için uygulanmaktadır. Alttaşlar 1.5 dakikalığına oda sıcaklığındaki %2'lik HF karışımında bekletilir. 1.5 dakikalık temizlik prosedürünün ardından alttaşlar saf su ile durulanarak azot ile kurutulur.

3.2.2 H₂ miktarının a-Si:H ince filmleri üzerine etkisinin incelenmesi

Bu tez çalışmasının geliştirme aşamasında farklı hidrojen miktarlarıyla üretilen yüksek kalitedeki a-Si:H ince filmleri 50x50 mm'lik camlar ve 50x50 mm'lik n tipi c-Si alttaşlar üzerine biriktirilerek a-Si:H biriktirmesinin optimum hidrojen parametreleri belirlenmiştir.

Camlar, kirlilikten arındırılmak için kaplama öncesi ultrasonik banyoda; c-Si dilimler de yüzeyde oluşan oksit tabakasının kaldırılması ve yüzeyin ön pasivasyonunu sağlamak için 90 saniye %2'lik HF çözeltisinde temizlenmiştir. Temizleme işleminin ardından yüzeyin tekrar oksitlenmesini önlemek için temizlenen c-Si dilimler, camlar ile birlikte hızlı bir şekilde PECVD sisteminin hava kilidinden sisteme yerleştirilmiştir. Sistem n tipi a-Si:H için 3, p tipi a-Si:H için 2 mbar basınç ve 200 °C'a ulaşır, a-Si:H ince film büyütmesi için uygun koşullar sağlandıktan sonra 150W'lık bir plazma gücü altında;

(i) n a-Si:H büyütmesi için 100 sccm SiH₄ ve 200 sccm PH₃ gaz akışıyla beraber 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H₂ gaz akışı;

(ii) p a-Si:H büyütmesi için 100 sccm SiH₄ ve 300 sccm TMB gaz akışıyla beraber 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H₂ gaz akışı kullanılarak yüksek kalitede a-Si:H ince filmleri hem cam, hem de c-Si dilimler üzerinde büyütülmüştür

Üretilen bu a-Si:H ince filmlerinin optiksel ve elektriksel özellikleri incelenmiş ve optimum a-Si:H yapısı seçilerek yüksek verimli heteroeklem güneş hücresi üretimi yapılmıştır.

3.2.3 Endüstriyel boyutlu (156x156 mm) a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş hücresi üretimi

50x50 mm'lik cam ve c-Si alttaşlar üzerinde yapılan optimizasyonunda elde edilen sonuçlara göre n tipi için 800 sccm, p tipi için 700 sccm hidrojen kullandığında filmin optiksel olarak daha yüksek kalitelere ulaştığı gözlenmiş ve bu gözlemler ışığında 156x156 mm'lik gerçek boyutlu güneş hücresi üretimi için bu parametreler kullanılmıştır.

Alttaş olarak desenlendirilmiş n tipi (Cz) c-Si dilim kullanılmıştır. Fabrikasyondan önce c-Si dilim, küçük boyutlu c-Si dilimlerde de olduğu gibi oksidasyondan arındırılmak için 90 saniye %2'lik HF çözeltisinde temizlenmiştir. Temizlenen c-Si dilim HF işlemi sonrasında hızlı bir şekilde PECVD sisteminin hava kilidinden sisteme yerleştirilip, n katmanı için 3, p katmanı için 2 mbar basınç ve 200 °C'lık bir alttaş sıcaklığında, 150 W'lık bir plazma gücünde; (i) a-Si:H ince filmi büyütme için 50 sccm'lik SiH₄ gaz akışına, 500 sccm H₂; (n) ve (p) a-Si:H büyütme için 100 sccm'lik SiH₄ gaz akışına, (n)

a-Si:H ince filmi büyütmek için 200 sccm PH₃ ve 800 sccm H₂; (p) a-Si:H ince filmi büyütmek için 300 sccm TMB ve 700 sccm H₂ gaz akışı karıştırılarak yüksek kalitede a-Si:H ince filmleri endüstriyel boyutlu c-Si dilimleri üzerine büyütülmüştür.

Büyütülen yüksek kalitedeki a-Si:H ince filmlerinin ardından hücrenin ön ve arka yüzüne PVD sistemi ile geçirgen iletken oksit tabaka olarak ITO (indiyum kalay oksit) ve arka kontak olarak gümüş kaplaması yapılmıştır. Ön kontaklar da yüksek kaliteli gümüş pasta ile ipek baskı yöntemiyle hücre üzerinde oluşturulmuştur.



BÖLÜM IV

DENEYSEL BULGULAR

Bu tez çalışmasında yüksek verimli a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş hücresi başarıyla üretilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda n ve p tipi a-Si:H ince film katmanlarının üretimi sırasında kullanılan SiH₄/PH₃/H₂ ve SiH₄/TMB/H₂ gaz akışlarından H₂ gazının plazmadaki miktarı değiştirilerek hem cam hem de c-Si dilimler üzerinde a-Si:H ince filmleri büyütülerek analizleri yapılmıştır. Daha sonra, tez çalışması kapsamında üretilen 50x50 mm c-Si alttaşların ve camların üzerine büyütülen a-Si:H kaplamaların ve endüstriyel boyuttaki c-Si güneş hücresinin optiksel ve elektriksel özelliklerinin tayini için, fotoluminesans, elektrolüminesans, güneş simulatörü, elipsometre, temassız direnç ölçer ve FT-IR cihazlarıyla karakterizasyonlar yapılmıştır.

4.1 Elipsometre

Elipsometre; ince filmleri, yüzeyleri ve materyalin mikro/nano yapısını karakterize etmek için polarize ışığı kullanan hassas bir ölçüm tekniğidir. Elipsometre temelde malzeme yapısından yansıyan ya da geçen ışığın polarizasyondaki değişikliği ölçer. Polarizasyondaki değişim bir genlik oranı Ψ ve faz değişimi Δ ile ifade edilir. Ölçülen tepki malzemenin kalınlığına ve optik özelliklerine bağlıdır. Elipsometre ayrıca malzemenin kalınlığı, optik sabitleri, kristalliği, pürüzlülüğü, katkı konsantrasyonu ve optik tepki değişikliğine bağlı diğer materyal özelliklerini karakterize etmek için de kullanılır (J.A.Woollam, 2017).

Işık elektromanyetik bir dalga olarak tanımlanabilir. Elipsometre kullanımı için bu elektromanyetik dalganın elektrik alan davranışını incelemek gerekir. Bir dalganın elektrik alanı daima yayılma yönüne diktir. Bu nedenle, z-yönünde hareket eden bir dalga, x ve y bileşenleri ile tanımlanabilir. Işık tamamen rastgele bir yönelme ve faz içerdiğinde, polarize edilmemiş olarak kabul edilir. Bununla birlikte, elipsometri için, belirli bir yolu izleyen ve herhangi bir noktada belirgin bir şekle sahip olan elektrik alanı türü önemlidir. Bu polarize olmuş ışık olarak bilinir. İki ortogonal ışık dalgası aynı fazdaysa, ortaya çıkan ışık doğrusal olarak polarize olur. Göreli genlikler ve fazlar yönelmenin türünü belirler. Ortogonal dalgalar 90° faz dışı ve genlikte ise, ışık dairesel polarize olur. Elipsometrenin

de adını aldığı, en yaygın polarizasyon keyfi bir genlikteki ortogonal dalğanın ve fazın kombinasyonundan oluşan eliptik polarizasyondur.

Elipsometre sistemi, ışık kaynağı olarak 75 watlık Xenon ark lambası, polarizasyon jeneratörü, modülatör, polarizasyon analizörü ve dedektör içerir. Işık fiber optik kablolarla polarize ediciye girer. Kutuplayıcı, gelen ışığın numune yüzeyine erişmeden önce polarizasyon durumunu tanımlar. Polarizasyon modülatörü, zamanın bir fonksiyonu olarak polarizasyonun eliptikitesini değiştirerek polarizasyon durumunu değiştirir. Daha sonra, yansıyan ışının polarizasyonu başka bir polarizör analizörü ile analiz edilir. Analizörden sonra ışık, monokromatörden geçer, UV ve görünür aralık için fotomültkörler ve IR spektral aralığı için InGaAs dedektörü gibi spektral menziline bağlı olarak dedektörler tarafından tespit edilir. Dedektör, yansıyan kutuplaşmayı saptamak için ışığı elektronik sinyale dönüştürür. Elde edilen polarizasyon, bilinen yansıma polarizasyonu ile karşılaştırılarak, numune yansımasının neden olduğu polarizasyon değişimi Psi (Ψ) ve Delta'nın (Δ) parametreleri ile belirlenir.

Elipsometre ölçümleri materyalin psödo dielektrik fonksiyonu olan ϵ tabanlı olarak yapılır (Muñoz Cervantes, 2008).

$$\langle \epsilon(\omega) \rangle = \sin^2 \theta_0 \left(1 + \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right) \tan^2 \theta_0 \right) = \langle \epsilon_1(\omega) \rangle + i \langle \epsilon_2(\omega) \rangle \quad (4.1)$$

Burada ρ ; Δ ve Ψ açılarına bağlı yansıtma katsayıları r_p ve r_s 'nin ölçümlerinden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\Psi) \exp(i\Delta) \quad (4.2)$$

Deneysel elipsometre ölçümü aşağıdaki adımlardan oluşur:

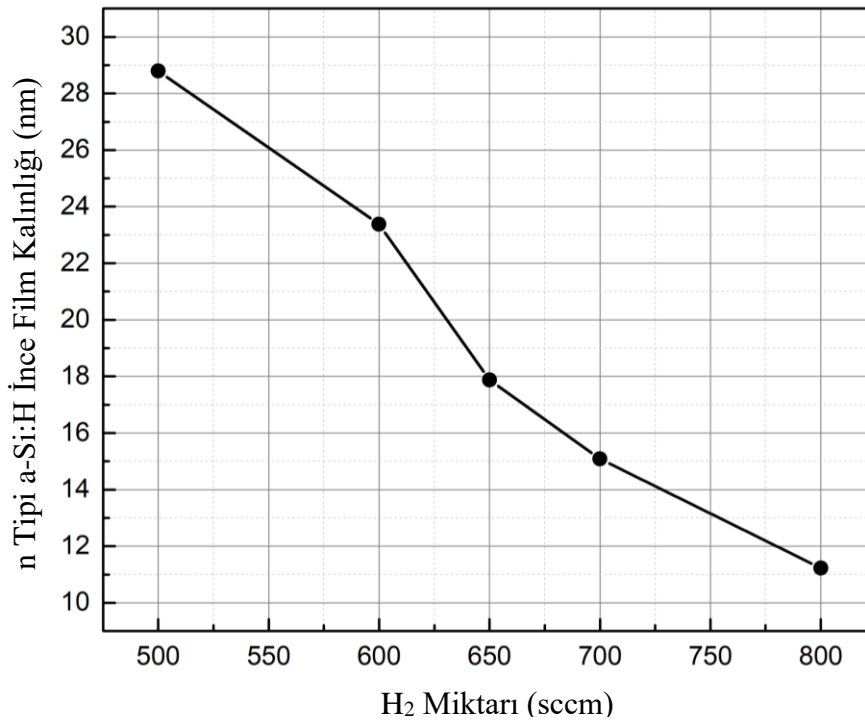
- i. Ölçüm elipsometrik açıları olan Ψ ve Δ 'nın verilerini içerir,
- ii. Numune parametrelerini belirleyecek bir model tanımlanır,

- iii. Model tanımlandıktan sonra, deneysel veriler iyi bilinen fiziksel dağılım formüllerine uydurulur ve iki set arasındaki en iyi eşleşme elde edilir.

