

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**a-SiO_x:H VE KRİSTAL SİLİSYUMDAN (c-Si) OLUŞAN a-SiO_x:H/c-Si
HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİNİN FABRİKASYONU VE
KARAKTERİZASYONU**

OKAN YILMAZ

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
DOKTORA PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ORHAN ÖZDEMİR**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

a-SiO_x:H VE KRİSTAL SİLİSYUMDAN (c-Si) OLUŞAN a-SiO_x:H/c-Si
HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİNİN FABRİKASYONU VE
KARAKTERİZASYONU

Okan YILMAZ tarafından hazırlanan tez çalışması 21.01.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Fizik Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Orhan ÖZDEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

İkinci Tez Danışmanı

Doç. Dr. Alp Osman KODOLBAŞ
TÜBİTAK

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Orhan ÖZDEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kubilay KUTLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yani SKARLATOS
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Deniz Değer ULUTAŞ
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Rıza DEMİRBİLEK
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamın her aşamasında her zaman yanımda olan ve beni destekleyen ve sadece bilimsel değil her türlü konuda da bana örnek olan danışmanım Doç. Dr. Orhan ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması Fotonik ve Elektronik Sensörler Laboratuvarından sayın Doç. Dr. Alp Osman KODOLBAŞ'ın anlayışı, desteği ve yol göstericiliği sayesinde gerçekleşebilmiştir. Her şey için teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmasının en başından sonuna kadar verdiği eşsiz katkı ve desteklerinden dolayı sayın Dr. Rifat KANGI'ya sonsuz teşekkür ederim.

Diğer tüm konularda danışmanım kadar bana destek olan mesai arkadaşlarım ve dostlarım, Özlem PEHLİVAN, Nilüfer DUYGULU, Deneb MENDA, Seda Oğuz ALPTEKİN'e çok teşekkür ederim.

Bana bu çalışma sırasında öncelikle ailem olmak üzere sonsuz anlayış gösteren eşim Funda GÜÇLÜER'e, Emre ÖZER'e ve ablam Leman Figen YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

Aralık, 2013

Okan YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	5
a-Si:H/c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİ.....	5
2.1 Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum	5
2.2 Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum Oksit (a-SiO _x :H) Alaşımı.....	11
2.3 PECVD ile a-Si:H Biriktirme	12
2.3.1 Plazma parametrelerinin Malzeme özelliklerine etkisi	15
2.3.2 Katkılama	18
2.4 Güneş pilleri	18
2.4.1 Kristal Silisyum Güneş Pilleri.....	18
2.4.2 İnce Silisyum Güneş Pilleri	19
2.5 PV Performans Ölçümleri.....	20
2.5.1 Hata kaynakları	22
2.5.2 Diyagnostik Ölçümler.....	22
2.5.3 Yeterlilik Testleri	22
2.6 Silisyum Heteroeklem Güneş Pilleri.....	23
2.7 (n)a-Si:H/ (p)c-Si Heteroeklem arayüzey	24
BÖLÜM 3.....	30
DENEYSEL YÖNTEMLER.....	30

3.1	Örneklerin hazırlanması	31
3.1.1	PECVD Sistemi.....	31
3.1.2	Biriktirme Odası Temizliği	33
3.1.3	c-Si Alttaban Temizliği	33
3.1.3.2	Kuru Temizlik Yöntemleri	37
3.1.4	Filmlerin Büyütülmesi.....	39
3.2	Film ve güneş pillerinin karakterizasyonu.....	42
3.2.1	Film Karakterizasyonu	42
3.2.1.1	Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM).....	42
3.2.1.2	Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskopisi (HR-TEM)	44
3.2.1.3	Tayfsal Elipsometri	46
3.2.2	Güneş Pili Karakterizasyonu	51
3.2.2.1	I-V ölçümleri	51
3.2.3	Elektrolüminesans Ölçümleri.....	53
3.2.4	Kuantum Verimliliği Ölçümleri	56
BÖLÜM 4	61
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	61
4.1	Katkısız a-Si:H kullanılarak SHE güneş pillerinin optimizasyonu.....	62
4.1.1	Aygıt Yapımına Uygun Katkısız a-Si:H filmler için PECVD parametrelerinin belirlenmesi	62
4.1.1.1	Tayfsal Elipsometre Ölçümleri	65
4.1.1.2	SEM ve AFM Ölçümleri.....	67
4.1.2	a-Si:H/c-Si heteroekmlerinde katkıamanın etkisinin incelenmesi.	69
4.1.3	Kristal silisyum alttabanların temizliğinde kimyasal ve plazma yöntemleri arasındaki farkların incelenmesi	71
4.1.4	a-Si:H filmlerin c-Si üzerinde büyümesi ve TEM ile incelenmesi.....	72
4.1.5	Silisyum Heteroeklem güneş pillerinin EL ile incelenmesi	74
4.1.6	n-tipi katkılı ve katkısız filmlerin 225 °C'den düşük sıcaklıklarda ve hidrojen seyreltmesi ile katkılı filmlerin hazırlanması	77
4.2	Silisyum altoksitlerin tampon ve yaygıç olarak hazırlanması ile elde edilen sonuçlar.....	81
4.2.1	Silisyum altoksitlerde optik bant aralığının kontrolü	81
4.2.2	Tampon tabakası olarak a-SiO _x :H (i) için H ₂ seyreltmesinin incelenmesi	85
4.2.3	Tampon tabakası olarak a-SiO _x :H (i) için [SiH ₄]/[CO ₂] oranının belirlenmesi	87
4.2.4	Tampon tabakası olarak a-SiO _x :H (i) için tabaka kalınlığının belirlenmesi	101
4.2.5	a-SiO _x :H (n) pencere tabakası için [SiH ₄]/[CO ₂] oranının belirlenmesi	110
4.2.6	Pencere tabakası için n-tipi katkılama oranının belirlenmesi	112
4.2.7	Pencere tabakası için n-tipi a-SiO:H tabaka kalınlığının belirlenmesi	115
BÖLÜM 5	119

SONUÇ VE ÖNERİLER	119
KAYNAKLAR.....	123
ÖZGEÇMİŞ.....	131

SİMGE LİSTESİ

V_{oc}	Açık devre gerilimi (V)
I_{sc}	Kısa devre akımı (A)
FF	Doluluk oranı (%)
η	Verim (%)
V	Gerilim (V)
I	Akım (A)
E_g	Cody Gap (eV)
ϵ	Dielektrik sabiti
T	Sıcaklık

KISALTMA LİSTESİ

c-Si	Kristal Silisyum
a-Si:H	Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum
BSF	Back Surface Field (arka yüzey alanı)
IQE	Internal Quantum Efficiency (İç Kuantum Verimi)
EQE	External Quantum Efficiency (Dış Kuantum Verimi)
CCD	Charge-Coupled Device (Şarj Eşleştirmeli Cihaz)
SE	Spectroscopic Ellipsometer (Tayfsal Elipsometre)
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme)
HR-TEM	High-Resolution Transmitting Electron Microscope (Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskop)
RCA	Radio Company of America
EL	Elektrolüminesans
AFM	Atomic Force Microscope (Atomsal Kuvvet Mikroskopisi)
SEM	Scannig Electron Microcope (Taramalı Elektron Mikroskop)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	c-Si ve a-Si:H örgüsü.....6
Şekil 2.2	Farklı basit kusurlar (a) kristal (b) amorf örüt..... 7
Şekil 2.3	a-Si:H Kopuk ve gezici bağ kusurları..... 8
Şekil 2.4	a-Si:H daki durum yoğunlukları için standart model..... 9
Şekil 2.5	70 eV enerjili elektron çarpışması sonucu SiH ₄ ayrışması kanalları için olasılık şeması..... 13
Şekil 2.6	Temel SiH ₃ reaksiyonları..... 15
Şekil 2.7	Malzeme özelliklerinin RF gücüne bağımlılığı 17
Şekil 2.8	Malzeme özelliklerinin alttaban sıcaklığına bağımlılığı 18
Şekil 2.9	Heteroeklem güneş pillerinin verimliliklerinin gelişimi 25
Şekil 2.10	(n) a-Si:H/(p) c-Si heteroeklem arayüzeyin bant şeması 26
Şekil 2.11	(p) a-Si:H/(n) c-Si heteroeklem arayüzeyin bant şeması 27
Şekil 2.12	Yarı-geçirgen membranlara sahip, aydınlatılmış ideal güneş piline ait bant yapısı 28
Şekil 2.13	Silisyum alttabanın her iki tarafına katkısız a-Si:H büyütülerek oluşturulan çift taraflı, a-Si:H/c-Si heteroeklem n-tipi güneş pilinin enerji bant yapısı... 29
Şekil 2.14	Silisyum alttabanın her iki tarafına katkısız a-Si:H büyütülerek oluşturulan çift taraflı, a-Si:H/c-Si heteroeklem p-tipi güneş pilinin enerji bant yapısı.. 30
Şekil 3.1	PECVD sistemi 32
Şekil 3.2	PECVD reaktörü 33
Şekil 3.3	p-türü Si(111) yönelimli yüzey için Yüzey Foto Gerilim eğrileri: RCA I ve II işlemi (1), takiben HF-içeren çözeltilerle aşındırma (2), ve standart H-sonlandırması laboratuvar şartlarında (3) ve temiz oda şartlarında (4) 38
Şekil 3.4	Corning 1737F cam üzerine 225 °C'de büyütülen filmin NF ₃ aşındırma hızının vakum odası basıncı ile değişimi 38
Şekil 3.5	Corning 1737F cam üzerine 225 °C'de büyütülen filmin NF ₃ aşındırma hızının NF ₃ akışı ile değişimi 39
Şekil 3.6	NF ₃ aşındırma etkisinin zamanla değişimi 39
Şekil 3.7	Heteroeklem güneş pili yapısı 40
Şekil 3.8	UME'de temizodasında bir görünüm. Sol tarafta PECVD, sağ ileride TCO ve metalizasyon kaplama sistemleri görülmektedir 41
Şekil 3.9	Bir elektron demeti ile ışınlanan bir yarıiletken numunedeki çeşitli elektron ve foton salımları 43

Şekil 3.10	(a) Saçılmış Ses ve BSEs'lerin enerji dağılımı (b) Tipik bir taramalı elektron mikroskopunda elektron yörüngeleri	44
Şekil 3.11	(a) CTEM (b) STEM	45
Şekil 3.12	TEM Kırınım örütü	46
Şekil 3.13	Gelen ve yansıyan ışılar için elektrik alan bileşenleri	47
Şekil 3.14	TÜBİTAK UME Jovin Yvon UVISEL Tayfsal Elipsometre Ölçüm Sistemi.....	50
Şekil 3.15	TÜBİTAK UME Jovin Yvon UVISEL Tayfsal Elipsometre Ölçüm Sistemi.....	50
Şekil 3.16	İdeal I-V Eğrisi.....	51
Şekil 3.17	I-V Karakteristik ölçüm düzeneği şematik gösterimi.....	52
Şekil 3.18	I-V Karakteristik ölçüm düzeneği.....	53
Şekil 3.19	Güneş pilinde EL.....	53
Şekil 3.20	Si CCD kameranın tipik emisyon tayfı ve duyarlılığı	55
Şekil 3.21	a-Si:H/c-Si heteroeklemlerinin Elektrolüminesans ile incelenebilmesi için UME'de kurulan deney düzeneğinin şematik gösterimi	56
Şekil 3.22	Dış Kuantum verimliliği	58
Şekil 3.23	Heteroeklem güneş pilinin tipik Dış kuantum verimliliği	59
Şekil 3.24	Tayfsal Cevap Ölçüm sistemi	60
Şekil 4.1	AM1.5G aydınlatma altında ölçülen fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe oranının alttaban sıcaklığına bağımlılığı	63
Şekil 4.2	AM1.5G aydınlatma altında ölçülen fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe oranının işlem odası basıncına bağımlılığı	64
Şekil 4.3	AM1.5G aydınlatma altında ölçülen fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe oranının, RF gücüne ve gaz akış hızına bağımlılığı	64
Şekil 4.4	AM1.5G aydınlatma altında ölçülen fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe oranının, RF gücüne ve gaz akış hızına bağımlılığı	65
Şekil 4.5	Farklı sıcaklıklarda büyütülen katkısız a-Si:H filmlerin SE ölçümlerinden elde edilen dielektrik sabitinin sanal bileşeni	66
Şekil 4.6	Sıcaklık ile optik bant aralığı (Cody gap) değişimi	67
Şekil 4.7	Corning 1737F cam üzerine 225 °C'de büyütülen filmin yüzey ve kesit SEM görüntüleri	68
Şekil 4.8	Corning 1737F cam üzerine 225 °C'de büyütülen filmin AFM görüntüsü. Pürüzlülük 4 nm dir	68
Şekil 4.9	Farklı katkılama oranları için büyütülen a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) yapısındaki güneş pillerinin AM1.5G aydınlatma altında ölçülen açık devre gerilimleri	69
Şekil 4.10	5000ppm'de büyütülen güneş pilinin AM1.5G aydınlatma altında I/V eğrisi. Aktif alan 72 cm ² ve güneş pilinin verimliliği %4.6'dır	71
Şekil 4.11	K1, K2 ve P1 temizleme yöntemleri ile 100 mm çapında silisyum alttabanlar temizlendiğinde elde edilen güneş pillerinin I/V değişimi	72
Şekil 4.12	c-Si(p)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n)/AZO yapısındaki güneş pilinin TEM görüntüsü, a-Si:H filmler 5dk. ve AZO 30 dk. büyütülmüştür. n-katkılı a-Si:H film a-Si olarak işaretlenmiştir	72
Şekil 4.13	AZO/ a-Si:H(n)/ a-Si:H(i)/ c-Si(p) yapısındaki güneş pilinde (i) ve (n) filmler arasındaki arayüzey (sol), c-Si üzerinde epitaksiyel olarak büyüyen katkısız filmin TEM kırınım görüntüsü (sağ).....	72

Şekil 4.14	5000 ppm [PH ₃]/[SiH ₄] katkılama oranında 225°C alttaban sıcaklığında 0.6 Torr basınçta ve 12 mW/cm ² RF güç yoğunluğunda büyütülen güneş pilinin karanlıkta açık devre gerilimi uygulandığında elde edilen elektrolüminesans görüntüsü (sol) ve fotoğrafı (sağ).....	75
Şekil 4.15	Optimizasyon öncesi ve sonrası elde edilen güneş pilinin AM1.5G aydınlatma altında I/V eğrisi	76
Şekil 4.16	Optimizasyon sürecinden sonra elde edilen güneş pilinin karanlıkta açık devre gerilimi uygulandığında elde edilen EL görüntüsü	77
Şekil 4.17	(i) ve (n) alttaban sıcaklıkları ile V _{OC} değişimi	78
Şekil 4.18	Katkısız tabaka sıcaklığına göre Verim, FF, V _{OC} ve I _{SC} değişimi	79
Şekil 4.19	Katkısız tabaka sıcaklığına göre Verim, FF, V _{OC} ve I _{SC} değişimi	79
Şekil 4.20	a-Si:H tabakaları 190°C'de büyütülen güneş pilinin farklı sıcaklıklarda tavlama ile I/V eğrisinin değişimi	80
Şekil 4.21	Katkısız a-Si:H tabakası 150°C'de ve n-türü tabakası 225°C'de büyütülen güneş pilinin 150°C'de farklı süreler tavlama ile I/V eğrisinin değişimi	81
Şekil 4.22	Katkısız a-SiO _x :H filmlerde CO ₂ oranının artışı ile ε ₂ ve foton enerjisinin değişimi	82
Şekil 4.23	a-SiO _x :H örneklerin dielektrik sabitinin a-Si:H'a göre azalması.....	83
Şekil 4.24	a-SiO _x :H örneklerin optiksel bant aralığının (ε ₂) ile değişimi	84
Şekil 4.25	a-SiO _x :H örneklerin optiksel bant aralığının CO ₂ akışı ile değişimi	84
Şekil 4.26	Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si _{0.96} O _{0.04} :H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri için Hidrojen seyreltme oranı ile güneş pili karakteristiklerinin değişimi	86
Şekil 4.27	Hidrojen seyreltme oranlarına göre 250 °C de 2 dakika tavlama ile I-V karakteristikleri değişimi	86
Şekil 4.28	Hidrojen seyreltme oranı ile seri direnç değişimi	86
Şekil 4.29	Al grid/a-Si:H (n)/a-SiO _x :H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri için ISC, VOC, FF ve η değerlerinin CO ₂ akışıyla değişimi	88
Şekil 4.30	(i) a-SiO _x :H tabakasının [SiH ₄]/[CO ₂] oranı ile IQE artışı	89
Şekil 4.31	(i) a-SiO _x :H tabakasının [SiH ₄]/[CO ₂] oranı ile mavi ışık bölgesinde IQE değişimi	90
Şekil 4.32	Standart Al/(n)a-Si:H/(i)a-Si:H/(p)c-Si/Al BSF yapısındaki güneş pili ile Al/(n)a-Si:H/(i)a-Si _{0.975} O _{0.025} :H/(p)c-Si/Al yapısındaki güneş pillerinin mavi ışık ve kırmızı ışık bölgesinde IQE değişimleri	91
Şekil 4.33	Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si _{0.975} O _{0.025} :H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pili için tavlama ile I-V karakteristiği değişimi	92
Şekil 4.34	Al grid/a-Si:H (n)/a-SiO _x :H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pillerinin seri ve şönt dirençlerinin CO ₂ akışı ile değişimi	93
Şekil 4.35	n-tipi katkılı tabaka biriktirme süresi ile I _{SC} ve V _{OC} değişimi	95
Şekil 4.36	n-tipi katkılı tabaka biriktirme süresi ile FF ve verim değişimi	96
Şekil 4.37	n-tipi 80 s a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) ve n-tipi 120 s a-Si:H (n)/a-Si:H (i) I/V karakteristikleri karşılaştırma	97
Şekil 4.38	Al/(n)a-Si:H/(i)a-SiO:H/(p)c-Si/Al yapısındaki güneş pilinin IQE'nin 400 nm dalga boyunda (n)-tipi tabaka kalınlığı ile değişimi	97
Şekil 4.39	n-tipi 80 s a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) ve n-tipi 120 s a-Si:H (n)/a-Si:H (i) IQE değişimi	98