Yüksek kaliteli camlar üzerinde büyütülen, n tipi için 200 sccm PH_3 gaz akışına, p tipi için 300 sccm TMB gaz akışına karıştırılan 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H_2 gaz akışıyla üretilen yüksek kaliteli a-Si:H ince filmlerinin elipsometrik ölçüm sonuçları sırasıyla çizelge 4.1 ve 4.2’de, grafikleri şekil 4.1 ve 4.2’te verilmiştir.

Çizelge 4.1. n tipi a-Si:H biriktirmesi için 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H_2 gaz akışı için elipsometrik ölçüm sonuçları

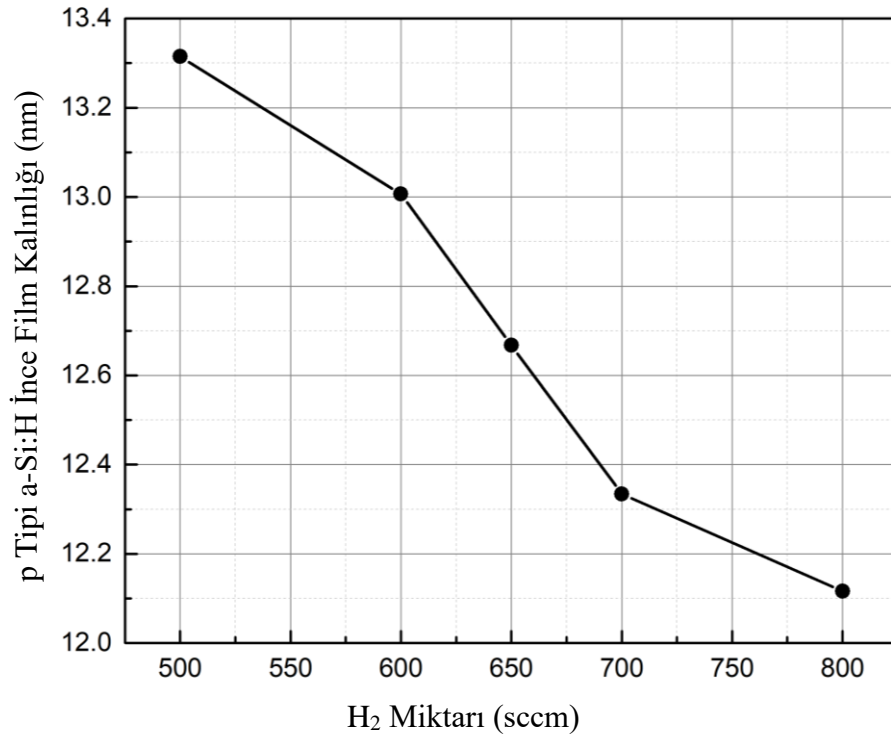
n katmanlı için elipsometrik kalınlık analizi			
H_2 Miktarı (sccm)	1. Ölçüm (nm)	2. Ölçüm (nm)	Ortalama (nm)
500	29.018	28.566	28.792
600	23.363	23.398	23.3805
650	18.048	17.696	17.872
700	15.275	14.892	15.0835
800	11.254	11.2	11.227



Şekil 4.1. n tipi a-Si:H ince film biriktirme kalınlığı ile H_2 miktarı arasındaki ilişki

Çizelge 4.2. p tipi a-Si:H biriktirmesi için 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H₂ gaz akışı için elipsometrik ölçüm sonuçları

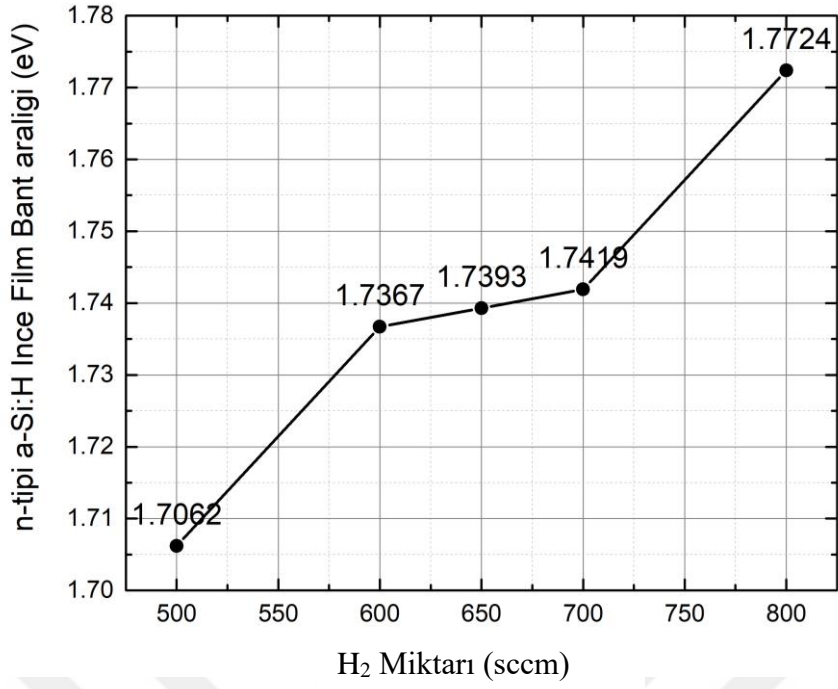
p katmanı için elipsometrik kalınlık analizi			
H ₂ Miktarı (sccm)	1. Ölçüm (nm)	2. Ölçüm (nm)	Ortalama (nm)
500	13.339	13.291	13.315
600	13.871	12.142	13.0065
650	12.527	12.808	12.6675
700	12.339	12.33	12.3345
800	12.085	12.147	12.116



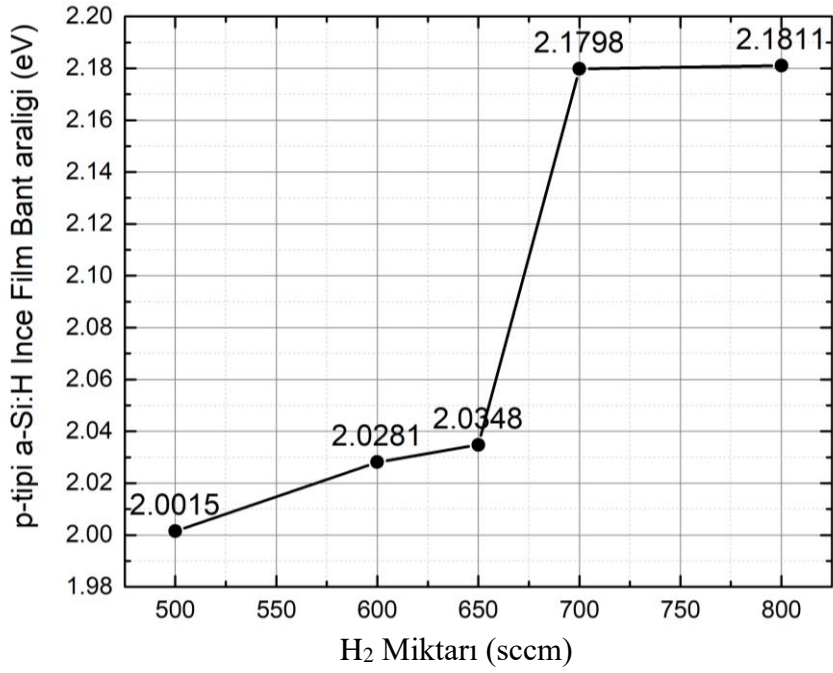
Şekil 4.2. p tipi a-Si:H ince film biriktirme kalınlığı ile H₂ miktarı arasındaki ilişki

Bu grafiklerden de açıkça görülebildiği gibi a-Si:H yapısında kullanılan hidrojen miktarındaki artış, a-Si:H katmanının kalınlığını azaltmaktadır. Kalınlıktaki bu azalma her ne kadar daha yüksek Voc değerlerine ulaşılmasını sağlasa da Isc'yi düşürecek ve balt direncini arttıracaktır. Bu yüzden optimum verimlilik için optimum hidrojen miktarı ve optimum kalınlık seçilmelidir.

Elipsometre kullanılarak yapılan bir diğer analiz de bant aralığı analizidir. Hidrojen miktarının değişimine göre a-Si:H ince filmlerinin bant aralığındaki değişimler şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.3. n tipi a-Si:H üretiminde kullanılan hidrojen miktarı ile bant aralığı arasındaki ilişki

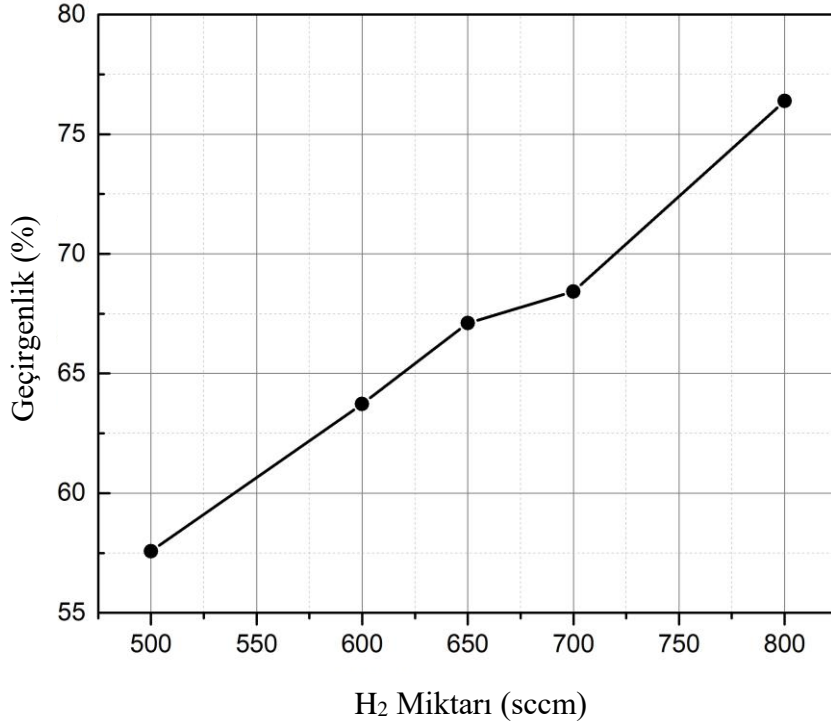


Şekil 4.4. p tipi a-Si:H üretiminde kullanılan hidrojen miktarı ile bant aralığı arasındaki ilişki

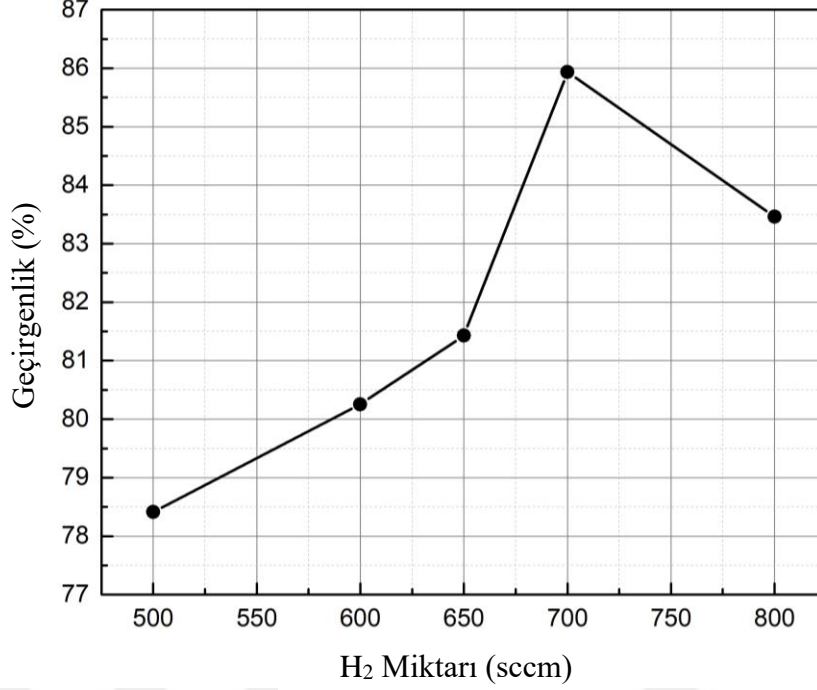
4.2 a-Si:H İnce Filmlerin Geçirgenlik Ölçümleri

Üretilen n ve p tipi a-Si:H ince filmlerinin geçirgenlikleri Sugarus marka temassız direnç ölçüm cihazınının 633 nm dalga boylu lazer ışını kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 4.5 ve

4.6'te sırasıyla n ve p tipi a-Si:H ince filmlerinin geçirgenliklerinin H₂ miktarına olan ilişkilerine ait grafikler verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda n tipi a-Si:H ince filmi için 800 sccm H₂ miktarında maksimum geçirgenliğe ulaşılırken, p tipi a-Si:H ince filmi için 700 sccm H₂ miktarında maksimum geçirgenliğe ulaşılmıştır.



Şekil 4.5. n tipi a-Si:H ince film geçirgenliği ile H₂ miktarı arasındaki ilişki



Şekil 4.6. p tipi a-Si:H ince film geçirgenliği ile H₂ miktarı arasındaki ilişki

4.3 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

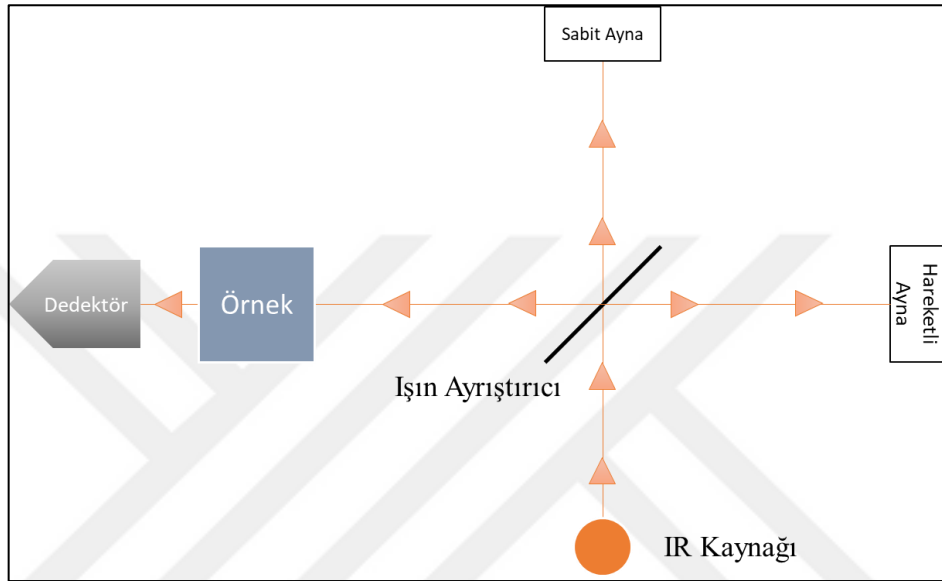
FT-IR, bir kızılötesi absorpsiyon spektrumu kullanarak malzemenin moleküllerinin kimyasal bağlarını tanımlamak için kullanılan oldukça etkili bir ölçüm yöntemidir. Moleküler yapıların spesifik frekanslarla titreştiği bilinmektedir, FT-IR bu moleküler titreşimleri tanımlayarak malzeme absorpsiyonu ve bağ yapısı hakkında bilgi veren bir analiz yöntemidir. Yapılan analizlerde MCT dedektör ve KBR ışın ayırıcısı kullanan Bruker marka Vertex 70 FT-IR sistemi kullanılmıştır. Bir FT-IR sisteminin şematığı şekil 4.7’de verilmiştir. FT-IR analizinde ışın öncelikle Michelson interferometresinden geçer ve örneğe ulaşır, örneğin moleküler titreşimine göre gelen ışında oluşan değişim dedektörde analiz edilir ve transmittans olarak tanımlanır. Formülasyonu aşağıda formül 4.3’te verilmiştir.

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\epsilon bc} \quad (4.3)$$

Tanımlanan bu transmittans aşağıda verilen formülasyon ile absorbansa dönüştürülür.

$$A = -\ln(T) = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \epsilon bc \quad (4.4)$$

Bu formülasyonlarda T, transmittans; I ve I₀, ışık yoğunluğu; ε, molar emicilik; b, ışık yolunun uzunluğu; c, kimyasal türlerin molar konsantrasyonu ve A, absorpsiyon olarak tanımlanabilir



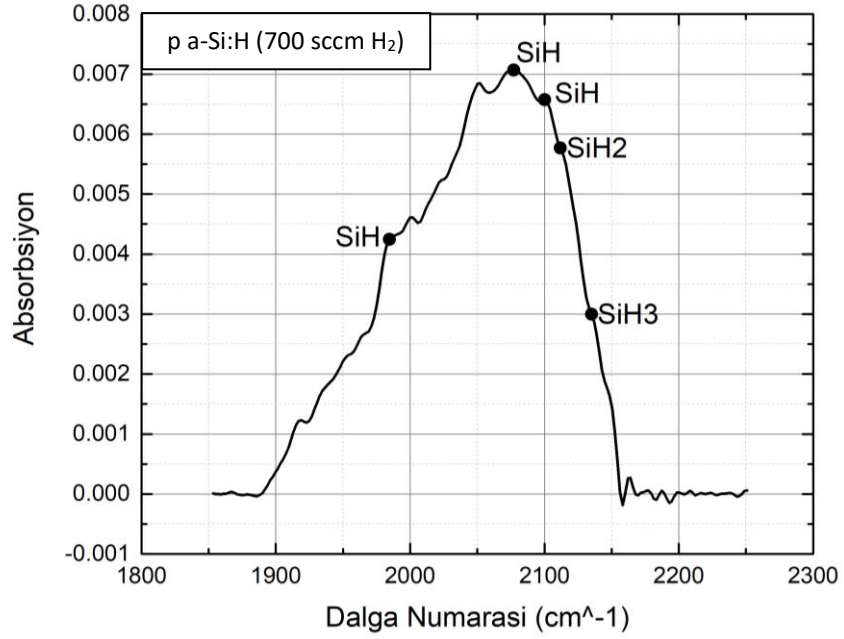
Şekil 4.7. Tipik bir FT-IR sisteminin şematik gösterimi

a-Si:H farklı hidrojen bağ konfigürasyonları içerdiği için her konfigürasyonun kendine özgü bir absorpsiyon piki mevcuttur. Muhtemel pikler için pik pozisyonları çizelge 4.3'te verilmiştir.