Şekil 4.40	n-tipi 80 s a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) pillerinin CO ₂ akış oranları ile I _{SC} ve V _{OC} değişimi	99
Şekil 4.41	n-tipi 80 s a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) pillerinin CO ₂ akış oranları ile FF ve η değişimi	99
Şekil 4.42	n-tipi 80 s a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) pillerinin CO ₂ akış oranları ile 400nm de IQE değişimi.....	101
Şekil 4.43	a-Si _{0,975} O _{0,025} :H (i) tabakası kalınlık taraması.....	102
Şekil 4.44	a-Si _{0,975} O _{0,025} :H (i) tabakası kalınlığı ile UV bölgede IQE değişimi.....	103
Şekil 4.45	a-Si _{0,975} O _{0,025} :H (i) tabakası kalınlığı ile 400 nm 'de IQE değişimi.....	104
Şekil 4.46	a-Si _{0,975} O _{0,025} :H (i) tabakası kalınlığı ile görünür bölgede IQE değişimi.....	104
Şekil 4.47	a-Si _{0,975} O _{0,025} :H (i) tabakası kalınlığı ile IR bölgede IQE değişimi.....	104
Şekil 4.48	(n) a-Si:H/(i) a-Si:H/(p) c-Si/BSF bant şeması	107
Şekil 4.49	Al/(n) a-Si:H/(i) a-Si:H/(p) c-Si/Al BSF ve (i) a-Si _{0,975} O _{0,025} :H tampon tabakalı güneş pil I-V grafiği.....	108
Şekil 4.50	Al/(n) a-Si:H/(i) a-Si:H/(p) c-Si/Al BSF ve (i) a-Si _{0,975} O _{0,025} :H tampon tabakalı güneş pil IQE karşılaştırması.	109
Şekil 4.51	Al/(n) a-Si:H/(i) a-Si _{0,975} O _{0,025} :H/(p) c-Si/Al BSF güneş pili (i)-tabaka kalınlığı ile IQE değişimi	109
Şekil 4.52	n-tipi a-SiO _x :H tabakanın sanal dielektrik sabiti-foton enerjinin CO ₂ gaz akış oranı ile değişimi	111
Şekil 4.53	[SiH ₄]:[PH ₃]=40:20, [SiH ₄]:[CO ₂]=40:16 katkılı n-tipi a-SiO:H tabakanın sanal ve reel dielektrik sabitinin-foton enerji grafiği.	112
Şekil 4.54	Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin I _{SC} , V _{OC} , verim ve FF değerlerinin PH ₃ akışı ile değişimi.	113
Şekil 4.55	Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak ve Al ön kontak/a-Si:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin I/V karşılaştırması.	114
Şekil 4.56	Al/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al yapısında güneş pillerinin PH ₃ katkılama ile IQE değişimi.....	115
Şekil 4.57	Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin n-tipi tabaka biriktirme süresi ile I _{SC} , V _{OC} , verim ve FF değişimi.	116
Şekil 4.58	Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin n-tipi tabaka biriktirme süresi UV bölgede IQE değişimi.....	117
Şekil 4.59	Al/a-Si _{0,975} O _{0,025} :H (n)/a-Si _{0,975} O _{0,025} :H (i)/c-Si/Al yapısında ve Al/a-Si:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al güneş pillerinin I-V grafiklerinin karşılaştırılma	118

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 RCA Kimyasal temizlik.....	36
Çizelge 4.1 Düşük sıcaklıklarda büyütülen güneş pillerinin biriktirme parametrele....	78
Çizelge 4.2 Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si _{0.96} O _{0.04} :H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri için PECVD parametreleri.....	85
Çizelge 4.3 Al grid/a-Si:H (n)/a-SiO _x :H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri için PECVD parametreleri.....	87
Çizelge 4.4 Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si _{0.975} O _{0.025} :H (i)/c-Si (p)/Al ile Al grid/a-Si:H (n)/a-Si:H (i)/c-Si (p)/Al BSF karşılaştırma tablosu.....	93
Çizelge 4.5 Heteroeklem güneş pilinde farklı tabaka ve ara yüzeylerin verimi belirleyen karakteristik parametrelere olan etkisi.....	94
Çizelge 4.6 n-tipi 80 s a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) ve n-tipi 120 s a-Si:H (n)/a-Si:H (i) karakteristik parametreler karşılaştırma tablosu.....	99
Çizelge 4.7 a-Si _{0.975} O _{0.025} :H (i) tabakası kalınlık taraması için biriktirme şartları.....	102
Çizelge 4.8 n-tipi a-SiO _x :H tabakanın PECVD parametreleri.....	111
Çizelge 4.9 Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin PECVD koşulları.....	113
Çizelge 4.10 Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin n-tipi tabaka kalınlık optimizasyonu için PECVD koşulları.....	116
Çizelge 4.11 Farklı tabaka özelliklerindeki pillerin karakteristiklerindeki gelişim.....	118

**a-SiO_x:H VE KRİSTAL SİLİSYUMDAN (c-Si) OLUŞAN a-SiO_x:H/c-Si
HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİNİN FABRİKASYONU VE
KARAKTERİZASYONU**

Okan YILMAZ

Fizik Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Orhan ÖZDEMİR

Eş Danışman: Doç. Dr. Alp Osman KODOLBAŞ

Silisyum tabanlı fotovoltaiik teknolojileri arasında a-Si:H/c-Si heteroeklemler yüksek verim elde edilebilme potansiyelleri ve daha düşük üretim maliyetleri nedeniyle gittikçe önem kazanmaktadır. Heteroeklem güneş pilleri düşük üretim sıcaklıkları (200°C civarı), geniş yüzeylere ince film tabakalarının büyütülebilmesi nedeniyle uygun maliyet, daha iyi sıcaklık katsayıları ve iyi yüzey pasivasyonu için daha ince silisyum alttabanlar kullanıldığından daha düşük silisyum tüketimi nedeniyle yaygın olan homoeklem teknolojilerine göre avantajlara sahiptir. Bu tez çalışmasının devam ettiği sırada (2013), Japon firması Panasonic, endüstriyel üretim şartlarında 101.8 cm² yüzey alanlı % 24.7 verimli bir güneş pili üreterek geniş alanlı heteroeklem aygıtlarda yüksek verimler elde edilebileceğini göstermiştir. Bununla beraber bu tür yapıların tüm potansiyelleri henüz tam olarak anlaşılammış ve bir kaç grup tarafından geniş çaplı araştırmalar yürütölmektedir.

Bu tez çalışmasında, c-Si alttaban yüzeyinin farklı temizlik proseslerinin katkılı ve katkısız a-SiO_x:H alaşımlarının ara yüzey kusurlarının pasivasyonuna etkisi güneş pilinin elektriksel ve elektrooptiksel özellikleri incelenerek anlaşılmasına odaklanılmıştır.

Kristal silisyum (c-Si) alttaban yüzeyinin pasivasyonu ve ara yüzey kusurlarının azaltılması, yüksek verimli a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş pillerinin -yaygın ismi ile

silisyum heteroeklemlerin- gelişiminde temel gereksinimlerdir. Yüzey pasivasyonu, genel olarak silisyum alttaban temizlik süreçlerinin detaylı bir şekilde geliştirilmesi ve katkısız hidrojenlendirilmiş amorf silisyum tabakanın büyütülmesi için gerekli olan PECVD parametrelerinin belirlenmesi ile sağlanır.

Bununla beraber (i) tabakasının yüksek sıcaklıkta (>130°C) oluşturulması c-Si üzerinde güneş pilinin performansının ciddi olarak düşmesine neden olan bir epitaksiyel tabaka oluşmasına neden olur. Bu epitaksiyel büyüme (i) a-Si:H tabakası büyümesi porosisini kısıtlar ve güneş pili optimizasyonunu daha zor kılar. Katkılı ve katkısız a-SiOx:H tabakalarının en büyük avantajı c-Si alttabanlar üzerindeki epi-Si büyümesinin a-SiOx:H (i) tabakası ile bastırılmasıdır. Özellikle a-SiOx:H i tabakası epi-Si tabakaları oluşturmadan PECVD koşullarını özgürce değiştirmemize imkân verir. a-SiOx:H i tabakasının uygulanması, a-Si:H (i) tabakalarının optimum biriktirme şartlarının a-Si:H/epi-Si faz sınırlarında bulunması nedeniyle güneş pili üretiminin tekrarlanabilirliğini iyileştirir. Maksimum fotovoltajik aygıt performansı için geçmişte daha geniş bant aralıklı yaygıç özelliğine sahip yapılar önerilmiştir. a-Si:H/c-Si güneş pillerinde Jsc kısa devre akımını geliştirmek için a-Si:H'den daha geniş bir bant aralığına sahip a-Si:H tabanlı bir alaşım kullanmak tercih edilir.

Tez çalışması, metal /(n) (p) a-Si:H/(i) a-Si:H/(p) (n) c-Si/(i) a-Si:H/n+ a-Si:H HIT türü güneş pili yapısında n() (p) a-SiOx:H/(i) a-SiOx:H/(p) c-Si tabakalarında güneş pili üretimini hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda, ilk önce farklı film büyütme koşulları denenmiş, güneş pil parametreleri ile en uygun büyütme koşullarının parametreleri belirlenmiş ve bu koşullar kullanılarak güneş pilleri üretilmiştir. Bu açıdan irdelendiğinde a-Si:H filmleri tampon tabak olarak kullanıldığı film koşulları tespit edilmiştir. Corning cam ve kuartz alttabanlar üzerine büyütülen filmler spektroskopik Elipsometre (SE), FTIR gibi yapısal özellikleri incelendikten sonra bu katkısız (özden) a-Si:H filmler p-türü katkılı c-Si alttabanlar üzerinde büyütülmüştür. Ayrıca c-Si alttaban temizliği için plazma ve kimyasal temizlik yöntemleri de bu çalışmada karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Daha sonra aygıt yapımına uygun katkısız a-Si:H filmler için alttaban sıcaklığı, PECVD parametreleri (RF gücü, basınç, SiH4 gaz akışı) fotoiletkenlik/karanlık iletkenlik ve dielektrik sabiti takip edilerek incelenmiştir. a-Si:H filmlerin homojenliği ve yüzey pürüzlülüğü ise SEM ve AFM teknikleri ile incelenmiştir.

Daha sonra bu koşullarda filmler c-Si üzerine büyütülerek a-Si:H/c-Si heteroeklemleri elde edilmiştir. Açık devre gerilimleri takibiyle hem katkısız a-Si:H filmleri yüzey pasivasyon başarısı, hem de direnci azaltmak amacıyla büyütülen katkılı (n-tipi) a-Si:H için optimum katkılama oranı 5×10^3 ppm ve 5×10^4 ppm olarak tespit edilmiştir. [60]

5×10^3 ppm'de büyütülen Al/(n) a-Si:H/i a-Si:H/p c-Si/Al yapısındaki güneş pili üzerinden ölçülen aydınlık koşullardaki I-V karakteristiği sonucu % 4.6 verim 72 cm^2 aktif alan üzerinden belirlenmiştir.

Bu değer, ölçülen en yüksek alandaki verim değeridir. Ancak verim değeri oldukça düşüktür. Elektrolüminesans ölçümlerinde katkısız tabakanın yüzeyi etkin bir şekilde pasive edilemediği ve kısmen epitaksiyel olarak büyüdüğü ve bu nedenle c-Si yüzeyinin kötü pasive olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, daha önce 200°C civarındaki en uygun alttaban sıcaklığı yerine daha düşük sıcaklıklarda ve de hidrojen seyreltmesi yapılarak

bir seri güneş pili üretilmiştir. Birinci grup 190°C ve daha yüksek alttaban sıcaklıklarındayken bir diğer grup 190°C 'den daha düşük sıcaklıklarda hazırlanan güneş pillerinden oluşmaktadır. Katkılı tabaka ise 190°C ve 225°C de sabit sıcaklıklarda büyütülmüştür. Sonuçlara göre katkılı tabaka için 190°C seçildiğinde, katkısız tabakanın en ideal sıcaklık aralığı 190°C - 210°C aralığındayken, 225°C olduğunda 150°C olduğu tespit edilmiştir. Ne var ki, verim değerleri bir seri içinde %4,5 değerini geçememektedir. Bu pillerde tavlama suretiyle verim değerlerinde biraz iyileşme görülse de hala potansiyel değerinden oldukça uzakta olduğu anlaşılmaktadır. Bu iyileşmenin de nedeni kısa devre akımı ile açık devre gerilimindeki artıştan ötürüdür.

c-Si yüzey pasivasyonu, katkısız a-Si:H filmler kullanılarak istenilen düzeyde verimlerde güneş pillerinin üretilmeyeceği anlaşıldığından, katkısız a-Si:H film yerine silisyum alt oksit (a-SiO_x:H) filmler kullanılmak suretiyle bu hedef gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ilk önce literatür desteğiyle birlikte var olan sistem ile [SiH₄]:[CO₂]:[H₂] sccm koşullarında CO₂ miktarı 1-10 sccm aralığında değiştirilmiştir. Üretilen a-SiO_x:H filmler SE yöntemiyle dielektrik sabiti göz önüne alınarak incelenmiştir.

Ayrıca a-SiO_x:H tampon tabaka kullanılarak ve H₂ seyreltmesi de yapılarak üretilen bir dizi güneş pilinin değişimi takip edilmiştir. İlk denemelerde elde edilen performans testleri daha da kötü piller üretildiği şeklindedir. R=7 ve 10 seyreltme oranlarında büyütülmüş ve 2 dk. süreyle tavllanmış filmler için en yüksek kısa devre akımı ve açık devre gerilimi bu seride üretilen filmler için gözlenmiştir.

Ayrıca, hidrojen seyreltmesi ile seri direnç arasındaki ilişki takip edilmiş, seyreltme miktarı arttıkça, seri direncin düştüğü dolayısıyla nispeten daha iyi pasive edildiği görülmektedir. Bunlara ilaveten a-SiO_x:H kalınlığının pil parametrelerine olan etkisi hem pilin özelliklerini ortaya çıkarmak hem de kuantum verimliliği ile takip edilmiştir. Mavi ışığa en yüksek tepkinin 5-6 nm kalınlığındaki a-SiO_x:H filmlerle geldiği belirlendikten sonra, a-Si:H tabakasındaki gibi 60 s süresince büyütülmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Tez çalışmasının devamında i a-SiO_x:H tabakaya ilaveten pencere tabakası olarak n-türü katkılı a-Si:H film yerine n-türü katkılı a-SiO_x:H pencere tabakası filmler kullanılmak suretiyle güneş pilinin veriminin nasıl etkilendiği güneş pili parametreleri ve kuantum verimlikleri takip edilerek incelenmiştir. Bu amaçla ilk önce literatür desteğiyle birlikte var olan sistem ile [PH₃]:[SiH₄]:[CO₂] sccm koşullarında PH₃ miktarı 20-60 sccm aralığında değiştirilmiştir. Bu seri örneklerde en yüksek verimin elde edildiği 40:40:20 sccm katkılama oranındaki güneş pilleri için optimum n-türü katkılı a-SiO_x:H film kalınlığı güneş pili parametreleri ve kuantum verimi takip edilerek belirlenmeye çalışılmıştır. Bu güneş pillerinde tavlama sıcaklığının filmlerin büyüme sıcaklığı olan 190 °C den daha büyük olan 300 °C'de ve 80 dk.- 90 dk.'lara varan tavlama sürelerinde olduğu görülmüş ve en uygun büyüme süresi 80 s olarak gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: a-Si:H, a-SiO_x:H, PECVD, c-Si/a-Si:H, güneş pilleri

**THE CHARACTERISATION AND FABRICATION OF a-SiO_x:H/c-Si
HETEROJUNCTION SOLAR CELLS**

Okan YILMAZ

Department of Physics

PhD. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr.Orhan ÖZDEMİR

Co- Advisor: Assoc. Prof. Dr. Alp Osman KODOLBAŞ

Amongst the silisium based photovoltaic technologies a-Si:H/c-Si heterojunctions are getting more important because of their potentials to obtain high efficiency and low production costs. Low production costs because of ability to grow thin film layers on extensive surfaces and low production heat (roughly 200°C), better heat coefficients and thinner silisium substrates used for better surface passivation Heterojunction solar cells are more advantageous to the homojunction technologies used widely because of the low silisium consumption. While this thesis was being worked on (in 2013) the Japanese company Panasonic has shown that the high efficiency by heterojunctions with extensive surfaces having a surface area of 101.8 cm² and 24.7% efficiency is possible within the industrial production conditions by producing these solar cells. Nevertheless the full potential of these structures have not yet been identified completely and some wide range researches have been carried on by some groups.

This thesis is focused on understanding the effects of the different cleaning processes of the c-Si substrate surfaces to the interface defect passivation of the doped and intrinsic SiO_x:H compounds by analyzing the electrical and electrooptical features.

The passivation of the crystal silisium (c-Si) substrate and reducing the interface defects are the basic needs of the growth of the highly efficient a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells widely known as silisium heterojunctions. Surface passivation is provided mainly by developing silisium substrate cleaning processes in

detail and determining the PECVD parameters necessary to grow the hydrogenated amorphous silicon layers.

Nevertheless, producing the (i) layer with high temperatures ($>130^{\circ}\text{C}$) results in an epitaxial layer on c-Si that seriously reduces the efficiency of the solar cells. This epitaxial growth (i) restrains the growing process of a-Si:H layer and makes the optimization of the solar cell difficult. The biggest advantage of doped and intrinsic a-SiO_x:H layer is that they suppress the epi-Si growth on c-Si substrate by the a-SiO_x:H (i) layer. Specially, a-SiO_x:H (i) layer enables us to freely change the PECVD conditions before the epi-Si layer is formed. The application of the a-SiO_x:H (i) layer improves the repeatability of the solar cells since the a-Si:H (i) layers' optimum deposition conditions are at the a-Si:H/epi-Si phase limit for the maximum performance, photovoltaic structures having emitter qualification with wider band width is suggested in the past. For the a-Si:H/c-Si solar cells, a-Si:H based compound having a wider band width than a-Si:H is preferred to improve the J_{sc} short circuit current.