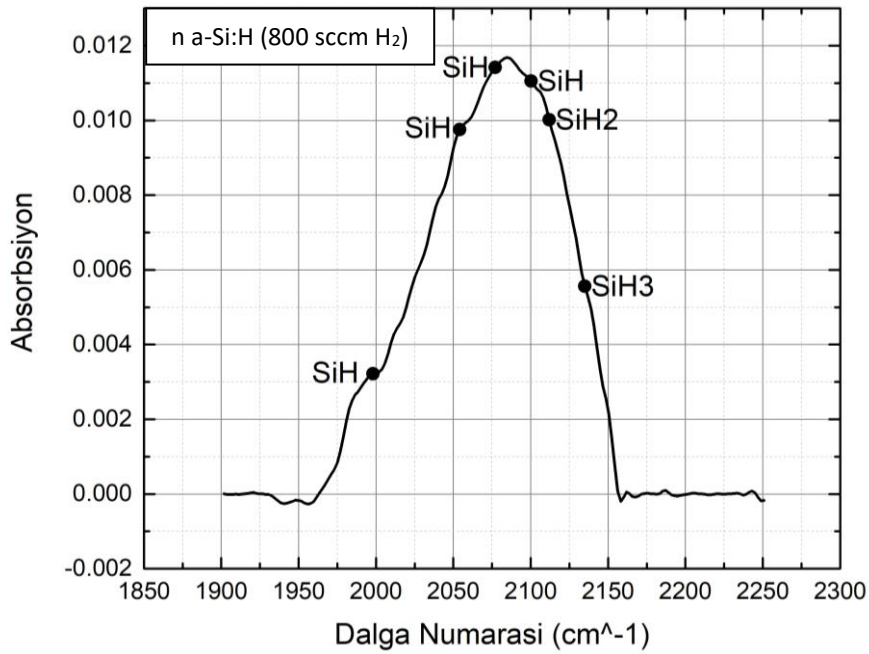
Çizelge 4.3. a-Si:H ince filmleri için muhtemel pik pozisyonları (Smets, 2002; Oever vd., 2007; Peng vd., 2009)

	Hidrid Tipi	Pik Pozisyonu (cm ⁻¹)
a-Si:H İnce Filmleri	SiH	2070-2080
	SiH	2095-2105
	SiH ₂	2110-2120
	SiH ₃	2135-2145

Bu çizelge doğrultusunda 700 sccm H₂ gaz akışı kullanılan p ve 800 sccm gaz akışı kullanılan optimum n tipi a-Si:H ince filmlerinin FT-IR grafikleri aşağıda şekil 4.8 ve 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8. n tipi a-Si:H için IR bölgesinde FT-IR ATR ile elde edilen absorpsiyon grafiği



Şekil 4.9. p tipi a-Si:H için IR bölgesinde FT-IT ATR ile elde edilen absorpsiyon grafiği

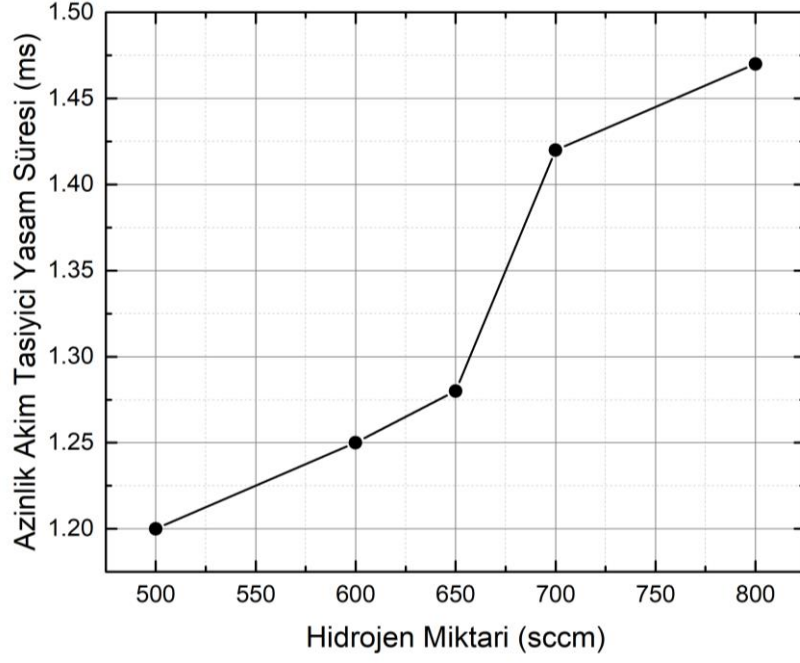
4.4 Taşıyıcı Yaşam Süresi Ölçüm

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

c-Si alttaşlar üzerinde, n tipi için 200 sccm PH₃ gaz akışına, p tipi için 300 sccm TMB gaz akışına karıştırılan 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H₂ gaz akışıyla üretilen yüksek kaliteli a-Si:H ince filmlerinin 1E+15 cm⁻³ azınlık akım taşıyıcı yoğunluğunda ve transient modunda yapılan azınlık akım taşıyıcı (MC) yaşam süresi ölçüm analizi sonuçları sırasıyla çizelge 4.4 ve 4.5'te, grafikleri de şekil 4.10 ve 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. n tipi a-Si:H biriktirmesi için 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H₂ gaz akışı için azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi sonuçları

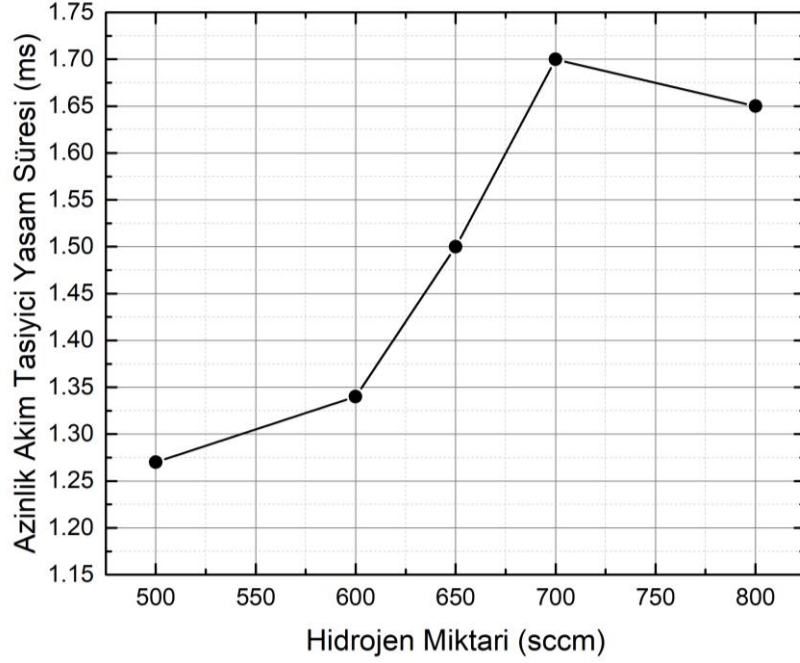
n katmanı için azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi	
H ₂ Miktarı (sccm)	Yaşam Süresi (ms)
500	1.2
600	1.25
650	1.28
700	1.42
800	1.47



Şekil 4.10. n tipi a-Si:H ince film azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi ile H₂ miktarı arasındaki ilişki

Çizelge 4.5. p tipi a-Si:H biriktirmesi için 500, 600, 650, 700 ve 800 sccm H₂ gaz akışı için azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi sonuçları

p katmanı için azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi	
H ₂ Miktarı (sccm)	Yaşam Süresi (ms)
500	1.27
600	1.34
650	1.5
700	1.7
800	1.6

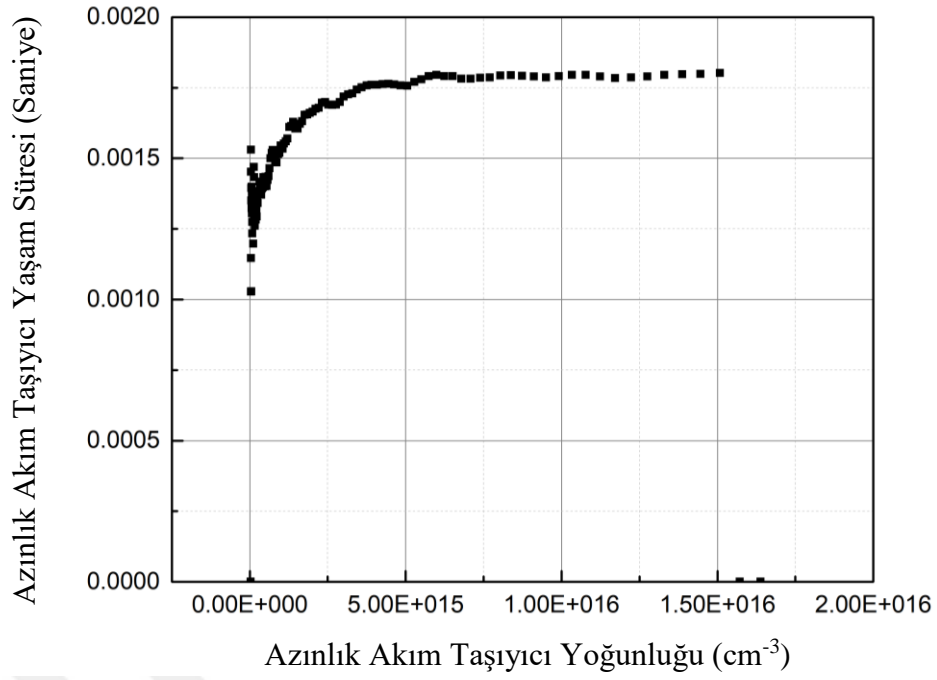


Şekil 4.11. p tipi a-Si:H ince film azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi ile H₂ miktarı arasındaki ilişki

Yapılan analizler doğrultusunda n tipi a-Si:H ince filmi için 800 sccm, p tipi a-Si:H ince filmi için 700 sccm hidrojen kullanıldığında daha yüksek taşıyıcı yaşam süresi alındığı görülmüştür. Dolayısıyla bu konfigürasyondan daha yüksek verimlilik beklenmektedir.

Bu bilgiler ışığında n tipi a-Si:H ince film biriktirmesi için 800 sccm, p tipi a-Si:H ince film biriktirmesi için 700 sccm hidrojen miktarı kullanılarak yüksek verimli bir c-Si:HIT güneş hücresi üretilmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır.

$1E+15 \text{ cm}^{-3}$ azınlık akım taşıyıcı yoğunluğunda ve transient modunda yapılan yaşam süresi ölçüm analizi sonucunda üretilen güneş hücresi için $1536.45 \mu\text{s}$ taşıyıcı yaşam süresi ölçülmüştür. Yapılan analizin grafiği şekil 4.11'de verilmiştir.

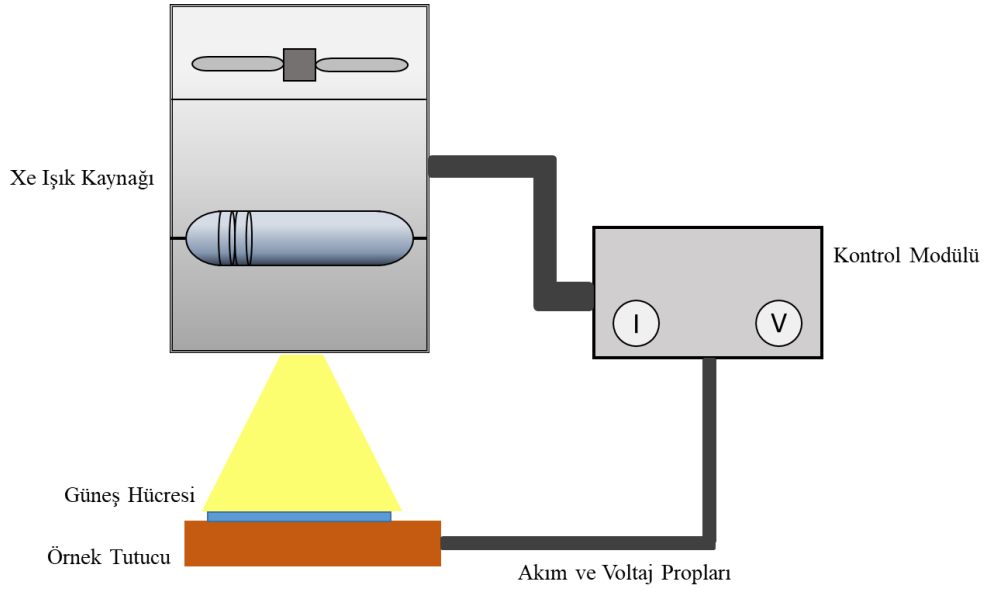


Şekil 4.12. Azınlık akım taşıyıcı yoğunluğunun, yaşam süresine olan grafiği

4.5 Güneş Simulatörü

Güneş simülatörü, doğal güneş ışığına çok yakın aydınlatma sağlayan bir cihazdır. Güneş simülatörü, güneş hücrelerinin gerçek güneş ışığı altında nasıl bir performans sergileyeceğinin laboratuvar koşulları altında test edilmesine olanak sağlar.

Sistem 1000 W/m²'lik aydınlatma sağlayan bir Xe ışık kaynağı kullanmaktadır. Işık kaynağı tarafından üretilen sanal güneş ışığı 50 ms'lik bir flaş patlaması şeklinde numune üzerine düşürülür ve güneş simülatörünün problemleri sayesinde oluşan elektrik akımı toplanıp analiz edilir. Yazılım tarafından oluşturulan I-V (elektrik akımı – voltaj) eğrisi, numunenin güneş altındaki performansını verir.



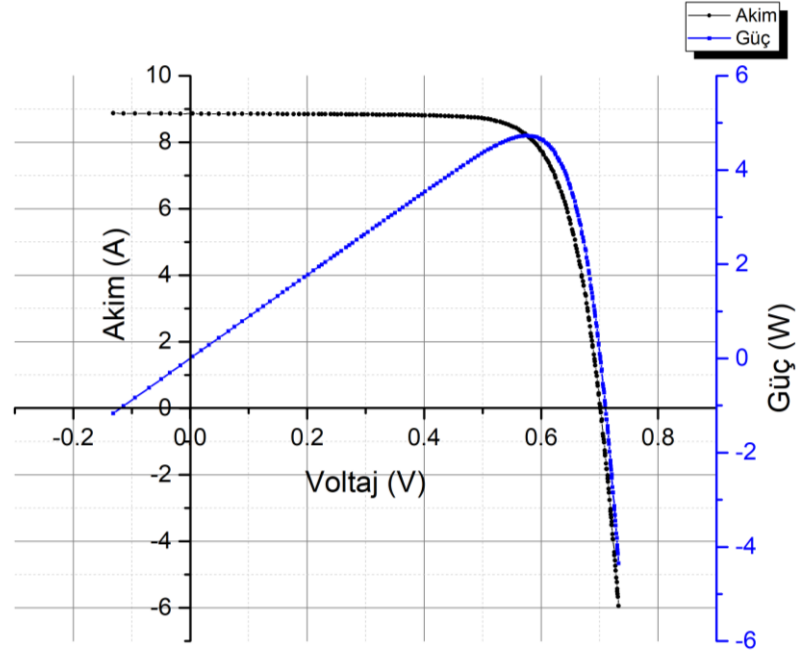
Şekil 4.13. Tipik bir güneş simülatörü sisteminin şematik gösterimi

n tipi a-Si:H katmanında 100 sccm'lik SiH_4 gaz akışına 200 sccm PH_3 ve 800 sccm H_2 , p tipi a-Si:H katmanında 100 sccm'lik SiH_4 gaz akışına 300 sccm TMB ve 700 sccm H_2 gaz akışı karıştırılarak üretilmiş, toplam kalınlığı ~ 20 nm olan i-n ve i-p a-Si:H ince filmleriyle üretilen güneş hücresinin Kopel marka güneş simülatörü ile 25°C sıcaklıktaki temiz oda ortamında yapılan güneş simülatörü analizi sonucunda üretilen güneş hücresi 0.699 V açık devre voltajı ve %76.1 doldurma oranı ile %19.78 verimlilikte ölçülmüştür. Yapılan analiz sonuçları çizelge 4.6'da ve yapılan analizin akım-gerilim eğrisi şekil 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.6. 1 Güneş aydınlatması (1000 W/m^2) altında elde edilen güneş simülatörü verileri

Verimlilik (Eff)	Doldurma Oranı (FF)	Kısa Devre Akımı (I_{sc})	Kısa Devre Akım Yoğunluğu (J_{sc})	Açık Devre Voltajı (V_{oc})
19.78%	76.01%	8.861 A	37.082 mA/cm ²	0.699 V

Maksimum Güç (M_{pp})	Maksimum Güç Noktasındaki Voltaj (V_{pm})	Maksimum Güç Noktasındaki Akım (I_{pm})	Seri Direnç (R_s)	Paralel Direnç (R_{sh})
4.709 W	0.573 V	8.214 A	2.58 mohm	17.102 ohm

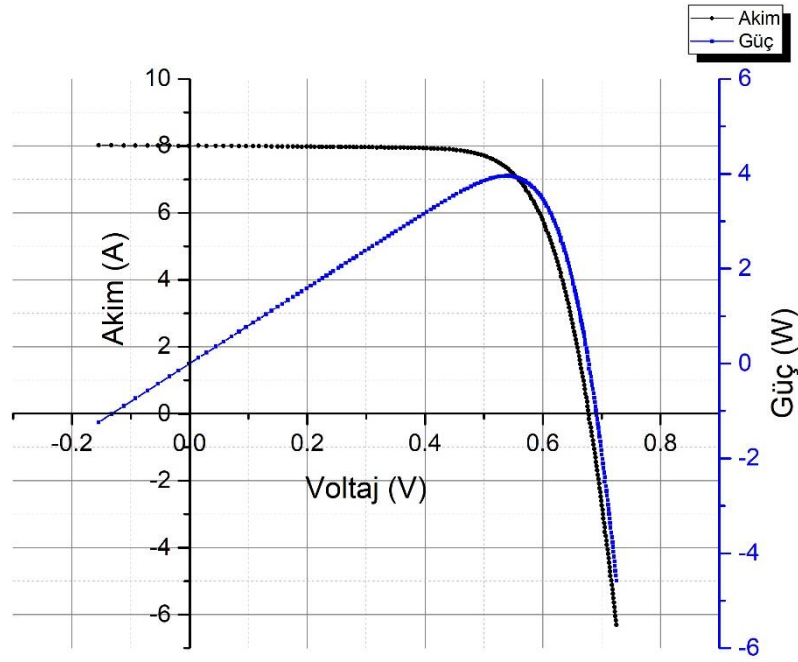


Şekil 4.14. %19.78 verimli c-Si:HIT güneş hücresinin I-V karakteristiği

n ve p katmanı için 500 sccm hidrojen miktarı kullanılarak, %16.9 verimle üretilen güneş hücresinin fotovoltaik parametreleri tablo 4.7’de, akım – voltaj eğrisi de şekil 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. n ve p katmanı için 500 sccm H₂ miktarı kullanılarak üretilen güneş hücresinin, 1 güneş aydınlatması (1000 W/m²) altında elde edilen güneş simülasyonu verileri

Verimlilik (Eff)	Doldurma Oranı (FF)	Kısa Devre Akımı (Isc)	Kısa Devre Akım Yoğunluğu (Jsc)	Açık Devre Voltajı (Voc)
16.905 %	73.95 %	7.986 A	33.422 mA/cm ²	0.699 V
Maksimum Güç (Mpp)	Maksimum Güç Noktasındaki Voltaj (Vpm)	Maksimum Güç Noktasındaki Akım (Ipm)	Seri Direnç (Rs)	Paralel Direnç (Rsh)
4.015 W	0.546 V	7.353 A	4.28 mohm	8.965 ohm



Şekil 4.15. n ve p katmanında 500 sccm H₂ kullanılarak üretilen güneş hücresinin I-V karakteristiği

Çizelge 4.6 ve 4.7 ile şekil 4.14 ve 4.15’de de görüldüğü gibi hidrojen miktarındaki artış güneş hücresi performansında bir artışa sebep olmuştur.