The aim of this thesis is to produce solar cells which have a structure of metal/(n) (p) a-Si:H/(i) a-Si:H/(p) (n) c-Si/(i) a-Si:H/n+ a-Si:H HIT type and at the layers of (n) (p) a-SiO_x:H/(i) a-SiO_x:H/(p) c-Si.

Within this aim different film growing conditions have been tried, solar cell parameters and the optimum parameters of the growing conditions have been determined and the solar cells have been produced using these conditions. When examined from this angle film conditions of which a-Si:H films have been used as buffer layer were observed. After the structural features like spectroscopic ellipsometer (SE), FTIR have been analyzed for the films that were grown over the Corning glass and quartz substrate, the undoped (intrinsic) a-Si:H films were grown on the p-type doped c-Si substrate. Also the plasma and chemical cleaning methods of c-Si substrate have been comparatively analysed. After then the substrate heat, PECVD parameters (RF power, pressure, SiH₄ gas flow), photo conductivity, dark conductivity and dielectric constant have been followed and analyzed for the undoped a-Si films that are proper for making device. The homogeneity and the smoothness of the surface of a-Si:H films have been analyzed by SEM and AFM techniques. Afterwards the films have been grown on c-Si with these conditions and a-Si:H/c-Si heterojunctions have been obtained. By following the open circuit tension the optimum doping ratio is identified as 5×10^3 ppm and 5×10^4 ppm [60] for both undoped a-Si:H films' passivation success and for doped (n-type) a-Si:H films that were grown in order to reduce the resistance.

The results of the I-V characteristics of light condition for the measurements of the solar cell which was grown 5×10^3 ppm and has a structure of Al/(n) a-Si:H/i a-Si:H/p c-Si/Al have been determined as 4.6% effectiveness and over the active area of 72 cm^2 .

This value is the highest efficiency value of the highest area but the effectiveness value is fairly low. It has been understood from the electroluminescence measurements that the surface of the undoped layer has not been effectively passivated and grown partially epitaxial. That's why the surface of the c-Si has been poorly passivated. Instead of using 200°C as the most appropriate substrate temperature, another series of solar cell with lower temperature and dilution of hydrogen have been produced. The first group has a temperature 190°C and higher substrates whereas the other

group is made up of solar cells which has a temperature lower than 190°C doped layer was grown with the constant temperature between 190°C and 225°C. According to the results when 190°C is chosen for the doped layer, the ideal temperature of undoped layer is between 190°C-210°C, whereas if it is chosen as 225°C then the ideal temperature is found out as 150°C.

It has been understood that the expected efficiency of the solar cells cannot be met by using c-Si surface passivation, undoped a-Si:H films, instead of a-Si:H films silicon suboxide (a-SiO_x:H) is decided to be used to meet this target. To reach this target the literature review is carried out and at the existing system conditions of [SiH₄]:[CO₂]:[H₂] sccm the amount of CO₂ has been changed in the range of 1-10 sccm. The produced a-SiO_x:H have been analyzed by SE method and by considering dielectric constant.

Also the changes of a series of solar cells produced by using a-SiO_x:H buffer layer and dilution of H₂ have been followed up. The results of the first trials showed that worse solar cells have been produced. The highest short circuit current and open circuit tension is observed in the series of the films that were grown by the dilution ratios of R=7 and 10 and tempered for 2 minutes.

Additionally the correlation between the dilution of hydrogen and the series resistance have been followed up and it has been observed that when the dilution amount is increased the series resistance is decreased so it is passivated relatively better. Additionally the effect of the thickness of a-SiO_x:H to the solar cell parameters has been analyzed by following up both by finding out the specifications of the cell and the quantum efficiency. After determining that the highest response to blue light is achieved within a-SiO_x:H films it is understood that like the i a-Si:H layer it has to be grown by 60 s.

Afterwards, how the efficiency of the solar cell have been affected using n type doped a-SiO_x:H window layer films instead of n type a-Si:H films additional to i a-SiO_x:H layers have been analyzed by following up the solar cell parameters and quantum efficiencies. For this purpose the literature review is carried out and at the existing system conditions of [PH₃]:[SiH₄]:[CO₂] sccm the amount of PH₃ has been changed in the range of 20-60 sccm. In these series of samples for the solar cells which have maximum efficiency with a doping ratio of 40:40:20 sccm, the optimum thickness of n-type doped a-SiO_x:H films is tried to be determined by using solar cell parameters and quantum efficiency

It has been observed that the tempering heat of these solar cells are 300°C which is higher than their growing temperature of 190°C and tempering period of 80-90 minutes. The most appropriate growing period is observed as 80s.

Keywords: a-Si:H, a-SiO_x:H, PECVD, c-Si/a-Si:H, solar cells

1.1 Literatür Özeti

Heteroeklemler 1950'lerin sonlarına doğru ortaya çıkan ve farklı iki yarıiletkeni birleştirilmesi ile oluşturulan aygıtlardır. Bu yarıiletkenler farklı enerji bant aralığına ve ancak birbirleriyle benzer örgü sabitlerine sahip yarıiletkenlerden seçilir. 1970'lerin başlarından itibaren farklı heteroeklem aygıt uygulamaları giderek artmıştır. Silisyum heteroeklemi kullanılarak güneş pilleri yapımı ile ilgili ilk makale, 1974'te Marburg üniversitesinde Walther Fuhs ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır [1]. a-Si:H/c-Si güneş pillerinde ara yüzeylerin oluşturulması katkılı tabakaların oluşturulması birçok faktörden etkilenir. Kullanılan c-Si alttabanın yüzey temizliği ve hazırlanması, plazma büyütme sürecinde gaz fazı etkileşimleri [2] ve farklı büyütme teknikleri, yüzey morfolojisini, pürüzlülüğünü, reaktivite ve yüzey kompozisyonu gibi yapısal kaliteyi belirler. Bu faktörler optik bant aralığı, aktivasyon enerjisi, bant ofset değeri, bant bükülmesi, film ve ara yüzey kusurlarını etkiler.

Silisyum heteroeklem güneş pilleri 200 µm kalınlığında silisyum alttabanın her iki yüzeyine, düşük sıcaklıklarda büyütülen çok ince amorf silisyum tabakalarla oluşturulan yaygıç ve geri yüzey etkisi (Back Surface Field – BSF) ile gün ışınımı ile birbirlerinden ayrılan elektron-delik çiftlerine dayanır. Düşük sıcaklıklarda a-Si:H'nin büyütülmesi bir yandan ısı işlemlerle ilgili bütçenin azalmasına ve üretim hızının artmasına neden olduğundan ticari olarak düşük üretim maliyetlerine sahiptir.

Geçen on yılı aşkın süreçte a-Si:H/c-Si heteroeklemlerden yüksek verimli hücreler elde edebilmek için alternatif yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunların arasında, katkısız tampon

bölgesinin kaldırılması, yaygıç ve BSF'deki katkı seviyelerinin azaltılması, p-türü c-Si üzerinde veya a-Si:H tabakasının a-Si:H/ μ c-Si:H yığınlar, a-SiOx:H ya da a-SiC:H ile değiştirilmesi örnek olarak gösterilebilir.

Yapılan çalışmalar sonucunda zaman içinde güneş pili verimliliğinde artma gözlenmiştir. Şekil 2.9'da zaman içerisindeki gelişme görülmektedir. Hem (n) a-Si:H/ (p) c-Si ve hem de Sanyo tarafından geliştirilen (p) a-Si:H/ (n) c-Si güneş pillerine yer verilmiştir. Her iki tür katkılı güneş pilleri arasındaki farklılık belirgindir ve taşıyıcı mobiliteleri ve bant ofsetlerinden kaynaklanmaktadır. Farklı olarak, NREL tarafından n-türü alttabanlar üzerinde %18.2 ve p-türü alttabanlar üzerinde %19.3 ($V_{oc}=678mV$) elde edilmiştir [3]. Avrupa'da en yüksek verim İsviçreli Roth&Rau firmasının EPFL Neuchatel ile ortak yaptığı çalışma sonucunda %21 verime, $100cm^2$ alan üzerinde ise %19.6 verime $718mV$ açık devre gerilimi ile ulaşılmıştır [4]. Son yıllarda, Sanyo (Panasonic) $100 \mu m$ 'den ince silisyum alttabanlar kullanılarak %23'ten daha yüksek verimlere çıkmanın mümkün olduğunu göstermiştir [5].

- Kristal Si heteroeklem güneş pillerinde hidrojenlendirilmiş amorf silikon (a-Si:H) uygun bir heteroeklem malzeme olarak kabul edilmiştir. Başlangıçta bu yapıda elektronik heteroeklemler yaratılabileceği keşfedilmiş, sonrasında güneş pillerine uygulanmışlardır [6].
- Katkılı a-Si:H tabakanın kusurlu özelliği nedeniyle katkılı a-Si:H filmlerin doğrudan c-Si yüzeylere büyütülmesinin kötü ara yüzeyler elde edilmesine neden olduğu düşünülmektedir. a-Si:H/ c-Si heteroyapılar için çıktı parametreleri katkılı amorf emiter ve c-Si alttaban arasına birkaç nm incelikte katkısız a-Si:H(i) sokulmasıyla büyük oranda faydalı olduğu bulunmuştur. [7].
- Bununla beraber (i) tabakasının yüksek sıcaklıkta ($>130^{\circ}C$) oluşturulması c-Si üzerinde güneş pilinin performansının ciddi olarak düşmesine neden olan bir epitaksiyel tabaka oluşmasına neden olur. Bu epitaksiyel büyüme (i) a-Si:H tabakası büyümesi poresisini kısıtlar ve güneş pili optimizasyonunu daha zor kılar [8].
- Katkılı ve katkısız a-SiO:H tabakalarının en büyük avantajı c-Si alttabanlar üzerindeki epi-Si büyümesinin a-SiO:H (i) tabakası ile bastırılmasıdır. Özellikle a-

SiO:H i tabakası epi-Si tabakaları oluşturmadan PECVD koşullarını özgürce değiştirmemize imkân verir. a-SiO:H i tabakasının uygulanması, a-Si:H (i) tabakalarının optimum biriktirme şartlarının a-Si:H/epi-Si faz sınırlarında bulunması nedeniyle güneş pili üretiminin tekrarlanabilirliğini iyileştirir [9], [10], [11], [12], [13].

- Maksimum fotovoltaik aygıt performansı için geçmişte daha geniş bant aralıklı yaygıç özelliğine sahip yapılar önerilmiştir [14]. a-Si:H/c-Si güneş pillerinde J_{sc} kısa devre akımını geliştirmek için a-Si:H'den daha geniş bir bant aralığına sahip a-Si:H tabanlı bir alaşım kullanmak tercih edilir.
- Yapıya oksijen eklenerek hazırlanan a-SiO_x:H alaşımında, yapıya giren oksijen miktarı arttıkça iletkenlik ve valans bant uzantıları genişlediği bilinmektedir [15]. Ayrıca oksijen içeriğinin artması optik bant aralığını arttırması, karanlık iletkenlik ve foto iletkenliği azaltması ve silisyum kopuk bağ yoğunluğunu arttırma etkisi vardır [16]. Optik bant aralığı artan oksijen içeriğiyle beraber 1.7-3 eV arasında değiştirilebilir [17]. Geniş bant aralıklı a-SiO:H, SiH₄ ve CO₂ gaz karışımı kullanılarak PECVD ile üretilmektedir. [18], [19].

1.2 Tezin Amacı

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum alt oksit (a-SiO_x:H, x<2) ve kristal silisyumdan (c-Si) oluşan a-SiO_x:H/c-Si heteroeklem güneş pillerinin fabrikasyonunu farklı x değerleri için gerçekleştirmek ayrıca güneş pili parametrelerinin ve performansı etkileyen unsurların belirlenmesi amaçlanmıştır. Güneş pilleri, TÜBİTAK UME, Fotonik ve Elektronik Sensörler Laboratuvarında bulunan plazma destekli kimyasal buharlaştırma (PECVD) ve diğer ilgili sistemler kullanılarak, 1-10 Ωcm özdirence sahip, CZ (Czochralski) yöntemiyle büyütülmüş p- ve n-türü katkılanmış alttabanlar üzerinde Al/c-Si/a-SiO_x:H (tampon)/a-Si:H (yaygıç)/TCO/metal ızgara üşek (electrode) yapısında büyütülecektir. Amorf/Kristal silisyum heteroeklem güneş pillerinin optimizasyonunda ilk olarak katkılamanın etkisi incelenecektir. Bu amaçla, oldukça ince (20-80 Å) ve farklı oranlarda n- ve p-türü katkılanmış amorf silisyum alt oksit, temizlenmiş c-Si alttabanları üzerinde büyütülerek oluşturulacak güneş pilleri, güneş benzetici (solar simülatör) aydınlatmasında, akım-

gerilim ölçümleri ile karakterize edilecektir. Daha sonra, alttaban temizliğinin etkisini incelemek amacıyla, kristal silisyum alttabanlar farklı kimyasal ve plazma aşındırma yöntemleri ile temizlenerek ara yüzey kusurlarına bağlı güneş pili verimliliğindeki değişim incelenecektir. Heteroeklemlerde ara yüzey kusurlarını incelemek amacıyla I/V, admitans ve fotoluminesans ölçümlerinden yararlanılacaktır. Seçilmiş aygıtlar üzerindeki diyotların performanslarını belirlemek için dalga boyunun fonksiyonu olarak toplama verimliliği (Collection Efficiency) ve farklı ters besleme gerilimlerinde dış toplama verimliliği (External Collection Efficiency-ECE) ölçümlerinden yararlanılacaktır.

1.3 Hipotez

Heteroeklem kristal silisyum (c-Si) güneş pili yüksek performanslı ve düşük maliyetli olması nedeniyle güneşten elektrik üretiminde en umut vaat eden yapılardan biridir. Bu yapıdaki güneş pillerinde en yüksek verim Sanyo grubu tarafından %22 olarak elde edilmiştir.

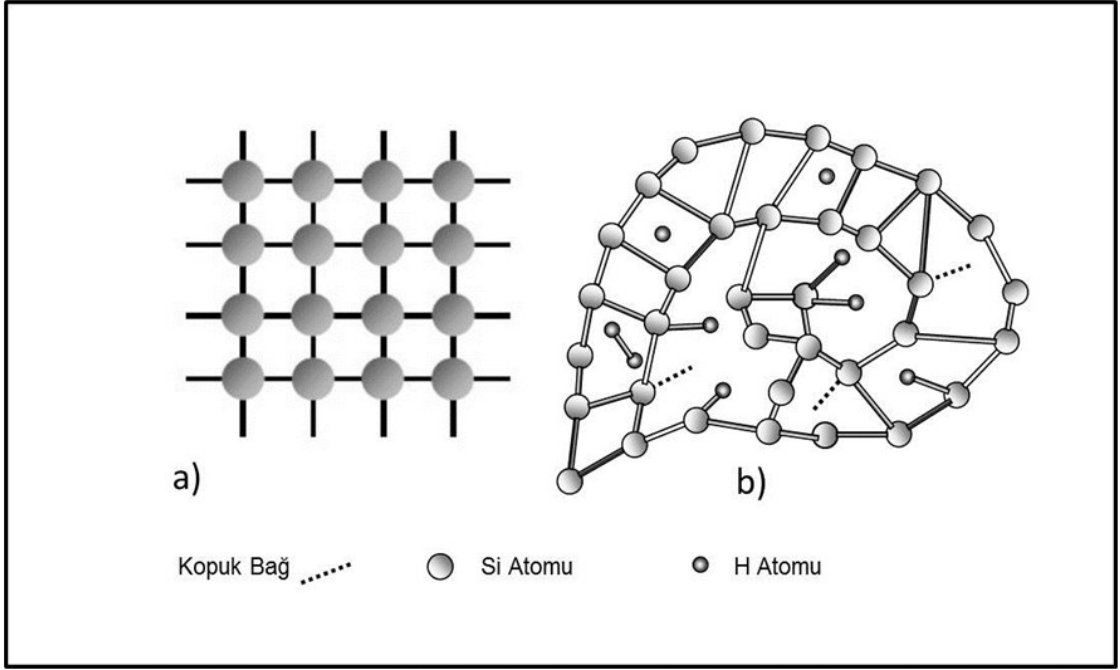
a-SiO_x:H/c-Si heteroeklem yapısında güneş pilinin fabrikasyonu, karakterizasyonu ve parametrelerinin optimizasyonu hedeflenmiştir. Literatürde, a-SiO_x:H/c-Si heteroeklem güneş pillerinin büyütülmesi ve özelliklerinin anlaşılması hakkında çeşitli çalışmalar olmasına karşın yapılması gereken iş yükünden dolayı farklı tampon tabakalarının güneş pili verimliliğine etkisi incelenememiştir, kristal silisyum temizleme yöntemleri arasındaki verimlilik farklılıkları belirgin değildir ve ara yüzey kusurlarının anlaşılabilmesi için sadece sınırlı deneysel yöntemler uygulanabilmektedir. Bu tez literatüre, özellikle a-SiO_x:H/c-Si heteroeklem güneş pilleri için uygun tampon malzemesinin Silan gazının Karbon dioksit gazı ile karıştırılarak büyütme koşullarının belirlenmesi, karakterizasyonu ve aygıtın verimliliğine etkisi, kristal silisyum yüzeyini kimyasal ve plazma yöntemleri ile temizleme arasındaki farklılıkların nicelleştirilmesi ve ara yüzey kusurlarının deneysel yöntemler kullanılarak anlaşılması hususlarında katkıda bulunması beklenmektedir.

a-Si:H/c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİ

2.1 Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum

Kristal yapıda atomlar periyodik bir düzende dizilirler. Kristal silisyumu ele alırsak, her bir silisyum atomu komşu dört tane atoma eşit bağ uzunluğu ve açısı olacak şekilde kovalent olarak bağlıdır. Atomik yapıda bir atomun en yakın komşuları ile yaptığı bağ sayısına koordinasyon sayısı adı verilir. Dolayısıyla bir tek kristal silisyumda tüm silisyum atomları için koordinasyon sayısı dört olup silisyum atomları tetrahedral yapı oluştururlar. Bu şekilde tanımlı birim hücrelerin tekrarlanması oluşan kristal örgüye sahip atomik düzenlenişler uzun erimli düzenli yapı olarak tanımlanır.

Silisyum amorf silisyum (a-Si) olarak bilinen kristal olmayan yapıda da bulunur. Kristal silisyumdan farklı olarak a-Si uzun erimli düzene sahip değildir. Kısa erimde her bir silisyum atomu komşu dört atomla kovalent bağ oluşturmuş şekilde bir düzene sahipken bir kaç atom uzaklıkta bu düzen bozulur. Silan (SiH_4) bir plazma ile çözüldüğünde ortaya çıkan maddeye Hidrojen girmesi ile hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) denen farklı bir madde ortaya çıkar.



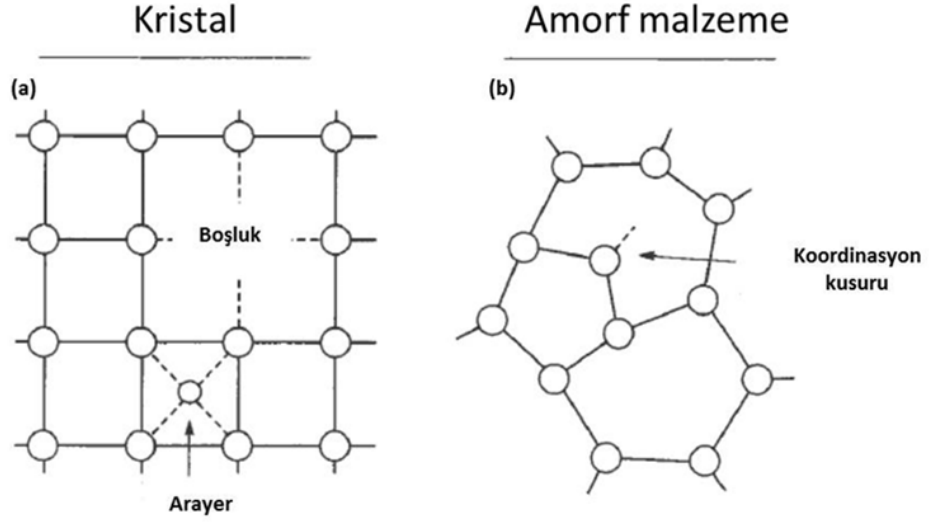
Şekil 2.1 c-Si ve a-Si:H örgüsü

Şekil 2.1’de c-Si ve rastgele a-Si:H yapıları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi birçok Si atomu dört koordinasyona sahipken bazıları üç ya da iki koordinasyona sahiptir. Şekilde kopuk bağlar ve hidrojen ile pasive edilmiş kopuk bağlar da gösterilmiştir. Bu yapıda ayrıca hidrojen atomu ya da molekülü bulunabilir.

Her ne kadar a-Si ve a-Si:H kristal olmasa bile böyle malzemelerin de bir iletim ve değerlik bantları ile temsil edilen bir bant yapısı mevcuttur. Kısa erim düzen, kristal yapıdaki katılardan bildiğimiz durum yoğunluğu özelliklerinin birçoğunu geçerli kılan önemli bir rol oynar [20]. a-Si:H da komşu atomlar arasındaki bağlanma açıları ve bağ uzunluklarındaki büyük değişimler zayıf ya da gerili bağlara neden olurlar. Yeteri kadar enerji söz konusu olduğunda, örneğin ısı gibi, zayıf bağlar kolayca kırılır. Bu olay atom örütünde kusurların oluşmasına neden olur.

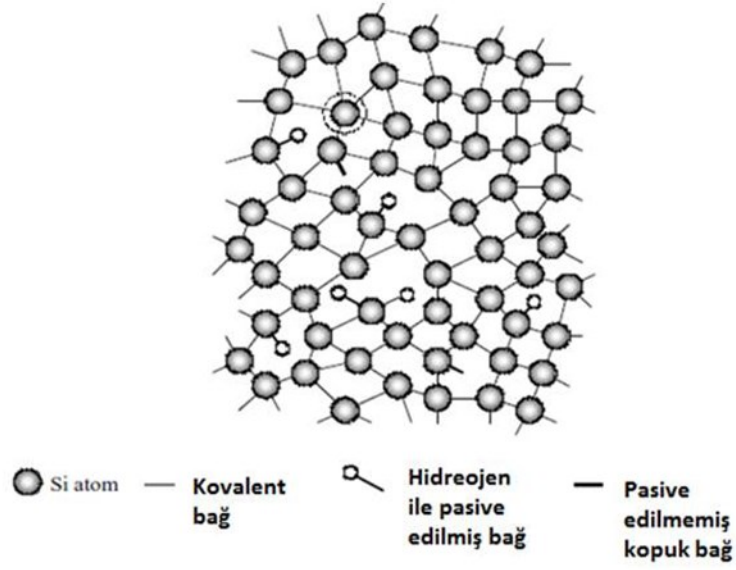
Gerçek kristal boşluklar, dislokasyonlar ve araya girme kusurlarını içerir. Sürekli rastgele örüt de kusurlar içerir ancak kusur tanımı biraz değişiktir. Bir kristalde olması gereken yerden farklı bir konumda bulunan atom bir kusurdur, bu tür kusurlara boşluk ya da ara yer kusuru örnek verilebilir. Sürekli rastgele örütte, bir atom bulunması gereken yerden farklı bir yerde bulunamaz çünkü böyle bir örütte bir atomun tek yapısal özelliği komşuları ile koordinasyonudur. Dolayısıyla bir amorf yarıiletken bir

atom çok fazla ya da çok az bağa sahipse temel kusur koordinasyon kusurudur. Düzensiz örütün herhangi bir atomik koordinasyona uyabilmesi bir izole koordinasyon kusuruna neden olur ki bu bir kristalde görülmez. Kristal ve amorf maddelerin kusurları arasındaki fark şekil 2.2 de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Farklı basit kusurlar (a) kristal (b) amorf örüt

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumda (a-Si:H) başlıca kusur sadece üç silikon atomuna kovalent bağlı ve bir eşleşmemiş elektronu olan silikon atomlarıdır ki buna kopuk bağ adı verilir. Bu düzenleniş a-Si:H da baskın kusur olduğundan a-Si:H' daki kusurlar genellikle kopuk bağlarla ilişkilidir. Başka bir kusur düzenlenişi ise bir silikon atomunun beş silikon atomuna bağlanmış olmasıdır. Bu düzenlenişe gezici (floating) bağ adı verilir. Bazı kopuk bağ kusurları ve gezici bağ (noktalı daire ile çevrili atom) kusuruna sahip bir silikon atomu şekil 2.3 'de gösterilmektedir.



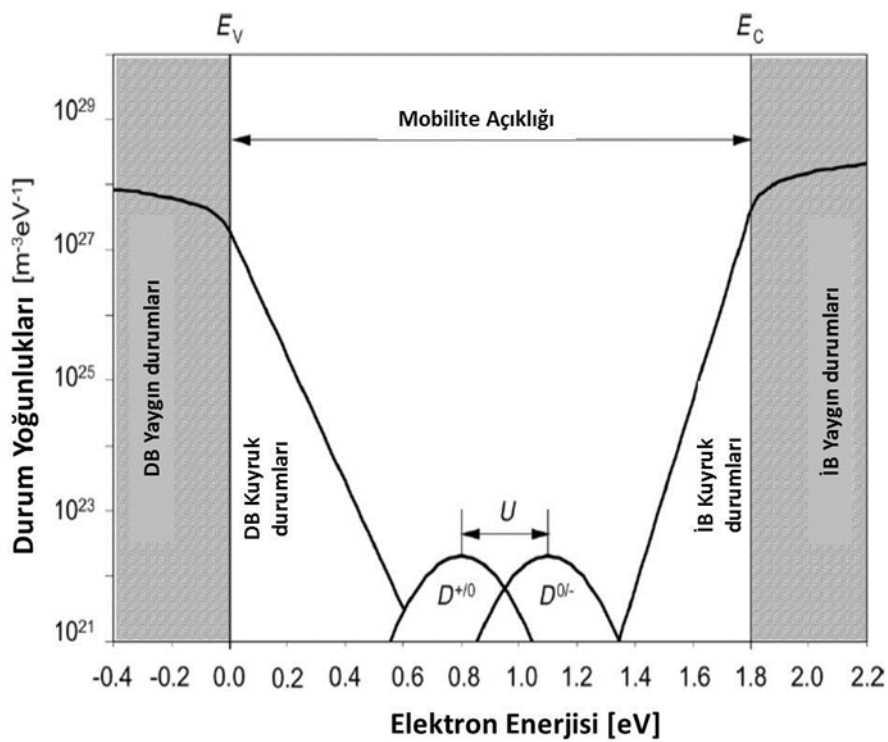
Şekil 2.3 a-Si:H Kopuk ve gezici bağ kusurları

Bu kopuk bağlar malzemenin elektronik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Plazma biriktirme yöntemiyle elde edilen saf a-Si da kopuk bağ kusurlarının yoğunluğu Fermi seviyesinin çakılı (pinned) olması nedeniyle yaklaşık 10^{20} cm^{-3} mertebesindedir ki bu malzemeyi elektronik aygıt uygulamalar için kararsız hale getirir. Bununla beraber eğer atomik örüte bu yöntemlerle hidrojen katılması durumunda hidrojen birçok silikon kopuk bağına bağlanarak kuvvetli silikon-hidrojen bağları oluşturarak bu kopuk bağ kusurlarını pasifleştirir ve kusur yoğunluğunu yaklaşık 10^{16} cm^{-3} mertebesine düşürür.

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun plazma biriktirme metoduyla büyütülmesi ilk olarak Sterling ve Swann [21] ve Chittick [22] tarafından Silan gazının radyo frekans (RF) glow deşarj biriktirme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Birkaç yıl sonra [23] amorf silikonun katkılandığı ve böylece güneş pilleri, TFT'ler ve foto-detektörler için uygun bir malzeme olduğu bulunmuştur. Böyle iyi kalitedeki filmler düşük alttaban sıcaklıklarında Silan gazı kullanılarak Plazma ile Geliştirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) yöntemiyle üretilebilirler.

Amorf yarıiletkenlerin, kısa erimli düzene sahip ideal örüt yapısı, uzun erimli düzensizliği ve koordinasyon kusurları temel özellikleridir. Kısa erim düzenin korunması bir amorf malzemenin genel elektronik yapısının kristal özdeşi ile karşılaştırıldığında

benzer yapıya sahip olması sonucunu doğurur. Bir kristalin dik bant kenarlarının yerine uzun erimli yapısal düzensizlik nedeniyle bağ uzunluğu ve açısı değişimleri kaynaklanan yasak bandın içine doğru giren yayvanlaşmış uzantılar geçer. Buna ek olarak izinli enerji durumlarına giren kusurlar valans ve iletim bantlarının arasındaki merkez bölgeye yerleşirler. Yani a-Si:H'daki durum yoğunlukların sürekli bir dağılım gösterir ve valans ve iletim bandı arasında iyi tanımlı bir bant açıklığı bulunmaz. Bir amorf yarıiletkendeki bant açıklığındaki bantları, bant uzantıları ve kusur durumları aşağıdaki şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 a-Si:H'daki durum yoğunlukları için standart model

Bu modelde valans ve iletim bandı durumları enerjiye parabolik bağımlılık gösteren ve üstel olarak sönümlenen valans ve iletim bantı uzantı durumları olarak temsil edilmektedir. Kusur yoğunlukları bir korelasyon enerjisi U ile birbirini içine giren iki eşit Gaussian dağılımla temsil edilmektedir. Korelasyon enerjisi sabit ve pozitif 0.2 eV değerine sahip olduğu varsayılır [20]. Daha öncede değinildiği gibi kopuk bağlar a-Si:H'daki baskın kusurlar olarak kabul edilir. Bir kopuk bağ üç yük durumunda bulunabilir: pozitif (D^+), nötr (D^0) ve negatif (D^-). Kopuk bağ gibi üç olası yüke sahip bir

kusur bant diyagramında, iki enerji seviyesi $E^{+/0}$ ve $E^{0/-}$ ile gösterilir ve Fermi seviyesinin konumuna bağlı olarak kusurun yük işgalini karakterize eder. Bu iki enerji seviyesine geçiş enerji seviyesi denir. İki Gaussian dağılım $D^{+/0}$ ve $D^{0/-}$, sırasıyla kopuk bağların yük geçişleri ile ilişkili $+/0$ ve $0/-$ ilişkili enerji durumlarının dağılımını gösterir. Kopuk bağlar hem verici gibi ($+/0$) hem de alıcı gibi ($0/-$) durumlar ile gösterildiğinden kopuk bağlara çift etkili (amphoteric) kusurlar denir.

Enerji durumları yani yük taşıyıcıları serbest taşıyıcılar olarak sayıldığından tüm atomik yapıya dağılan dalga fonksiyonları ile tanımlanırlar. Bu durumlar yerelleşmemiştir ve yaygın (extended) durumlar olarak adlandırılır. a-Si:H daki düzensizlik kusur ve uzantı durumlarının dalga fonksiyonlarının atomik örüntü içinde yerelleşmesine neden olur. Bu durumlara yerelleşmiş durumlar adı verilir. Sonuç olarak yük taşıyıcılarının yerelleşmiş durumlardan taşınmasını karakterize eden mobilite kuvvetle azalır. Yerelleşmiş durumlardaki taşıyıcıların mobilitesinin yayılmış durumlara kıyasla bu keskin düşüş özelliği a-Si:H'un bant açıklığını belirlemek için kullanılır. Bu bant açıklığı mobilite açıklığı, E_{mob} , terimi ile belirtilir. a-Si:H'da yaygın durumları yerelleşmiş durumlardan ayıran enerji seviyelerine valans bantı, E_v , ve iletim bandı, E_c , mobilite kenarları adı verilir. a-Si:H'un mobilite açıklığı tek kristal silisyumun banda açıklığından daha büyüktür ve filmdeki hidrojen yüzdesi içeriğine bağlı olarak göre tipik olarak 1.7 eV ile 1.8 eV değerleri arasındadır. Hem kristal hem de amorf yarıiletken elektronik yapısı bant aralığındaki bantları, bant uzantılarını ve kusur durumlarını içerir. Durumların enerji dağılımları dolaylı olarak a-Si:H filmlerin elektriksel ya da optikse özelliklerinin ölçülmesi ile ya da a-Si:H ara yüzeylerinde oluşan uzay-yük bölgesinin özelliklerinin ölçülmesi ile belirlenir.

2.2 Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum Oksit (a-SiO_x:H) Alaşımı

Kristal Si heteroeklem güneş pillerinde hidrojenlendirilmiş amorf silikon (a-Si:H) uygun bir heteroeklem malzeme olarak kabul edilmiştir. Başlangıçta bu yapıda elektronik heteroeklemler yaratılabileceği keşfedilmiş, sonrasında güneş pillerine uygulanmışlardır [6]. Katkılı a-Si:H tabakanın kusurlu özelliği nedeniyle katkılı a-Si:H filmlerin doğrudan c-Si yüzeylere büyütülmesinin kötü ara yüzeyler elde edilmesine neden olduğu düşünülmektedir. a-Si:H/ c-Si heteroyapılar için çıktı parametreleri katkılı amorf emiter ve c-Si alttaban arasına birkaç nm incelikte katkısız a-Si:H(i) sokulmasıyla büyük oranda faydalı olduğu bulunmuştur. [7]. Bununla beraber (i) tabakasının yüksek sıcaklıkta (>130°C) oluşturulması c-Si üzerinde güneş pilinin performansının ciddi olarak düşmesine neden olan bir epitaksiyel tabaka oluşmasına neden olur. Bu epitaksiyel büyüme (i) a-Si:H tabakası büyümesi potansiyelini kısıtlar ve güneş pili optimizasyonunu daha zor kılar [8]. Katkılı ve katkısız a-SiO:H tabakalarının en büyük avantajı c-Si alttabanlar üzerindeki epi-Si büyümesinin a-SiO:H (i) tabakası ile bastırılmasıdır. Özellikle a-SiO:H i tabakası epi-Si tabakaları oluşturmadan PECVD koşullarını özgürce değiştirmemize imkân verir. a-SiO:H i tabakasının uygulanması, a-Si:H (i) tabakalarının optimum biriktirme şartlarının a-Si:H/epi-Si faz sınırlarında bulunması nedeniyle güneş pili üretiminin tekrarlanabilirliğini iyileştirir [9], [10], [11], [12], [13]. Maksimum fotovoltajik aygıt performansı için geçmişte daha geniş bant aralıklı yaygıç özelliğine sahip yapılar önerilmiştir [14]. a-Si:H/c-Si güneş pillerinde J_{sc} kısa devre akımını geliştirmek için a-Si:H'den daha geniş bir bant aralığına sahip a-Si:H tabanlı bir alaşım kullanmak tercih edilir.

Yapıya oksijen eklenerek hazırlanan a-SiO_x:H alaşımında, yapıya giren oksijen miktarı arttıkça iletkenlik ve valans bant uzantıları genişlediği bilinmektedir [15]. Ayrıca oksijen içeriğinin artması optik bant aralığını arttırması, karanlık iletkenlik ve foto iletkenliği azaltması ve silisyum kopuk bağ yoğunluğunu arttırma etkisi vardır [16]. Optik bant aralığı artan oksijen içeriğiyle beraber 1.7-3 eV arasında değiştirilebilir [17]. Geniş bant aralıklı a-SiO:H, SiH₄ ve CO₂ gaz karışımı kullanılarak PECVD ile üretilmektedir. [18], [19].