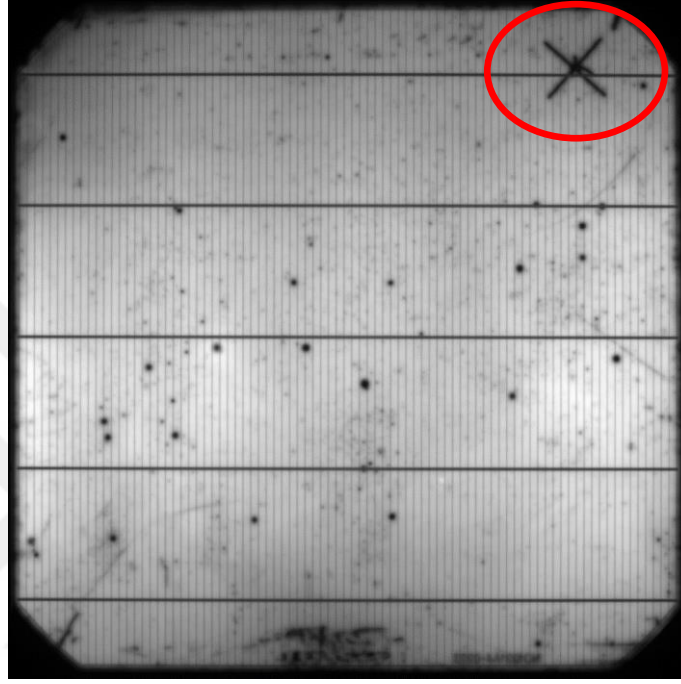
4.6 Fotolüminesans (PL) ve Elektrolüminesans (EL)

PL/EL sistemi için temelde güneş hücrelerinin röntgen cihazı denebilir. Bu sistem güneş hücresinin PL ve EL emisyonunu ölçerek güneş hücresi içerisinde meydana gelen mikro çatlaklar, ince akım taşıyıcı kusurları, üretim hattında oluşabilecek sorunlar ve hücre üzerindeki kirlilik hakkında, yani hücrenin iç yapısı hakkında detaylı bir veri elde edilebilmesine olanak sağlar. Bu sistem ile güneş hücreleri, güneş ışığı alan yüzü üzerinden yüksek hassasiyetteki kamera sistemleri ile PL ya da EL kusurları kullanılarak karakterize edilir.

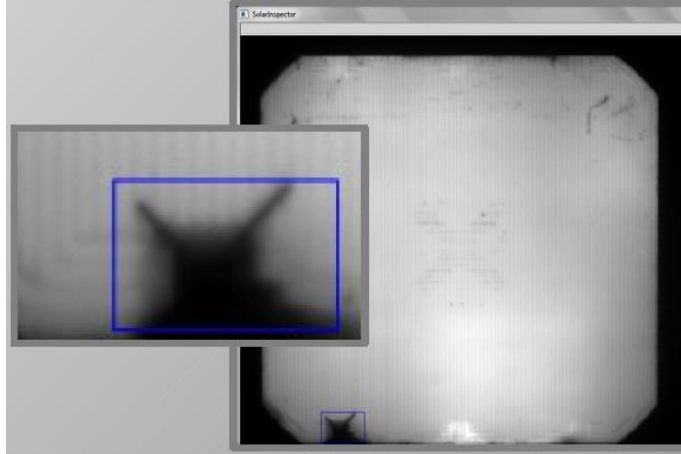
PL/EL sistemi bir adet CCD sensörü içeren bir kamera, termal kamera, LED ışık kaynakları ve 750 W’lık bir güç kaynağı içermektedir.

Üretilen yüksek verimli güneş hücresi PL ve EL ile karakterize edilmiştir. Aşağıda fotoğraf 4.1’de Yüksek verimli c-Si heteroeklem güneş hücresinin fotolüminesans, fotoğraf 4.3’te de elektrolüminesans görüntüsü bulunmaktadır.

Fotoğraf 4.1’de kırmızı ile belirtilen bölümde hücrenin iç yapısında meydana gelmiş bir mikro çatlak görünmektedir. Bu görüntüye göre bu mikro çatlakın genişliğinin hücre içerisindeki hareket eden elektronların akışını engellemediği de görülmektedir. Karşılaştırma amacıyla, hücre performansında ciddi kayıplara yol açabilecek örnek bir mikro çatlakın görüntüsü Fotoğraf 4.2’de verilmiştir.



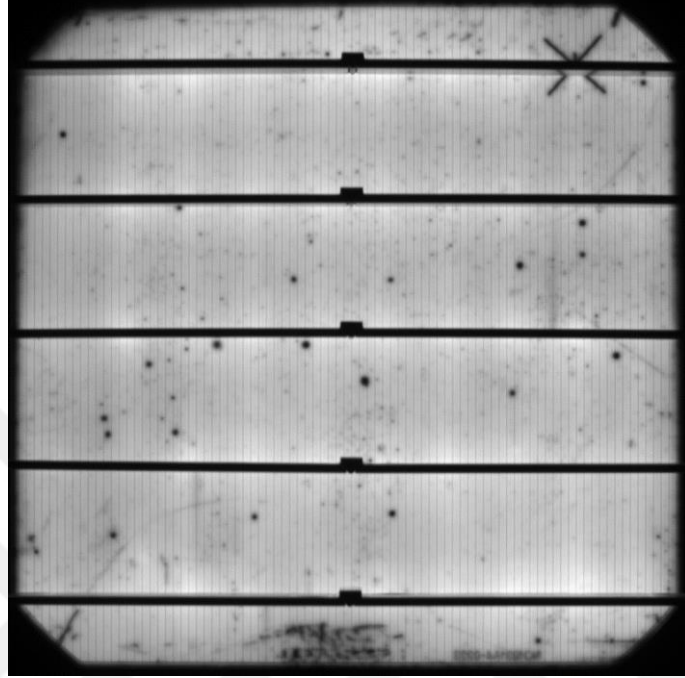
Fotoğraf 4.1. Üretilen yüksek verimli güneş hücresinin EL görüntüsü



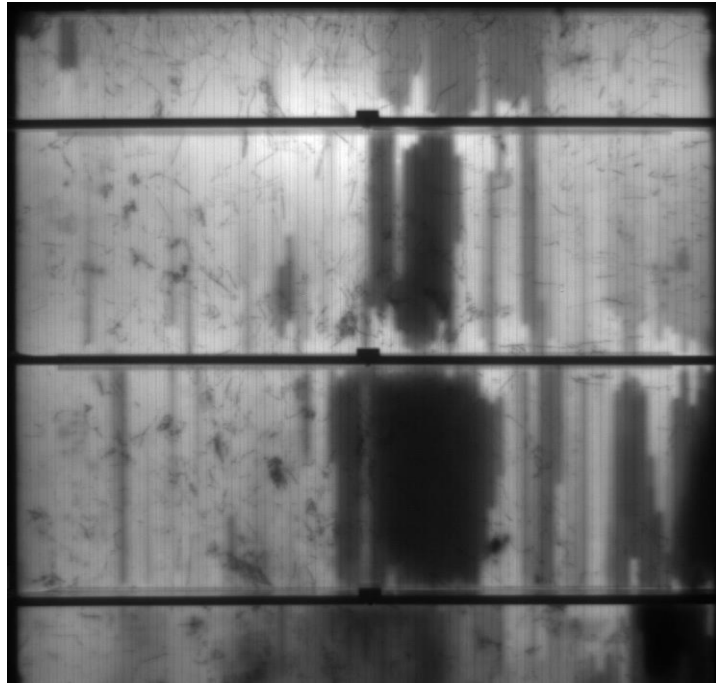
Fotoğraf 4.2. Hücre performansına ciddi şekilde etki edebilecek bir mikro çatlakın PL görüntüsü (GreatEyes, 2017)

Fotoğraf 4.3’te de aynı güneş hücresinin elektrolüminesans görüntüsü bulunmaktadır. Çekilen bu elektrolüminesans görüntüsüne göre üretilen güneş hücresinin

metalizasyonunda bir sorun olmadığı açıkça görülmektedir. Karşılaştırma amacıyla, metalizasyonunda ciddi sorunlar barındıran bir hücrenin EL görüntüsü Fotoğraf 4.4'te verilmiştir.



Fotoğraf 4.3. Üretilen yüksek verimli güneş hücresinin EL görüntüsü



Fotoğraf 4.4. Metalizasyonunda ciddi sorunlar barındıran örnek bir EL görüntüsü
(GreatEyes, 2017)

Her ne kadar üretilen güneş hücresi üzerinde bir mikro çatlak tespit edilmiş olsa da, PL ve EL görüntüleri, bu çatlağın hücrenin yapısında büyük bir zarara neden olmadığını göstermektedir.



BÖLÜM V

SONUÇ

İklim değişikliğinin artan etkileri ve fosil yakıt stoklarının azalmasının ciddi ekonomik ve siyasi sonuçları, son yıllarda enerji kaynaklarımızı yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru kaydırmak için bir aciliyet yaratmıştır. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında, güneş enerjisi mevcut ve gelecekteki enerji sorunlarını çözmek için sürdürülebilir büyük bir potansiyele sahiptir. Buna rağmen güneş hücrelerinin güç üretme maliyeti depolama ile beraber düşünüldüğünde diğer güç üretme teknikleri (kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar) ile kıyaslandığında yüksektir. Bu yüzden güneş hücresi araştırma ve geliştirme çalışmalarının çözmesi gereken başlıca iki sorun vardır: (1) üretim maliyetlerinin düşürülmesi, (2) modül verimliliğinin artırılması. Bu sorunları çözerken aynı zamanda az malzeme kullanan ve daha az çevresel atık bırakan teknolojiler geliştirmelidir. Mevcut silisyum (Si) tabanlı güneş hücreleri geleneksel enerji kaynakları ile rekabet için çok pahalıdır. Silisyum güneş hücrelerinin maliyetini arttıran etkenlerden birisi Si alıtması, diğeri ise yüksek sıcaklık gerektiren üretim aşamalarıdır. Bu sorunlara çözüm olabilecek en yeni güneş hücre teknolojisi ise Si tabanlı hetero-eklem güneş hücreleridir. Si-HIT güneş hücreleri kristal Si (c-Si) ile üstün özellikli a-Si:H ince filminin (yüksek açık devre voltajı, Voc ; yüksek fill factor, FF) birleştirilmesi suretiyle ortaya çıkan yeni bir güneş hücresi teknolojidir. Si tabanlı güneş hücreleri arasında en umut vadeden güneş hücreteknoloji olmasına rağmen Si-HIT güneş hücre üretiminde verimlilik artışının önünde çözülmeyi bekleyen bazı sorunlar bulunmaktadır. Son yıllarda Si-HIT üzerine yapılan çalışmalar, Si-HIT güneş hücrelerinde verim artışının temelinde iyi pasive edilmiş yüksek kalitede a-Si:H katmanının olduğu göstermiştir. Bu tez çalışmasının temel amacı katkılanmış a-Si:H katmanlarının yüzey pasivasyonunu iyileştirerek daha yüksek fotovoltajik parametrelere sahip endüstriyel boyutta c-Si HIT güneş hücresi üretmektir.