2.3 PECVD ile a-Si:H Biriktirme

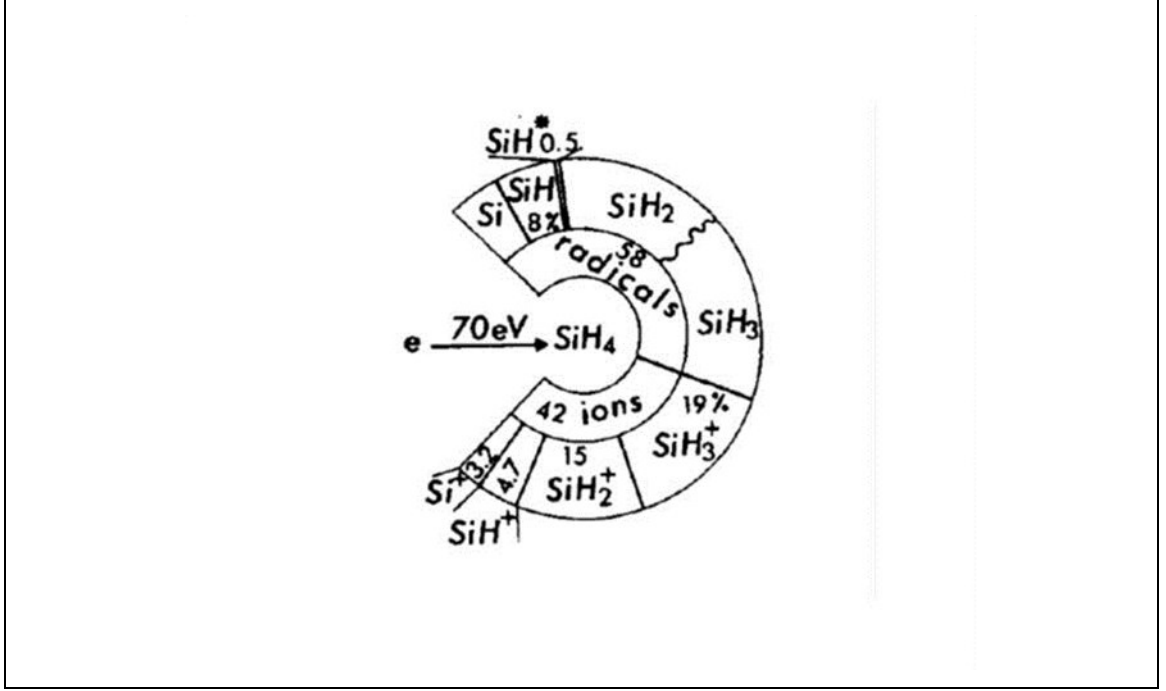
Genel olarak a-Si:H, SiH₄ gazının katkılama ya da alaşım elde etmek için plazma ile ayrıştırılması yöntemi ile biriktirilir. Silan plazma olmaksızın 450 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ayrışır, daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen ayrışma ile de polykristal ya da epitaksiyel silisyum elde edilir. Amorf silisyum 550 °C 'nin altındaki sıcaklarda büyümesine rağmen bu sıcaklık hidrojenin yapıdan kalması için çok yüksek olduğunda oluşan filmler düşük kalitede olur. Hidrojenlendirilmiş filmlerin daha düşük sıcaklıklarda biriktirilmesi Silan molekülünün daha az enerjili bir kaynakla çözülmesini gerektirdiğinden plazma kullanılır. Amorf silisyum için ilk plazma biriktirme sistemi Chittick ve diğerleri (1969) tarafından geliştirilmiştir. Çoğu plazma reaktörü, plazmanın iki paralel elektrot arasında oluşturulduğu diyot yapısındadır. Biriktirme plazmanın sürekli olabildiği 0.1-1 Torr gaz basıncı altında gerçekleşir. Reaktör, bir gaz girişi, alttabanın tutturulduğu biriktirme odası, bir pompalama sistemi ve deşarj için bir güç kaynağından oluşur. Biriktirme işlemine Plazma ile Geliştirilmiş Kimyasal Buharlaştırma (PECVD) adı verilir [20].

Kapasitif bağlantılı düzlemsel diyot radyo frekansı yük boşaltımı ile a-Si:H'un PECVD yöntemiyle üretilmesi uzun bir süredir kullanılmakta olan bir yöntemdir. En yaygın kullanılan frekans 13.56 MHz'dir.

Özellikle düşük basınçlarda üretilen plazmada (yük boşaltımı-glow discharge) serbest elektronlar düşük gaz sıcaklıklarında, hem elektronik hem de titreşimsel uyarılma, iyonizasyon ve ayrışma olaylarını başlatacak yeterli kinetik enerjiyi kazanabilirler. Bu şekilde gaz moleküllerinin ayrışması sonucu ortaya çıkan aktif türler (radikaller, atomlar, iyonlar ve uyarılmış türler), değişken elektrik alan altında (13.56 MHz) hızlanan yüksek enerjili ikincil elektronlarla yaptıkları çarpışmalar sonucu yüzeyler ile etkileşime girerek tabakalar halinde birikerek aygıt yapımına uygun a-Si:H filmlerin büyümesine olanak sağlar [20].

Aktif türlerin plazma fazında üretme olasılığının yüksek olması ve bu ürünlerin düşük sıcaklıklarda bir yüzeyle etkileşimini izin vermesi sayesinde PECVD tekniği cam, paslanmaz çelik ve esnek plastik folyo gibi uzuz alttabanlar üzerine yüksek kaliteli mükemmel a-Si:H ince filmler üretme yeteneğine sahiptir [24].

Bir Silan molekülünün (SiH_4) 70 eV enerjiye sahip bir elektron ile çarpışması sonucu Silan molekülünün ayrışması ile ortaya çıkabilecek malzemeleri gösteren şema şekil 2.5 te verilmiştir.



Şekil 2.5 70 eV enerjili elektron çarpışması sonucu SiH_4 ayrışması kanalları için olasılık şeması [20]

Plazmada çok sayıda malzeme ortaya çıkmaktadır Normal biriktirme basıncında, gaz moleküllerinin ortalama serbest yolları reaktörün boyutlarından çok daha düşüktür ve 10^{-3} - 10^{-2} cm gibidir. Dolayısıyla moleküller arasındaki çarpışmaların çoğu alttaban üzerine difüzyon olayı sırasında gerçekleşir. Bu tür ikincil reaksiyonlar büyüme olayının anlaşılmasını zorlaştırır. Tipik düşük güçlü plazmada moleküler maddeler ile radikal ya da iyonlara arasındaki oran 10^{-3} dir dolayısıyla çarpışmaların çoğu Silan ile olur. Yüksek reaksiyon hızlarına sahip radikaller düşük yoğunlukta ve kısa difüzyon uzunluğuna sahiptirler, dolayısıyla büyüme yüzeyine ulaşmaları daha az olasıdır. En az reaktif malzemeler başlangıç oluşum hızlarına bakmaksızın çarpışmalardan en uzun süre kurtulabilen ve en yüksek konsantrasyona sahiplerdir. SiH_3 böyle bir radikaldir, daha az hidrojene sahip radikallerden farklı olarak SiH_4 ile reaksiyona girmez. Bunun nedeni Si_2H_n yapılarının sadece $n \leq 6$ şartında var olabilmesidir. Bu yüzden plazma uzun yaşam süreli birincil radikallerin ve daha reaktif olan gaz malzemelerin ikincil ürünlerinin bir karışımıdır [20].

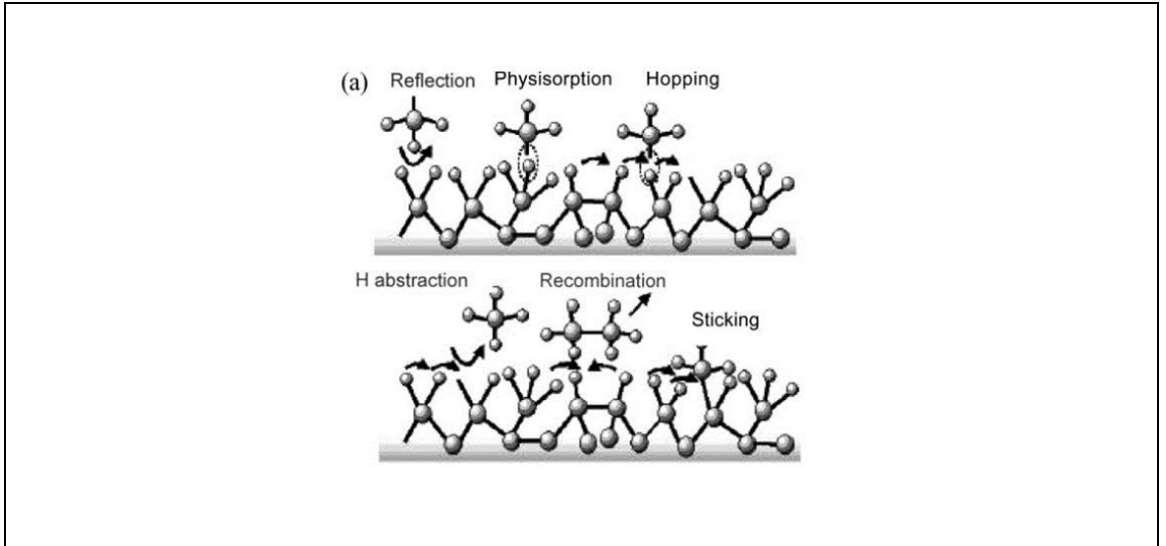
Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum'un PECVD ile biriktirilmesi genel olarak gaz fazı/plazma, yüzey ve yüzey altı süreçleri ile özetlenebilir.

Gaz fazı-plazma reaksiyonunda esas olarak iki süreç vardır. Süreç SiH_4 'nin elektron çarpması sonucu nötr radikallere ve iyonik malzemelere ayrışması ile başlar. Bu birincil reaksiyonlar gaz akış hızı, plazma gücü ve gaz basıncı gibi parametrelerle kontrol edilir.

İkinci süreçte plazmada üretilen reaktif maddeler ayrışmamış silan ile reaksiyona girerler. Bu ikincil reaksiyonların önemi, H atomlarının silan ile reaksiyona girmesi sonucu a-Si:H biriktirmesinde baskın bir etkisi olan en önemli SiH_3 radikalini üretmesidir. Üretilen SiH_3 radikali film yüzeyine ulaşır. Yüksek plazma gücü ve/veya basınç şartlarında ikincil süreç reaktif SiH_2 'nin SiH_4 ile yıkıcı reaksiyonlarına neden olur.

Yüzey reaksiyonları, alttaban sıcaklığı ile ilişkili olarak, büyüyen filme radikal difüzyonu, kimyasal bağlanma, yüzeye hidrojen yapışması ya da yüzeyden ayrılmasıdır

Yüzey altı reaksiyonlarında hidrojenin bırakılır ve silisyum örüt gevşer. Yüzey reaksiyonunda SiH_3 radikali yüzeye difüzyonu sırasında yüzeyden bağlı olan hidrojeni çıkararak SiH_4 oluşturur ve yüzeyde kopuk bağlar bırakır. Bu arada diğer SiH_3 molekülleri yüzeye difüz ederek kopuk bağların bulunduğu yerleri bulur ve Si-Si bağı (film büyümesi) gerçekleşir. Temel SiH_3 reaksiyonları Şekil 2.6 da görülmektedir.



Şekil 2.6 Temel SiH_3 reaksiyonları [21].

Tamamıyla Si-H bağları ile sonlandırılmış bir yüzey SiH_3 tutmaz. Ancak SiH_3 sonlandırılmamış herhangi bir silisyuma bağlanabilir. Bu yüzden yüzeyden Hidrojen

ayrılması SiH_3 radikalinden film biriktirmesi için gerekli bir adımdır. Hidrojen yüzeyden ısı uyarım ile atomik ya da moleküler hidrojen şeklinde kendiliğinden ayrılabilir ya da gaz radikalleri veya iyonları tarafından yüzeyden sıyrılabilir. Atomik hidrojen yüzey yakınındaki tüm gaz radikalleri arasından maddenin en içerilerine kadar nüfuz edebilir. Hidrojenin difüzyonu, yüzeyden ayrılması ya da yüzeyde tutulması biriktirme sıcaklığında ara yerdeki hidrojenin oldukça hızlı bir şekilde kolayca tutunabileceği silisyum kopuk bağlarının bulunduğu maddenin gövdesine hareket edebileceğini gösterir. Bu yüzden Hidrojen biriktirme sürecinin oluşturduğu yüzeyaltı kusurlarını giderme özelliğine sahiptir. Dört kovalent bağı olan Silisyumun maddenin gövdesine difüzyonu bir kovalent bağı olan hidrojeninkinden çok daha yavaştır.

SiH_3 akışı sırasında bazı SiH_3 radikalleri yüzeyde yutulur, bu durumda üç farklı mekanizma çalışabilir:

1. SiH_3 yüzeydeki hidrojene bağlanarak SiH_4 oluşur
2. İki SiH_3 radikali yüzeyde etkileşerek Si_2H_6 oluşturur
3. Yüzeye difüz eden SiH_3 kopuk bağ içeren yere yapışarak Si-Si bağı oluşturur.

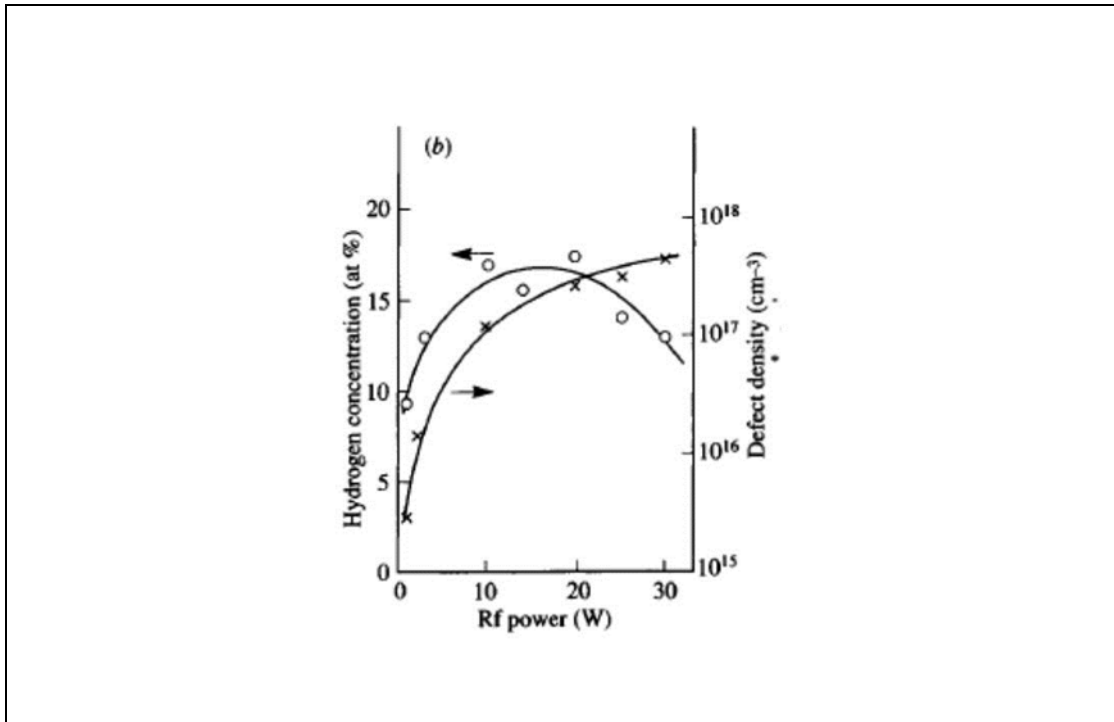
2.3.1 Plazma parametrelerinin Malzeme özelliklerine etkisi

Hidrojenlendirilmiş amorf Silisyum filmlerin malzeme özelliklerinin plazma parametreleri ile değişiminin anlatıldığı bu bölümde R. A. Street'in "Hydrogenated Amorphous Silicon" (Cambridge University, New York 1991) [20] kitabından yararlanılmıştır.

Biriktirme yöntemi ile genellikle düzgün homojen tabakalı ince film elde edilemez. Filmin alttaban üzerinde başlangıçtaki çekirdeklenmesi bunu takip eden büyüme şekli boşluklar, sütun şeklinde büyüyen yapılar ve yüzey pürüzlülüğü gibi makroskopik türdeşsizliklere neden olabilir. Film yapısı biriktirme kimyasına ve biriken moleküllerin yüzey mobilitelerine bağlıdır ve büyüme sürecinin hassas bir göstergesidir. a-Si:H örüt yapısının birçok özelliği büyüme sırasında belirlendiğinden biriktirme sürecinin detaylarına bağlıdır. Homojenliği bozan unsurların malzemenin elektronik özelliklerini bozması nedeniyle film yapısının dolayısıyla biriktirme koşullarının kontrol edilmesi zorunludur [20].

PECVD ile üretilen a-Si:H filmlerin plazma gücüne, gaz akış hızına, alttaban sıcaklığına, toplam basınca ve hidrojen seyreltme oranına bağlı olduğu bilinmektedir [20].

Plazma gücü arttırıldığında biriktirme hızının gaz akış hızı sınırlayıcı bir faktör oluncaya kadar monoton bir şekilde artar. Biriktirme hızının artması kötü film kalitesi ve toz oluşması gibi bazı dezavantajları beraberinde getirir. Düşük güç seviyelerinde büyük miktarda SiH₄ ayrışmadan kalır ve oluşan film sadece mono hidratları içerir. Yüksek güç seviyelerinde SiH₄ yüksek oranda ayrışır ve oluşan filmler büyük miktarda SiH₂ içerir. Artan güç ile hidrojen içeriği arttığından optik bant aralığı artar. Bununla beraber çok yüksek güç seviyelerinde mikro kristal silisyum oluşur ki bu hidrojen içeriğini (sonuç olarak bant aralığını) azaltır.