a-Si:H doğal yapısı, yüzeydeki boş bağların mükemmel bir şekilde pasive edilmesine izin vermektedir. Böylece güneş hücrelerinde yüksek Voc değerlerine ulaşmak mümkündür. Bu motivasyonla Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılan bu tez kapsamında katkılanmış a-Si:H katmanları kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile üretilmiş ve optimum hidrojen miktarı katkılanmış

a-Si:H incefilmler için belirlenmiştir. Hidrojen miktarının a-Si:H ince filmler üzerine etkisi ince film kalınlığı, incefilm geçirgenliği, yasak bant aralığı gibi optik özellikler elipsometre ile yapılmıştır. Elipsometre kalınlık analizi sonuçları göstermiştir ki hidrojen miktarındaki artış a-Si:H ince filmlerin kalınlığını düşürmektedir. Daha düşük kalınlık hücrenin çıkış geriliminde artışa neden olsa da bunun yanında bulk direnci de artırmış ve I_{sc} 'de bir düşüşe yol açmıştır. Ayrıca hidrojen miktarındaki bu artış, a-Si:H ince filmlerin bant aralığında beklendiği gibi bir artışa neden olmuştur. Bant aralığının açılması yapı içerisinde daha çok hidrojenin varlığının kanıtıdır. a-Si:H'un hidrojenle indüklenmiş band aralığı genişlemesi a-Si:H/c-Si arayüzünde valens bant ofsetinde artışa neden olmasından kaynaklanmaktadır (Schulze vd., 2011).

a-Si:H katmanlarında H'nin hangi konfigürasyonlarda bağ yaptığı Bruker Vertex 70 FT-IR spektroskopisi kullanılarak analiz edilmiştir. FTIR ölçümlerinde nominal hassasiyeti $12500-350\text{ cm}^{-1}$ olan ve azotla soğutulan civa kadmiyum tellürit MCT detektörle birlikte spektral aralığı $7500-370\text{ cm}^{-1}$ olan potasyum bromür (KBR) ışın ayırıcı (beam splitter) kullanılmıştır. FTIR analizlerinin sonuçları incelendiğinde 2000 cm^{-1} 'deki dalga sayısının Si-H bağının gerilme moduna bağlı olduğu ve 2090 cm^{-1} tepe noktasındaki dalga boyunun Si-H₂ bağının gerdirme kuvveti olduğu bilinmektedir. Si-H₂ gerdirme modu, filmdeki kusurların göstergesidir ve filmin kristalizasyonuna bağlı olarak filmdeki boş bağların sayısını artırabilir. Diğer yandan Si-H gerdirme modunun yoğunluğu, daha iyi kalitede a-Si:H ince filmlere işaret etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında üretilen a-Si:H ince filmlerinin FT-IR grafikleri de incelendiğinde kusura neden olacak Si-H₂ pikinin görülmemesi, üretilen a-Si:H ince filmlerinin kalitesini işaret etmektedir.

Akım taşıyıcıların yaşam süresi analizi incelendiğinde hidrojen konsantrasyonundaki artışın taşıyıcı yaşam süresini artırdığı gözlemlenmiş ve diğer analizler de göz önüne alınarak optimum hidrojen konsantrasyonu n tipi a-Si:H için 800 sccm, p tipi a-Si:H için 700 sccm olarak belirlenmiştir.

Belirlenen bu hidrojen konsantrasyonuna göre 180 mikron kalınlığında ve 156x156 mm'lik endüstriyel boyutlu, 1536.45 μs taşıyıcı yaşam süresine ve %76.01'lik doldurma faktörüne sahip, 4.7 W gücünde ve %19.78 verimli bir c-Si:HIT güneş hücresi üretilmiştir.

N ve p tipi a-Si:H üretiminde 500 sccm hidrojen kullanılarak üretilen güneş hücresi ile (n) a-Si:H için 800 sccm, (p) a-Si:H için 700 sccm hidrojen kullanılarak üretilen güneş hücresi karşılaştırıldığında doldurma faktöründe %2, verimlilikte %2.5'ten fazla bir gelişme olduğu gözlenmiştir. H₂ miktarındaki artışın a-Si:H ince film yüzeyini daha iyi pasive edip, ara yüzey kusurlarını azaltması bu performans artışının sebeplerinden biri olarak söylenebilir. Ayrıca bunların yanında H₂ miktarındaki artış optik özellikleri geliştirmiş ve artan optik bant aralığı ile daha fazla güneş spektrumunun hücre içerisinde kullanılabilmesiyle hücre performansı artırılmıştır.

Yapılan bu çalışmalar hidrojen konsantrasyonunun a-Si:H ince filmlerindeki önemine vurgu yapmış ve bu konudaki gelecek çalışmalara ışık tutmuş durumdadır.



KAYNAKLAR

Abelson, J. R., "Plasma deposition of hydrogenated amorphous silicon: Studies of the growth surface", *Applied Physics A* 56(6): 493-512, 1993.

Agarwal, P., Povolny, H., Han, S. and Deng, X., "Study of a-SiGe:H films and n-i-p devices used in high efficiency triple junction solar cells", *Journal of Non-Crystalline Solids* 299-302: 1213-1218, 2002.

Angermann, H., Korte, L., Rappich, J., Conrad, E., Sieber, I., Schmidt, M., Hübener, K. and Hauschild, J., "Optimisation of electronic interface properties of a-Si:H/c-Si hetero-junction solar cells by wet-chemical surface pre-treatment", *Thin Solid Films* 516(20): 6775-6781, 2008.

Asim, N., Sopian, K., Ahmadi, S., Saeedfar, K., Alghoul, M. A., Saadatian, O. and Zaidi, S. H., "A review on the role of materials science in solar cells", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8): 5834-5847, 2012.

Bartlome, R., Feltrin, A. and Ballif, C., "Infrared laser-based monitoring of the silane dissociation during deposition of silicon thin films", *Applied Physics Letters* 94(20): 201501, 2009.

Bohm, C. and Perrin, J., "Spatially resolved optical emission and electrical properties of SiH₄ RF discharges at 13.56 MHz in a symmetric parallel-plate configuration", *Journal of Physics D: Applied Physics* 24(6): 865, 1991.

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

Chittick, R., Alexander, J. and Sterling, H., "The preparation and properties of amorphous silicon", *Journal of the Electrochemical Society* 116(1): 77-81, 1969.

Collins, R., Ferlauto, A., Ferreira, G., Chen, C., Koh, J., Koval, R., Lee, Y., Pearce, J. and Wronski, C., "Evolution of microstructure and phase in amorphous, protocrystalline, and microcrystalline silicon studied by real time spectroscopic ellipsometry", *Solar energy materials and solar cells* 78(1-4): 143-180, 2003.

Custer, J., Thompson, M. O., Jacobson, D., Poate, J., Roorda, S., Sinke, W. and Spaepen, F., "Density of amorphous Si", *Applied Physics Letters* 64(4): 437-439, 1994.

Das, U., Burrows, M., Lu, M., Bowden, S. and Birkmire, R., "Surface passivation and heterojunction cells on Si (100) and (111) wafers using dc and rf plasma deposited Si: H thin films", *Applied Physics Letters* 92(6): 063504, 2008.

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

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

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

Descoedres, A., Barraud, L., 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.

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

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

Ellmer, K. and Mientus, R., "Carrier transport in polycrystalline transparent conductive oxides: A comparative study of zinc oxide and indium oxide", *Thin Solid Films* 516(14): 4620-4627, 2008.

Estrada, M., Cerdeira, A., Soto, S. and Pereyra, I., "High deposition rate a-Si: H layers from pure SiH₄ and from a 10% dilution of SiH₄ in H₂", *Superficies y vacío*(9)1999.

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

Ferlauto, A. S., Koval, R. J., Wronski, C. R. and Collins, R. W., "Phase diagrams for the optimization of rf plasma enhanced chemical vapor deposition of a-Si: H: variations in plasma power and substrate temperature", *MRS Online Proceedings Library Archive* 6642001.

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

Fujiwara, H. and Kondo, M., "Real-time monitoring and process control in amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells by spectroscopic ellipsometry and infrared spectroscopy", *Applied Physics Letters* 86(3): 032112, 2005.

Fujiwara, H. and Kondo, M., "Effects of a-Si: H layer thicknesses on the performance of a-Si: H/ c-Si heterojunction solar cells", *Journal of Applied Physics* 101(5): 054516, 2007.

Ge, J., Ling, Z., Wong, J., Mueller, T. and Aberle, A., "Optimisation of intrinsic a-Si: H passivation layers in crystalline-amorphous silicon heterojunction solar cells", *Energy Procedia* 15: 107-117, 2012.

Geissbühler, J., De Wolf, S., Faes, A., Badel, N., Jeangros, Q., Tomasi, A., Barraud, L., Descoeurdes, 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.

Gielis, J., Van Den Oever, P., Hoex, B., Van De Sanden, M. and Kessels, W., "Real-time study of a-Si:H/c-Si heterointerface formation and epitaxial Si growth by spectroscopic ellipsometry, infrared spectroscopy, and second-harmonic generation", *Physical Review B* 77(20): 205329, 2008.

Gohary, E., Development of low-temperature epitaxial silicon films and application to solar cells, Doktora Tezi, *Waterloo Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği*, Ontario, Kanada, 2010

GreatEyes, <http://www.greateyes.de/en/PhotoluminescenceApplications.html>, 2017.

Guha, S., Multijunction Solar Cells and Modules, R. A. Street, **Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg**, 2000.

Halindintwali, S., A study of Hydrogenated nanocrystalline silicon thin films Deposited by hot-wire chemical vapour deposition (HWCVD), Doktora Tezi, *Western Cape Üniversitesi Fizik Bölümü*, Cape Town, Güney Afrika, 2005

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.

Holman, Z. C., Descoeurdes, A., Barraud, L., Fernandez, F. Z., Seif, J. P., De Wolf, S. and Ballif, C., "Current losses at the front of silicon heterojunction solar cells", *IEEE Journal of Photovoltaics* 2(1): 7-15, 2012.