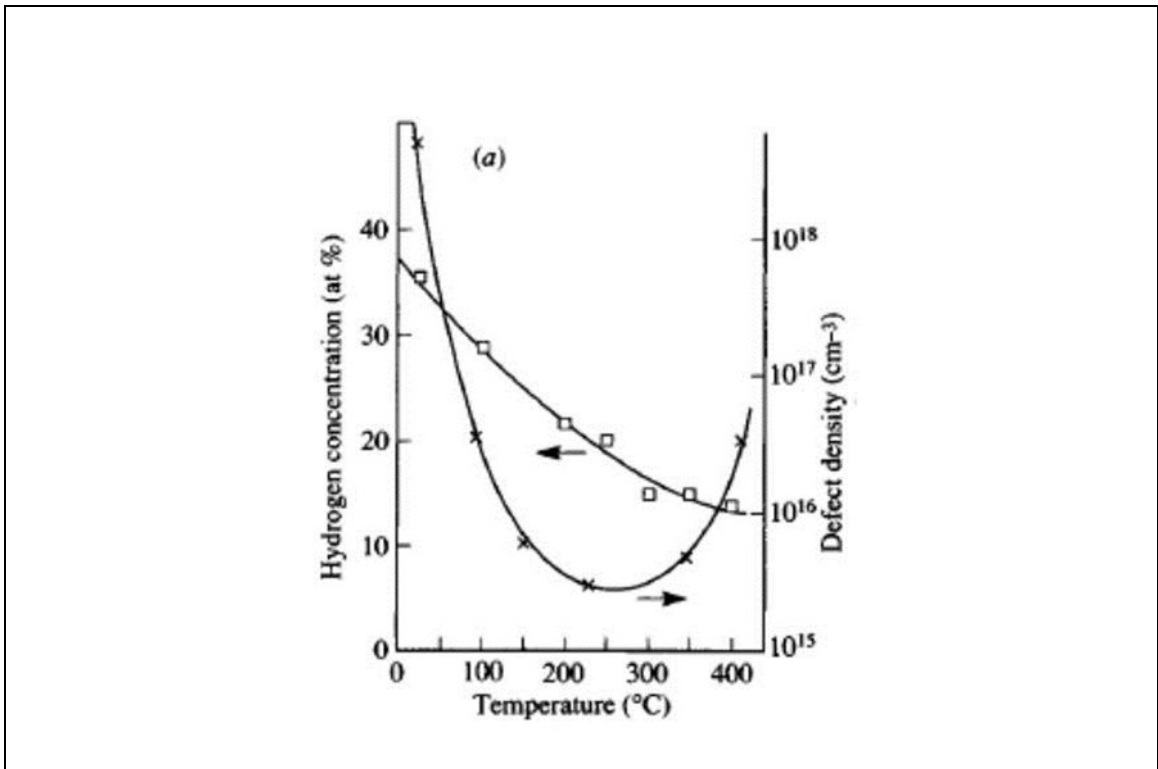


Şekil 2.7 Malzeme özelliklerinin RF gücüne bağımlılığı

Gaz akış hızı azaldıkça plazmadaki ağır ve kısa yaşam süreli radikallerin kalış süreleri artar. Kalış süresi bir molekülün film oluşumuna katılım olasılığının ölçüsüdür. Kalış süresindeki artış bu radikallerin ince film büyümesine katkılarını artırır, bu ise filmin yapısını ve elektronik özelliklerini olumsuz etkiler. Bunun sonucu olarak akış hızı iyi kalitede filmler elde etmek için optimize edilmelidir.

Alttaban yüzey sıcaklığı büyüme öncüllerinin yüzey tutulma ve yüzeyden salınma kinetiklerini, yüzey difüzyonunu ve katılımlarını doğrudan etkileyen bir rol oynar.

Yüksek sıcaklıktaki alttabanlar SiH_x ad atomlarına büyük miktarda enerji sağlar. Dolayısıyla ad atom hareket yetenekleri artar. Fazladan hareket yeteneği ile ad atomlar alttaban yüzeyine difüz eder ve enerjik olarak tercih edilen (en düşük serbest enerjili nokta) konumlara yerleşirler. Ancak daha yüksek sıcaklıklar hidrojenin yüzeyden kaçması sonucunu doğurur. Bu büyük miktarda kopuk bağ oluşmasına neden olur ki bu yüzeyin tutma sabitini arttırarak adatomların yüzey mobilitesinin düşmesine neden olur. Araştırmalar optimum alttaban sıcaklığının ince film büyümesi için $200\text{ }^\circ\text{C}$ - $300\text{ }^\circ\text{C}$ aralığında olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.8 Malzeme özelliklerinin alttaban sıcaklığına bağımlılığı

Biriktirme basıncı gaz moleküllerinin ortalama serbest yollarını dolayısıyla çarpışma olasılığını belirler. Ayrıca Silan kısmi basıncını ve plazmadaki gaz partiküllerinin kalış sürelerini kontrol eder. Yüksek biriktirme basıncı plazma potansiyelini azaltarak alt tabana çakılan iyonların enerjilerini azalmasına neden olur.

Silan konsantrasyonu (Silan hidrojen akış oranı $[\text{SiH}_4]/[\text{H}_2]$) plazmadaki hidrojen miktarı ile büyüme hızına doğrudan etki eder. Bu sayede amorf ile mikro ya da nano kristal büyümeye geçişi kolayca kontrol etmek için bir araç olarak kullanılır

2.3.2 Katkılama

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun katkılaması kristal silisyumun katkılamasına benzer şekilde belli miktarlarda safsızlık atomlarının eklenmesiyle yapılır. Böylece elektriksel iletkenliğin türü ve büyüklüğü değiştirilebilir. (n)-tipi katkılama için fosfor, P-tipi katkılama için boron atomları kullanılır. Boron ile katkılama için Diboran, B_2H_6 , fosfor için Fosfin, PH_3 gaz fazında SiH_4 ile karıştırılarak kullanılır. Amorf silisyumun boron ve fosfor ile katkılanabileceğini ilk olarak 1975 yılında Dundee Üniversitesinden LeComber ve Spear gerçekleştirmiştir [20], [21]. Bir verici ya da alıcı gibi elektriksel olarak aktif olabilmesi için katkı atomu a-Si:H örütüne dört katlı koordinasyon konumunda girmelidir. Genelde c-Si daki boron ya da fosfor bu şekilde yapıya girerken, amorf silisyumun rastgele yapısı katkıları başka düzenlenişlere de konumlandırabilir. Buna ek olarak yapıda bulunan hidrojen katkı atomlarını pasifleştirerek elektriksel olarak inaktif hale getirebilir. Bunun sonucu olarak oldukça düşük katkılama verimi ortaya çıkar. Katkılı a-Si:H'un kusur yoğunluğu katkısız (intrinsic) a-Si:H'dan 2 ya da 3 mertebe daha büyüktür. Katkılı a-Si:H'daki yük taşıyıcılarının difüzyon uzunlukları tek kristal silisyumunkinden çok daha kısadır. Büyüyen filmin yapısına bir katkı atomunun dahil olma olasılığı gaz fazı katkı konsantrasyonuna bağlıdır.

2.4 Güneş pilleri

Güneş pillerinin çalışma prensipleri fotovoltaj etkiye dayanır. Fotovoltaj etki belli maddelerin ışığa maruz kaldığında elektrik akımı üretmesi olayına denir ve ilk olarak 1839 yılında Becquerel tarafından gözlenmiştir. Güneş pillerinde gerçekleşen fotovoltaj enerji dönüşümü olayı temel olarak iki adımdan oluşur. Önce ışığın yutulması bir-elektron-delik çifti oluşturur. Sonra bu elektron ve delik çifti aygıtın yapısından dolayı elektronlar negatif terminale delikler de pozitif terminale olacak şekilde ayrılırlar. Böylece elektrik gücü üretilir [25].

2.4.1 Kristal Silisyum Güneş Pilleri

Genellikle tek kristal ya da çoklu kristal p ya da n tipi katkılı ince silisyum alttabanlar kullanılarak üretilirler. Eklemler, alttabanların yüzeyinden belli bir sıklıkta alttaban ile zıt n ya da p tipi katkılı bir yaygıç tabakası ile oluşturularak elde edilir. Alttaban yüzeyi

tekstüre edilerek ışığı tuzaklama özelliği arttırılır. Kimyasal ya da kuru temizlik işleminden sonra yüzey yeniden birleşmelerini azaltmak amacı ile yüzeyin üzeri yeteri kadar kalın (6nm 15 nm) yüksek kalitede termal oksitler kaplanarak pasive edilir. Tek ya da çoklu kristal silisyum güneş pillerinde yüzey pasivasyonu için PEVCD tekniği ile ince bir oksit tabakası ile birlikte SiNx film tabakasının kullanımı yaygındır [25].

İnce alttabanlar kullanıldığında arka yüzeyde yeniden birleşme olayı önem kazandığı için, pillerin arka yüzey pasivasyonu önem kazanır. Arka Yüzey Alanı tekniği ile pasivasyon kullanılan yöntemlerden biridir. Bu tekniğe göre arka yüzeyin ekran baskı tekniği kullanılarak alüminyum pasta ile kaplandıktan sonra 577°C sıcaklığa kadar ısıtılması ile önce eriyik Al-Si bölgesi oluşturularak birçok safsızlığın yutulduğu bir bölge oluşturulur. Sonrasında ise soğutma işlemi uygulanarak silisyum Al'un eriyebilirlik sınırındaki sıcaklıkta yeniden kristalleştirilir ve p+ Arka Yüzey Alanı (BSF) tabakası olarak adlandırılan tabaka oluşturulur [25].

Genel olarak güneş pillerinde ön kontakların oluşturulması en önemli işlem adımlarından biridir. Uygulanan metalizasyon yöntemi gelen ışığın gölgelenmesini ve seri direnç kayıplarını, yaygıç difüzyon profilini, yüzey katkılama konsantrasyonunu ve kullanılacak yüzey pasivasyon tekniğini belirler. Yüksek verimli geniş yüzey güneş pillerinde düşük seri dirençli ve küçük yüzey alanı kaplayan elektrotlar kullanılır [25].

2.4.2 İnce Silisyum Güneş Pilleri

İnce silisyum güneş pilleri esas olarak silisyumun farklı formlarının (tek kristal, çok kristalli, mikro kristal, amorf ve gözenekli) kullanıldığı geniş çeşitlilikte fotovoltaik aygıt yapılarını tanımlayan kapsayıcı bir terimdir. Çok genel olarak pasif bir destekleyici alttaban üzerinde oluşturulmuş 100 µm'den ince aktif silisyum tabaka ya da film yapısındaki güneş pilleri olarak tanımlansalar da farklı yaklaşımlar ve teknolojiler halen geliştirilmekte olup, Bergmann [23], [26] tarafından kullanışlı bir sınıflandırması şu şekilde yapılmıştır:

- 1- ince film amorf silisyum güneş pillerinde kullanılan teknolojilerden uyarlanan teknikler ile küçük tanecikli (<1 mikron) nano kristal ya da mikro kristal silisyum filmlerin (2-3 µm kalınlığında) cam alttabanlar üzerine biriktirilmesi ile üretilen

ince film güneş pilleri. Bu tür güneş pilleri bazen amorf silisyum tabakaları ile birleştirilerek heteroeklem ya da tandem pil yapısında üretilirler.

- 2- Kalın silisyum tabakalarının (30 µm), milimetre boyutlarında taneciklere sahip olması için yeniden kristalleştirmeye uygun alttabanlar üzerine biriktirilmesi ile elde edilirler. Bu sınıfa silisyum alt tabanlı epitaksiyel silisyum güneş pilleri de dahildir.
- 3- Bir cam üst tabana bağlanmış ince bir silisyum alttaban üzerine büyütülmüş epitaksiyel tek kristal silisyum filmler ile oluşturulur. Silisyum alttaban sonra kaldırma tekniği ile yapıdan çıkarılarak film cam üst taban üzerine transfer edilir

2.5 PV Performans Ölçümleri

Bir PV hücrenin ya da modülün performansı ile ilgili olarak en önemli parametre en yüksek güç noktası P_{max} 'tır. Bu değer test edilen aygıt aydınlatılırken değişen bir ileri yönlü bias gerilimi uygulandığında ölçülen gerilim ve akım değerleri kullanılarak çizilen aydınlık I-V eğrisi ile belirlenir. P_{max} parametresi, aygıtın üzerine düşen toplam ve tayfsal ışınımın, ışınımın uzaysal ve zamana bağlı değişiminin, aygıtın sıcaklığının fonksiyonu olduğu gibi gerilim tarama hızı ve yönünün bir fonksiyonu da olabilir [25].

Başka bir önemli parametre çıkan gücün giren güce bölümü olarak tanımlanan, güç dönüştürme verimidir. Güç dönüştürme verimi, P_{max} , toplam gelen ışınım G ve aygıt yüzey alanı ile orantılıdır ve $\eta: P_{max}/AG$ olarak ifade edilir. PV performansının doğru olarak belirlenmesi potansiyel ölçüm problemlerinin bilinmesini ve bu problemlerin test edilen aygıt ile nasıl etkilendiğinin bilinmesini gerektirir [25].

Karasal uygulamalar için referans tayfsal ışınımın tanımlanması, atmosferin güneş ışığının üzerindeki etkiler nedeniyle güçlükler içerir. Bu etkiler ışığın atmosferde kat ettiği yol uzunluğunun fonksiyonudur. Atmosferik yol "Görelî optiksel yol uzunluğu" olarak tanımlanan ve genellikle air mass (AM) olarak adlandırılan yöntem ile tanımlanır. Air mass solar başucu açısının sekant'ıdır. Dolayısıyla AM1 güneşin tam tepede olduğu konumu belirtirken AM1.41 45° lik bir başucu açısını belirtir. Referans tayf ASTM G173-03 standardında tanımlanmıştır [25].

Standart tayfsal ışınımlar aşağıdaki şekilde görülmektedir. Bu ışınım değerleri tam olarak laboratuvar ortamında üretilmemekle beraber bu ışınım eğrilerine yaklaşık ışınımına sahip Xenon ark lambaları gibi ışık kaynaklarına sahip güneş benzetici ve referans güneş pilleri kullanılarak aygıt testleri için ihtiyaç duyulan toplam ışınım laboratuvar şartlarında belli bir hata ile oluşturulabilmektedir. Bu hataya uyumsuzluk hatası, M, denir ve referans güneş pili ile test edilen güneş pili arasındaki tayfsal cevap ve güneş benzetici ve standart spektrum arasındaki tayfsal ışınım farkından oluşur. Bu düzeltme faktörünün hesabı ve nasıl kullanılacağı IEC 60904-7 standardında belirtilmiştir [25].

Güneş ışığı altında kalibre edilmiş referans güneş pillerine birincil standart güneş pili, güneş benzetici kullanılarak kalibre edilmiş referans güneş pillerine ise ikincil referans güneş pili adı verilir. Birincil karasal kalibrasyonlar kararlı, açık gökyüzü koşulları gerektirir ve toplam ışınım mutlak kavite radyometresi ile ölçülür.

Güneş benzetici kullanılarak yapılan PV akım-gerilim ölçümleri blok şeması aşağıda görülmektedir. Aydınlatma altında test edilen aygıtın gerilimi bir dört-üçlü (Kelvin) bağlantı yapılarak ölçülür böylece ölçüm devresinde kabloların neden olduğu gerilim düşümü engellenmiş olur. Yük değiştirilerek test edilen aygıtın çalışma noktası değiştirilir. Böylece farklı gerilimlere karşılık akım değerleri elde edilerek bir I-V eğrisi oluşturulur. Genellikle bu ölçümler bilgisayar kontrollü yapılır [25].

Birbirlerinden boyut ve çıkış değeri olarak çok farklı güneş pili ve modülü testlerinde kullanılacak bir I-V ölçüm sistemi akım ve gerilim ölçümü için farklı ölçüm bölgesi seçeneklerine sahip cihazlar kullanılır.

Testlerde kullanılan güneş benzetici, doğal güneş ışığı gibi ışık kaynakları, uzaysal değişebilirlik (non-uniformity), zamana bağlı kararsızlık, tayfsal ışınımında kayma ve bir aydınlatma süresine sahiptirler. Dış ortamda güneş ışığı kullanılan ölçümlerde genelde test düzlemi üzerinde değişmez aydınlanma ve birkaç dakikaya varan kararlı ışınım elde edilebilir. Xe uzun-ark flaş güneş benzeticilerde de iyi uzamsal değişmezlik elde edilir ancak bu lambaların ölçüm süreleri 1-20 ms arasındadır. Diğer flaş benzeticiler sürekli çakan kaynak kullanır ve her bir çakmada I-V eğrisinde bir nokta ölçülür. Daha uzun ölçüm sürelerine sahip benzeticiler tipik olarak daha kötü uzamsal değişmezliğe

sahiptir. Testlerde kullanılan güneş benzeticilerin sahip olması gereken performans özellikleri ilgili uluslararası standartlarla belirlenmiştir (IEC 60904-9 ve ASTM E927 gibi).

Aydınlatma altındaki PV aygıtın I-V eğrisi sıcaklıkla değiştiğinden sıcaklık performans ölçümlerinde dikkate alınması gereken parametrelerden biridir. Karakteristik olarak I_{sc} sıcaklıkla az değişirken, V_{oc} ve P_{max} artan sıcaklıkla çok hızlı bir azalma gösterir. Bu güçlü sıcaklık bağımlılıkları nedeniyle testler sabit sıcaklık noktalarında yapılır.

2.5.1 Hata kaynakları

Güneş pilleri ışığı elektrığe dönüştürdükleri için radyometri PV metrolojisi için önemli bir konudur. Radyometrik cihazlar ve detektörler %5'lere varan toplam hatalara sahip olduklarından radyometrik ölçümler PV performans ölçümlerine büyük ölçüm hatalarına neden olabilirler [25].

Gerilim Bias hızı ve yönü test edilen örnekler histerik davranış gösterebildiklerinden ileri ve ters yönlü bias iki farklı FF değeri ölçülmesine neden olur. Özellikle kapasitif yükler histerisiz hatalarının görülmesini engeller. Yüzey alanı ölçümleri, sıcaklık ölçümleri ve kontaklar ile bağlantılar ölçüm sonuçlarını etkileyen diğer unsurlardır. Amorf Silisyum modüllerde FF gelen tayfsal ışınım bağımlılık gösterdiğinden açık havada yapılan performans ölçümlerinin sonuçlarını etkiler [25].

2.5.2 Diyagnostik Ölçümler

Karanlık I-V ve tayfsal cevap (ya da kuantum verimlilik) ölçümleri PV aygıtların yapısal özelliklerini tanımlanmasında yaygın olarak kullanılırlar. Karanlık I-V bir aygıtın bir p-n eklem olarak nasıl çalıştığını ve seri direnç, şönt direnci ve diyot kalite faktörünü belirlemek için kullanılır [25].

Tayfsal cevap güneş pillerinin temel özelliğidir ve yansıma gibi optik kayıplar hakkında bilgi sağladığı gibi taşıyıcı yeniden birleşmelerinin anlaşılmasına yardımcı olur.

2.5.3 Yeterlilik Testleri

Ticari olarak üretilen PV modüllerin 20-30 yıl güvenli olarak kullanılabilmesi genel bir beklentidir. Bu beklentinin karşılanabilmesi için PV modüller bazı testleri geçmek

zorundadır. Bu testler hem gerçek zamanlı hem de hızlandırılmış olarak gerçekleştirilir. Kalite testleri olarak gerçekleştirilen testler hızlandırılmış testlerdir. International Electrotechnical Commission (IEC), Teknik Komite 82 (TC-82) tarafından c-Si modüllerin yeterlilikleri ile ilgili testler IEC 61215 standardında tanımlanmıştır. UV ve açık hava ışığa maruz kaldıklarında ışık etkisi ile oluşan bozulma nedeniyle IEC 61215 a-Si modüllerin testlerinde hangi mekanizmanın performans kaybına neden olduğunu belirlenemez. Bu nedenle a-Si modüller için ayrı bir standart olan IEC 61646 kullanılır [25].

2.6 Silisyum Heteroeklem Güneş Pilleri

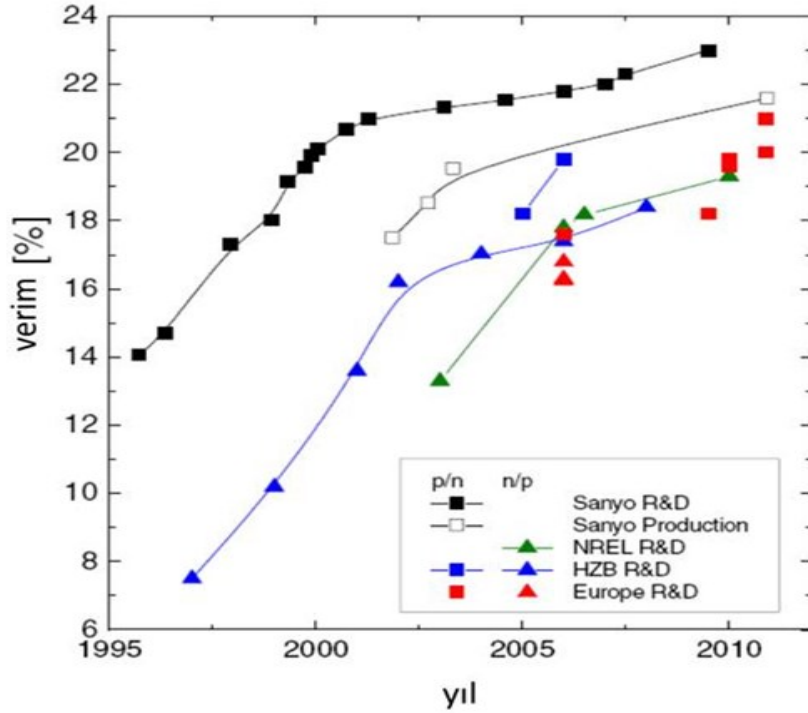
Heteroeklemler 1950'lerin sonlarına doğru ortaya çıkan ve farklı iki yarıiletkeni birleştirilmesi ile oluşturulan aygıtlardır. Bu yarıiletkenler farklı enerji bant aralığına ve ancak birbirleriyle benzer örgü sabitlerine sahip yarıiletkenlerden seçilir. 1970'lerin başlarından itibaren farklı heteroeklem aygıt uygulamaları giderek artmıştır. Silisyum heteroeklemi kullanılarak güneş pilleri yapımı ile ilgili ilk makale, 1974'te Marburg üniversitesinde Walther Fuhs ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır [27]. a-Si:H/c-Si güneş pillerinde ara yüzeylerin oluşturulması katkılı tabakaların oluşturulması birçok faktörden etkilenir. Kullanılan c-Si alttabanın yüzey temizliği ve hazırlanması, plazma büyütme sürecinde gaz fazı etkileşimleri [28] ve farklı büyütme teknikleri, yüzey morfolojisini, pürüzlülüğünü, reaktivite ve yüzey kompozisyonu gibi yapısal kaliteyi belirler. Bu faktörler optik bant aralığı, aktivasyon enerjisi, bant ofset değeri, bant bükülmesi, film ve ara yüzey kusurlarını etkiler.

Silisyum heteroeklem güneş pilleri 200 µm kalınlığında silisyum alttabanın her iki yüzeyine, düşük sıcaklıklarda büyütülen çok ince amorf silisyum tabakalarla oluşturulan yaygıç ve geri yüzey etkisi (Back Surface Field – BSF) ile gün ışınımı ile birbirlerinden ayrılan elektron-delik çiftlerine dayanır. Düşük sıcaklıklarda a-Si:H'nin büyütülmesi bir yandan ısı işlemlerle ilgili bütçenin azalmasına ve üretim hızının artmasına neden olduğundan ticari olarak düşük üretim maliyetlerine sahiptir.

Geçen on yılı aşkın süreçte a-Si:H/c-Si heteroeklemlerden yüksek verimli hücreler elde edebilmek için alternatif yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunların arasında, katkısız tampon bölgesinin kaldırılması, yaygıç ve BSF'deki katkı seviyelerinin azaltılması, p-türü c-Si

üzerinde veya a-Si:H tabakasının a-Si:H/ μ c-Si:H yığınlar, a-SiOx:H ya da a-SiC:H ile değiştirilmesi örnek olarak gösterilebilir.

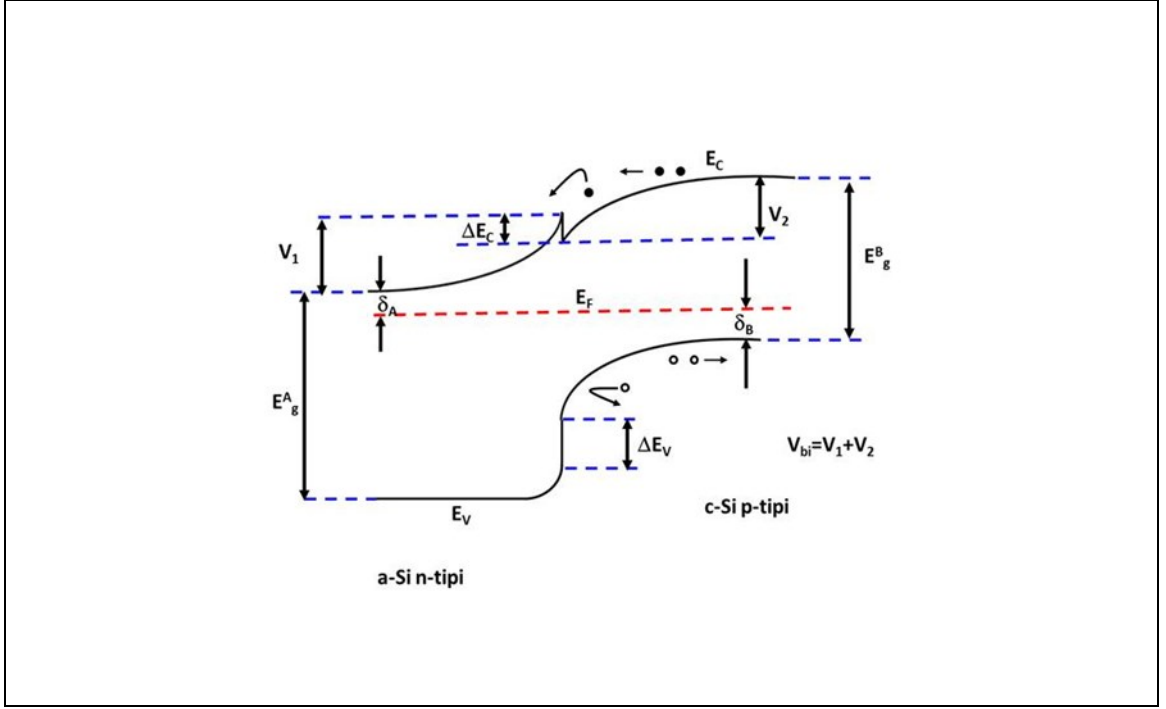
Yapılan çalışmalar sonucunda zaman içinde güneş pili verimliliğinde artma gözlenmiştir. Şekil 2.9'da zaman içerisindeki gelişme görülmektedir. Hem (n) a-Si:H/ (p) c-Si ve hem de Sanyo tarafından geliştirilen (p) a-Si:H/ (n) c-Si güneş pillerine yer verilmiştir. Her iki tür katkılı güneş pilleri arasındaki farklılık belirgindir ve taşıyıcı mobiliteleri ve bant ofsetlerinden kaynaklanmaktadır. Farklı olarak, NREL tarafından n-türü alttabanlar üzerinde %18.2 ve p-türü alttabanlar üzerinde %19.3 ($V_{oc}=678mV$) elde edilmiştir [29]. Avrupa'da en yüksek verim İsviçreli Roth&Rau firmasının EPFL Neuchatel ile ortak yaptığı çalışma sonucunda %21 verime, $100cm^2$ alan üzerinde ise %19.6 verime 718 mV açık devre gerilimi ile ulaşılmıştır [30]. Son yıllarda, Sanyo (Panasonic) $100 \mu m$ 'den ince silisyum alttabanlar kullanılarak %23'ten daha yüksek verimlere çıkmanın mümkün olduğunu göstermiştir [31].



Şekil 2.9 Heteroeklem güneş pillerinin verimliliklerinin gelişimi

2.7 (n)a-Si:H/ (p)c-Si Heteroeklem ara yüzey

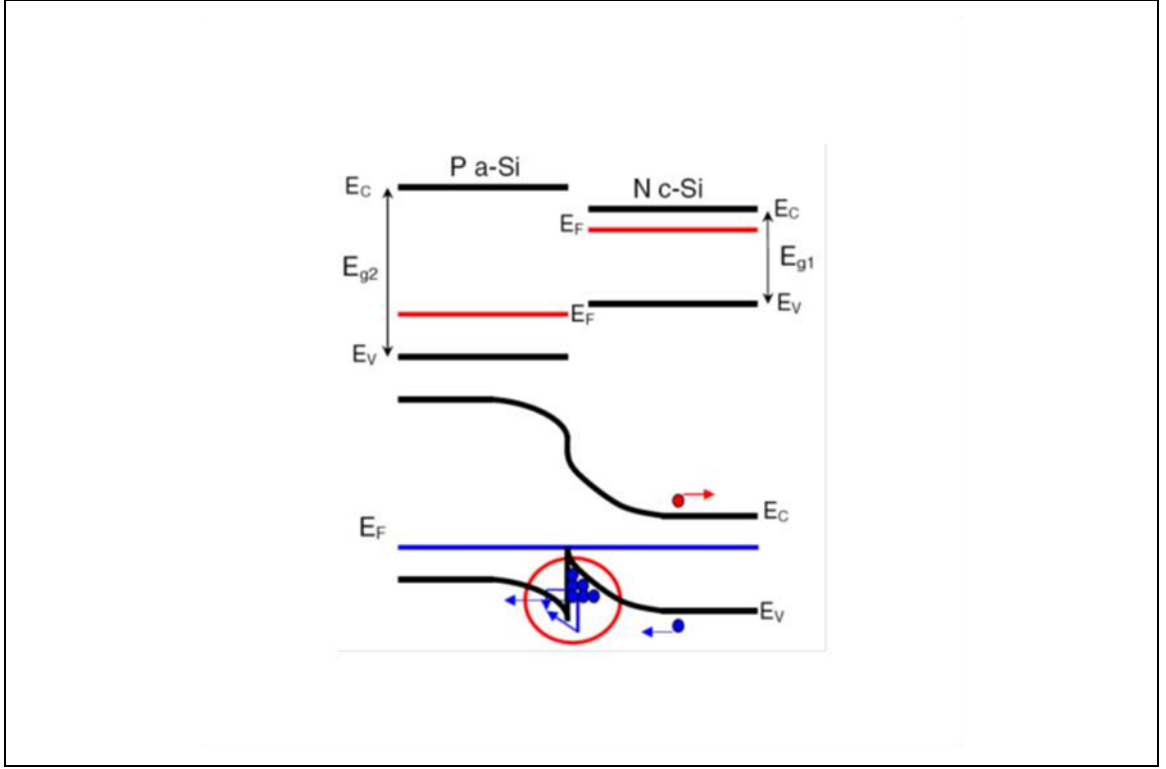
Aşağıdaki şekil 2.10'da (n) a-Si:H/(p) c-Si heteroeklem ara yüzeyin bant şeması görülmektedir.



Şekil 2.10 (n) a-Si:H/(p) c-Si heteroeklem ara yüzeyin bant şeması

Ara yüzeyde iletim bandındaki ya da değerlik bandındaki n bant ofsetleri yük taşıyıcılarının taşınmaları için bariyerler oluşturabilirler. n-türü ve p-türü yarıiletkenlerin elektronik bant yapıları arasındaki asimetri fotovoltaik enerji dönüşümünün temel nedenidir. Sadece yeterli kinetik enerjiye sahip taşıyıcılar bu tür bariyerleri aşabilir. Bu bariyerler elektronlar ve deşikler için farklı biçim ve büyüklüklerde olabilirler. Karanlık şartlarda ve ileri yönlü gerilim uygulandığında elektronlar n-tipinden p-tipine enjekte edildiklerinde ΔE_c iletim bandı süreksizliğine ilaveten bant bükümünü aşmak zorundayken ters yönde akan deşikler sadece bant bükümünü aşarlar. Bariyerin yapısı malzemelerin katkılama seviyelerine (N_A ve N_D) ve elektron ilgilerine (χ_1 ve χ_2) bağımlılık gösterir.

1.1eV bant aralığına sahip n-türü c-Si ile 1.7eV bant aralığına sahip p-türü a-Si:H kullanılarak oluşturulan heteroeklem güneş pilinin enerji bant diyagramı Şekil 2.11'de verilmiştir. Deşikler için değerlik bandında ofset olduğu görülmektedir. Deşikler bu dar enerji çıkıntısının diğer tarafına tuzak destekli tünelleme ya da termoiyonik yayılım yolu ile taşınabilirler.



Şekil 2.11 (p) a-Si:H/(n) c-Si heteroeklem ara yüzeyin bant şeması

Genel olarak, bir güneş pili üzerine düşün fotonların soğurularak elektron-deşik çiftlerinin üretilmesine olanak sağlayan bir soğurucu tabaka içerir. Birçok taşınım özelliği ara yüzeydeki elektronik bant profili tarafından kontrol edilir ve a-Si:H/c-Si heteroeklemlerde temel problem yük taşıyıcılarının ara yüzeyde yeniden birleşmeleridir. Elektron (EFC) ve deşikler (EFV) için sözde Fermi enerji düzeyleri (Quasi Fermi Energy Level) güneş pilinin aydınlanma durumunu açıklamak için kullanılır. İki sözde enerji düzeyi arasındaki enerji farkı ışınım enerjisinin kimyasal enerjiye dönüşüm verimini açıklamak için kullanılır. Eğer ara yüzeyde yüksek oranda yeniden birleşme gerçekleşiyorsa sözde Fermi enerji düzeyleri arasındaki fark büyük oranda azalır ve açık devre gerilimi V_{OC} azalır.

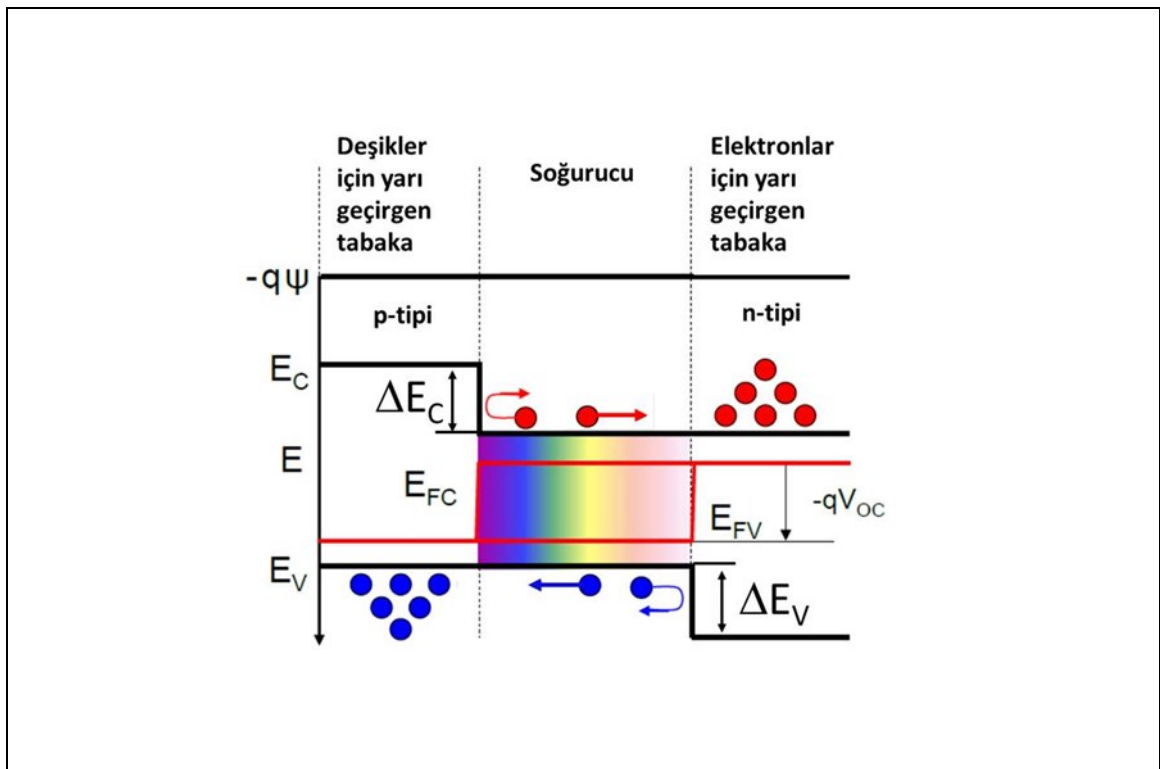
Yeniden birleşim hızını etkileyen en önemli neden hetero-ara yüzey'deki kusur yoğunluklarıdır. Katkılı a-Si:H'nun kusur yoğunluğu katkılama ile artar ve bu a-Si:H/c-Si eklemindeki arayüzey kusurlarının artmasına neden olur [32], [33], [34], [35], [36], [37].