Honsberg, C. and Bowden, S., <http://pveducation.org/pvcdrom/semiconductor-structure>, 2018.

Illiberi, A., Sharma, K., Creatore, M. and Van De Sanden, M., "Role of a-Si: H bulk in surface passivation of c-Si wafers", *physica status solidi (RRL)-Rapid Research Letters* 4(7): 172-174, 2010.

J.A.Woollam, <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/what-is-ellipsometry>, 2017.

Jay, F., Muñoz, D., Desrues, T., Pihan, E., Amaral de Oliveira, V., Enjalbert, N. and Jouini, A., "Advanced process for n-type mono-like silicon a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with 21.5% efficiency", *Solar energy materials and solar cells* 130: 690-695, 2014.

José Luis, H., Kunta, Y., Andrea, F., Nicolas, M., Nick, V., Elisabeth Van, A., Dries, S., Kevin, V., Harold, P., Jef, P., Daisuke, A., Masashi, Y., Toshihiko, U., Hisashi, U., Takashi, K., Christophe, A., Naoaki, N., Toru, T., Takahisa, F., Gensuke, K. and Kenji, Y., "High Efficiency Silver-Free Heterojunction Silicon Solar Cell", *Japanese Journal of Applied Physics* 51(10S): 10NA04, 2012.

Kasap, S., Springer handbook of electronic and photonic materials, **Springer Science & Business Media, Stürtz GmbH, Würzburg**, 2006.

Korte, L. and Schmidt, M., "Investigation of gap states in phosphorous-doped ultra-thin a-Si: H by near-UV photoelectron spectroscopy", *Journal of Non-Crystalline Solids* 354(19-25): 2138-2143, 2008.

Lachenal, D., Andrault, Y., Bätzner, D., Guerin, C., Kobas, M., Mendes, B., Strahm, B., Tesfai, M., Wahli, G. and Buechel, A., "High efficiency silicon heterojunction solar cell activities in Neuchatel, Switzerland", *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain*, 2010.

Leu, G., Grünenfelder, P. and Modrzynski, P., "Dissociation efficiency of NF₃ in a capacitively coupled plasma: a phenomenological parameterization", *International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG)*, Belfast, Kuzey İrlanda, 2011.

Levi, D. H., Teplin, C. W., Iwaniczko, E., Yan, Y., Wang, T. H. and Branz, H. M., "Real-time spectroscopic ellipsometry studies of the growth of amorphous and epitaxial silicon for photovoltaic applications", *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 24(4): 1676-1683, 2006.

Liu, Y., Sun, Y., Liu, W. and Yao, J., "Novel high-efficiency crystalline-silicon-based compound heterojunction solar cells: HCT (heterojunction with compound thin-layer)", *Physical Chemistry Chemical Physics* 16(29): 15400-15410, 2014.

Matsuda, A., "Microcrystalline silicon.: Growth and device application", *Journal of Non-Crystalline Solids* 338: 1-12, 2004.

Matsuura, H., Matsuda, A., Okushi, H., Okuno, T. and Tanaka, K., "Metal-semiconductor junctions and amorphous-crystalline heterojunctions using B-doped hydrogenated amorphous silicon", *Applied Physics Letters* 45(4): 433-435, 1984a.

Matsuura, H., Okuno, T., Okushi, H. and Tanaka, K., "Electrical properties of n-amorphous/p-crystalline silicon heterojunctions", *Journal of Applied Physics* 55(4): 1012-1019, 1984b.

Maydell, K. v., Conrad, E. and Schmidt, M., "Efficient silicon heterojunction solar cells based on p-and n-type substrates processed at temperatures < 220° C", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 14(4): 289-295, 2006.

Muñoz Cervantes, D., Silicon heterojunction solar cells obtained by Hot-Wire CVD, Doktora Tezi, *Universitat Politècnica de Catalunya*, Barselona, İspanya, 2008

Myong, S. Y., Kwon, S. W., Kwak, J. H., Lim, K. S., Pearce, J. M. and Konagai, M., "Good stability of protocrystalline silicon multilayer solar cells against light irradiation originating from vertically regular distribution of isolated nano-sized silicon grains", *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, 2006.

Neitzert, H., Hirsch, W. and Kunst, M., "Structural changes of a-Si: H films on crystalline silicon substrates during deposition", *Physical Review B* 47(7): 4080, 1993.

Oever, P. J. v. d., Sanden, M. C. M. v. d. and Kessels, W. M. M., "Real time spectroscopic ellipsometry on ultrathin (<50Å) hydrogenated amorphous silicon films on Si(100) and GaAs(100)", *Journal of Applied Physics* 101(12): 123529, 2007.

Olibet, S., Vallat-Sauvain, E., Fesquet, L., Monachon, C., Hessler-Wyser, A., Damon-Lacoste, J., De Wolf, S. and Ballif, C., "Properties of interfaces in amorphous/crystalline silicon heterojunctions", *physica status solidi (a)* 207(3): 651-656, 2010.

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

Patel, K. and Tyagi, P. K., "Technological advances in a-Si: H/c-Si Heterojunction solar cells", *International Journal Of Renewable Energy Research* 4(2): 528-538, 2014.

Pearton, S., "Hydrogenated Amorphous Silicon, by RA Street, Cambridge University Press, Cambridge 1991, XIV, 417 pp., hardcover, £ 65.00; ISBN 0-521-37156-2", *Advanced Materials* 4(4): 306-306, 1992.

Peng, W., Zeng, X., Liu, S., Xiao, H., Kong, G., Yu, Y. and Liao, X., "Study of microstructure and defects in hydrogenated microcrystalline silicon films", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE*, 2009.

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

Rahman, K. M. A., Nanocrystalline Silicon Solar Cells Deposited via Pulsed PECVD at 150 C Substrate Temperature, Yüksek Lisans Tezi, *Waterloo Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği*, Ontario, Kanada, 2010

Schmidt, M., Schoepke, A., Korte, L., Milch, O. and Fuhs, W., "Density distribution of gap states in extremely thin a-Si: H layers on crystalline silicon wafers", *Journal of Non-Crystalline Solids* 338: 211-214, 2004.

Schulze, T. F., Korte, L., Ruske, F. and Rech, B., "Band lineup in amorphous/crystalline silicon heterojunctions and the impact of hydrogen microstructure and topological disorder", *Physical Review B* 83(16): 165314, 2011.

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

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.

Smets, A. H. M., Growth related material properties of hydrogenated amorphous silicon, **Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Hollanda**, 2002.

Steckelmacher, W., Plasma deposition of amorphous silicon-based materials, **Academic Press Inc., Kaliforniya, ABD**, 1996.

Strahm, B., Andraut, Y., Bätzner, D. L., Guerin, C., Holmes, N., Kobas, M., Lachenal, D., Mendes, B., Tesfai, M., Wahli, G., Wuensch, F., Buechel, A., Mai, J., Schulze, T. and Vogt, M., "Progress in Silicon Hetero-Junction Solar Cell Development and Scaling for Large Scale Mass Production Use", *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, 2010.

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 µm) silicon wafer", *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 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.

Takai, M., Nishimoto, T., Takagi, T., Kondo, M. and Matsuda, A., "Guiding principles for obtaining stabilized amorphous silicon at larger growth rates", *Journal of Non-Crystalline Solids* 266: 90-94, 2000.

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.

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.

ur Rehman, A. and Lee, S. H., "Advancements in n-Type Base Crystalline Silicon Solar Cells and Their Emergence in the Photovoltaic Industry", *The Scientific World Journal* 2013: 13, 2013.

Van den Donker, M., Rech, B., Schmitz, R., Klomfass, J., Dingemans, G., Finger, F., Houben, L., Kessels, W. and van de Sanden, M., "Hidden parameters in the plasma deposition of microcrystalline silicon solar cells", *Journal of materials research* 22(7): 1767-1774, 2007.

van den Oever, P. J., In situ studies of silicon-based thin film growth for crystalline silicon solar cells, 68, **Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven**, 2007.

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

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

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

Wolf, S. D. and Kondo, M., "Nature of doped a-Si:H/c-Si interface recombination", *Journal of Applied Physics* 105(10): 103707, 2009.

Yamamoto, K., Adachi, D., Uzu, H., Ichikawa, M., Terashita, T., Meguro, T., Nakanishi, N., Yoshimi, M. and Hernández, J. L., "High-efficiency heterojunction crystalline Si solar cell and optical splitting structure fabricated by applying thin-film Si technology", *Japanese Journal of Applied Physics* 54(8S1): 08KD15, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Ömer Can ECER 23.09.1992 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini İstanbul’da tamamladı. 2010 yılında başladığı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fizik Bölümünden Haziran 2014’de mezun oldu. 2014 Eylül, 2015 Haziran tarihleri arasında Bor Fen Lisesi ve Bor Atatürk Anadolu Lisesinde ücretli fizik öğretmeni olarak çalıştı.

2015 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fizik Bölümü tezli yüksek lisans programına başladı. Yüksek lisans eğitimi sürerken 2017 Temmuz - 2017 Ekim tarihleri arasında Krakow, Polonya’daki Academic Centre for Materials and Nanotechnology AGH’de stajını tamamladı. Yüksek lisans eğitiminde Manchester, İngiltere’de düzenlenen Microscience Microscopy Congress 2017’de sunulan sözlü sunum çalışmasında yer aldı ve çalışma çıktısı olarak A. Seyhan, T. Altan, O. C. Ecer, R. Zan ile birlikte “A Hydrogenated Amorphous Silicon (a-Si:H) Thin Films for Heterojunction Solar Cells: Structural and Optical Properties” isimli bir yayında yer aldı.

Laboratuvar bilgisi olarak PVD, PECVD ile malzeme üretimi yapabilmekte ve İpek Baskı, Elipsometre, Güneş Simülatörü, Raman, Elektrolüminesans, Fotolüminesans, Yaşam Süresi Ölçümü, Dört Nokta Direnç Ölçümü, Keithley ve Profilometre gibi temel karakterizasyon cihazlarını kullanabilmektedir.

Bilim dalındaki ilgi alanı güneş enerjisi, incefilm, nanoyapılar vemalezme karakterizasyonudur.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası makale makale üretilmiştir. Bu üretilen çalışma aşağıda sunulmuştur.

Seyhan, A., Altan, T., Ecer, Ö. C. ve 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.