Kristal silisyum soğurucu yüzeyindeki organik, inorganik kirlilikler, yüzeydeki testere kesiminde kaynaklanan hasarlar gibi kusurlar doğrudan kimyasal işleme (wafer'ın yüzeyinin HF ile kaldırılması) ve/veya dolaylı olarak kristal silisyum soğurucu ile amorf

katkılı tabaka arasına içinde daha az kusur yoğunluğu olması nedeniyle ince katkısız a-Si:H tabaka büyütülerek azaltılabilir. Katkısız tabakanın iletkenliği düşük olduğu için seri direnci düşük olması için olabildiğince ince olması gerekir [38], [39], [40], [41].

Elektron ve deşiklerin bir birlerinden ayırabilmek için soğuran tabakanın her iki tarafına yarı-geçirgen katmanların yerleştirilmesi gereklidir [42]. Yarı-geçirgen katmanların sadece bir tür taşıyıcının geçmesine izin verecek özelliklerde olması gerekmektedir. Verimli bir güneş pili tasarlarken önemli olan soğuran tabaka içerisinde yaratılan elektron-deşik çiftinin yarı-geçirgen katmanlara ulaşabilmesidir. Bu ancak, soğuran tabakanın kalınlığının foto taşıyıcıların difüzyon uzunluğundan düşük olması ile mümkündür.

Alt ve üst elektrotları membranlar üzerinde büyütülmüş, yarı-geçirgen membranlara sahip, aydınlatılmış ideal güneş piline ait bant yapısı Şekil 2.12’de gösterilmiştir.

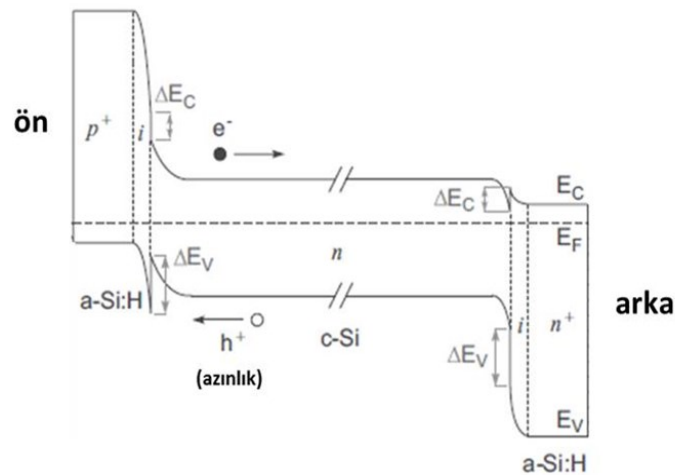


Şekil 2.12 Yarı-geçirgen membranlara sahip, aydınlatılmış ideal güneş piline ait bant yapısı

n-türü heteroeklem güneş pillerinde, deşiklerin soğuran tabakadan n-türü silisyum alt tabana enjeksiyonunu engellemek için değerlik bandında bir enerji bariyeri oluşturulmalıdır (ΔE_V). İdeal olarak bu işlem daha geniş bant aralıklı n-türü bir yarı

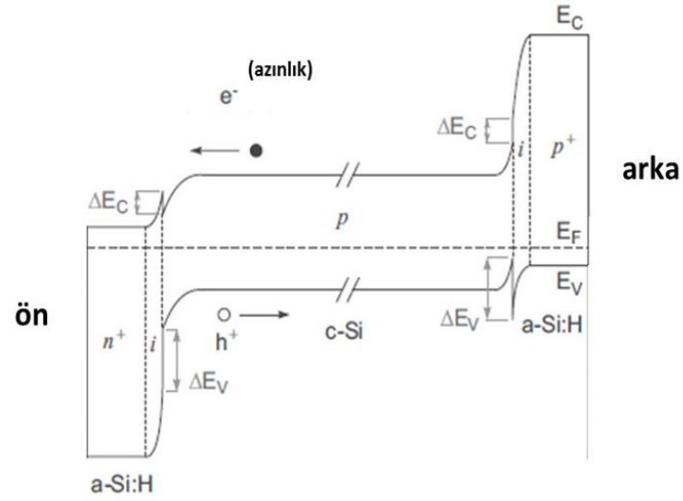
iletken seçilerek gerçekleştirilebilir. Benzer şekilde, p-türü heteroeklem (HE) güneş pilinde soğuran tabakadan p-türü yarıiletken taşıyıcı enjeksiyonunu engellemek için iletkenlik bandı kenarında bir enerji bariyeri oluşturulmalıdır (ΔE_C). İletkenlik bandında bant ofsetlerinin bulunması p-türü yarıiletkende elektron ilgisinin (χ_e) soğuran tabakaya göre daha küçük olması anlamına gelir. Daha geniş bant aralığına sahip membran malzemelerini kullanmanın bir diğer avantajı ise güneş tayfının daha geniş bir aralığının soğurma tabakasına geçirilmesidir.

Şekil 2.13'te verilen n-türü heteroeklemde büyük değerlik bandı ofseti azınlık taşıyıcı olan deşikleri tuzaklanarak etkin foto iletimlerini engeller. Sadece termoyonik yayınımla bu taşıyıcıların etkin iletiminin sağlanması mümkün değildir. Diğer yandan deşikler tuzak veya ısı uyarımı ile p-türü a-Si:H'a iletilebilir. Güneş pillerinin arka yüzeyinde daha büyük değerlik bandı ofseti ve daha kalın katkısız tabaka deşikler için bir ayna etkisi gösterir. Arka yüzeydeki bu (i/n) katmanlar iletkenlik bandında önemli bir değişime neden olmadığından elektron iletimini etkilemezler. Böylece arka kontak çoğunluk taşıyıcı elektronların iletimini kolaylaştırırken, azınlık taşıyıcı deşikler için ayna etkisi oluşturmaktadır.



Şekil 2.13 Silisyum alttabanın her iki tarafına katkısız a-Si:H büyütülerek oluşturulan çift taraflı, a-Si:H/c-Si heteroeklem n-tipi güneş pilinin enerji bant yapısı.

Şekil 2.14'te verilen p-türü heteroeklemede azınlık taşıyıcı elektron iletkenlik bandında sadece küçük bir bant ofseti ile tutulmaktadır. Bu şekilde azınlık taşıyıcı tuzaklaması n-türünden daha az etkindir. Arka yüzde ise elektronlar için daha zayıf bir ayna etkisi bulunmaktadır. Daha da kötüsü, arka yüzde çoğunluk taşıyıcı deşikler için daha büyük bir bariyer yer almaktadır. Bu enerji bariyerini etkisi etkin yüzey pasivasyonu ve tünellemeyi arttırmak için daha ince katkısız tabaka kullanılması gibi yöntemlerle azaltılmadığı sürece güneş pilinin verimi düşük olacaktır. Bu nedenle n-türü heteroeklemler p-türü heteroeklemlere göre daha avantajlıdır. Bununla beraber iki türde de 720 mV'un üzerinde %21 verime ulaşılacağı görülmüştür [39].



Şekil 2.14 Silisyum alttabanın her iki tarafına katkısız a-Si:H büyütülerek oluşturulan çift taraflı, a-Si:H/c-Si heteroeklem p-tipi güneş pilinin enerji bant yapısı.

DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş pillerinin PECVD tekniği kullanılarak üretilme süreci, yapısal, elektriksel ve optiksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler ve elde edilen pillerin performansını belirlemekte kullanılan karakterizasyon yöntemleri anlatılmıştır.

Kimyasal ve plazma temizlik yöntemleri kullanılarak temizlenen p-tipi katkı tek tarafı parlatılmış c-Si alttabanlar kullanılarak farklı biriktirme sürelerinde ve katkılama oranlarında:

(n)a-Si:H/(i)a-Si:H/(p)c-Si,

(n)a-Si:H/(i)a-SiO_x:H/(p)c-Si,

(n)a-SiO_x:H/(i)a-SiOX:H/(p)c-Si,

(n)a-SiOX:H/(i)a-SiOX:H/(p)c-Si ve

(n)a-SiOX:H/(i)a-SiOX:H/(p)c-Si/(i)a-SiOX:H/(p)a-Si:H

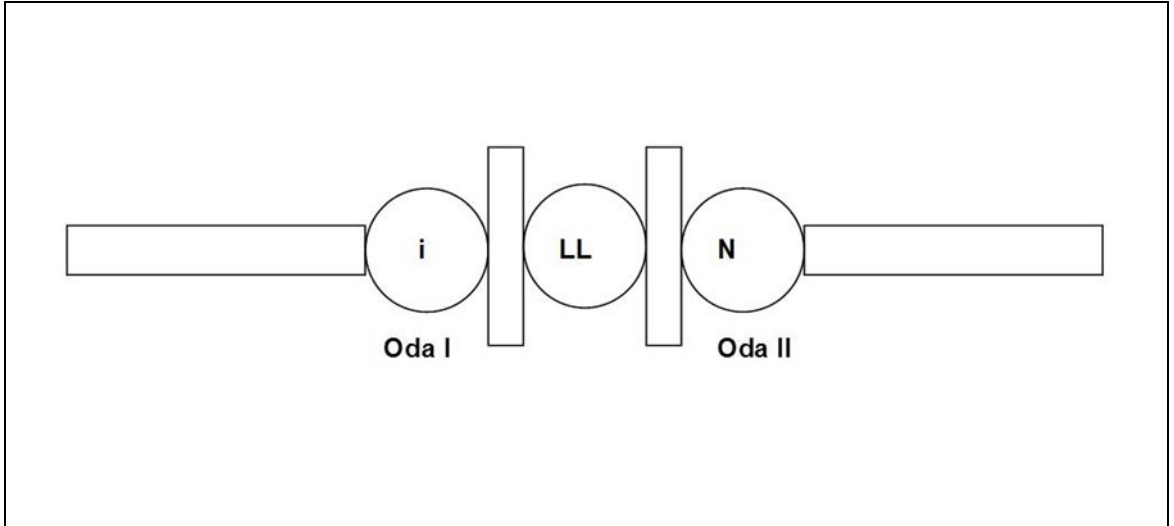
örnekleri Plazma Destekli Kimyasal Buharlaştırma (PECVD) yöntemi kullanılarak hazırlandı. Bazı örneklerin ön taraflarına metal kontaklar atılmadan önce RF kopartma tekniği ile TCO (ITO) kaplanmıştır. Örneklerin ön ve arka kontaktarı ısı buharlaştırma tekniği ile Al ve Ag kullanılarak atıldı ve 150°C-300°C arasında değişen sıcaklıklarda atmosfer ortamında tavlama işlemi uygulandı. Tüm örneklerin iç kuantum verimlilikleri ile tavlama öncesi ve sonrası I-V ölçümleri alındı. Bazı örneklerin elektro lüminesans ölçümleri yapılmıştır.

3.1 Örneklerin hazırlanması

Çalışmamızda katkısız ve katkılı a-Si:H örnekleri TÜBİTAK-UME’de bulunan üç vakum odalı ultra yüksek vakumlu 13.56 MHz RF frekanslı PECVD sisteminde plazma hazırlanmıştır Yapısal analizler için kullanılan örnekler Corning 7059 ve Corning 1737 cam alttabanlar üzerinde büyütülmüştür. Güneş pilleri öz dirençleri 1-10 Ohm.cm ve <1 Ohm.cm olan, (100) yönelimli, 3” ve 100 mm çapında, bir tarafı parlatılmış, CZ silisyum p tipi katkılı alttabanlar kullanılmıştır.

3.1.1 PECVD Sistemi

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) filmler, üç vakum odası bulunan, ultra yüksek vakum, küme PECVD sisteminde, 13.56 MHz RF frekansında büyütülmüştür (şekil 3. 1).

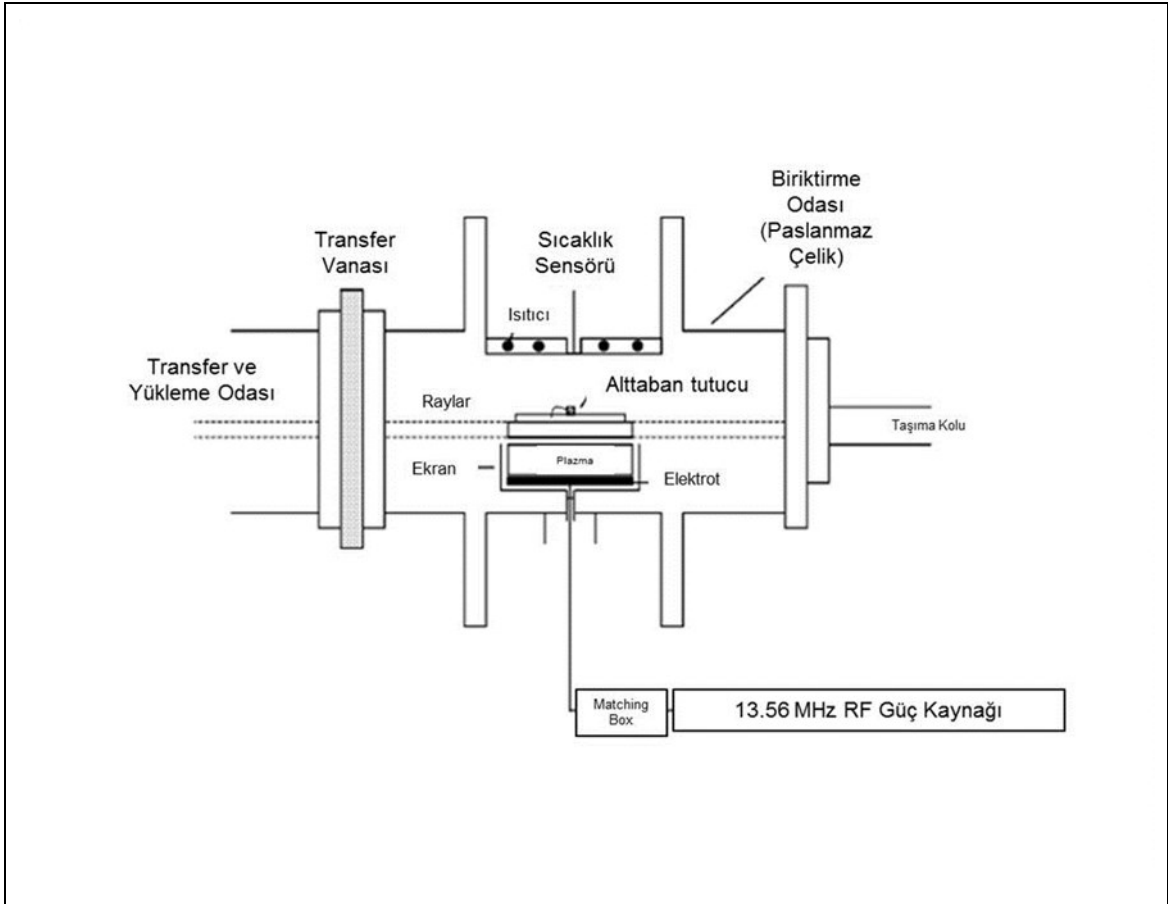


Şekil 3.1 PECVD sistemi

PECVD sistemi, reaktörler, proses gaz akışı kontrolcülerini, turbo moleküler ve mekanik vakum pompaları, ısıtıcılar ve bunların işleyişlerini kontrol etmek için kullanılan elektronik ve/veya mekanik kontrolcülerini içerir.

Bir PECVD sisteminin kalbi şekil 3.2’de şeması verilen reaktördür. Reaktör, bir gaz girişi, alttabanın tutturulduğu biriktirme odası, bir pompalama sistemi ve deşarj için bir güç kaynağından oluşur.

Çoğu plazma reaktöründe olduğu gibi çalışmamızda kullanılan PECVD reaktörleri plazmanın iki paralel elektrot arasında oluşturulduğu diyot yapısındadır. Paslanmaz çelikten üretilmiş biriktirme odası ve alttaban tutucu anot görevi görürler ve toprağa birlikte bağlı olmaları gerekir.



Şekil 3.2 PECVD reaktörü

Farklı tür katkılı filmlerin farklı reaktörlerde biriktirilmesi, karşılıklı kirlenme olasılığını azaltması birden fazla reaktöre sahip bir PECVD sisteminin önemli bir avantajıdır [43]. Reaktörlerin birbirlerine bir yükleme odası ile bağlanması sayesinde de, biriktirilen filmlerin hava ile temas etmeden biriktirme odaları arasındaki yüksek vakum şartlarında taşınması mümkün olmaktadır. Biriktirme odası Plazmanın sürekliliğini sağlayabilmek için 10^{-9} Torr mertebesinde vakum değerlerine turbo moleküler ve mekanik pompa ile ulaşılabilir.

Gerekli vakum seviyesine ulaşıldıktan sonra istenilen gaz karışımları kütle akış kontrol üniteleri yardımıyla biriktirme odasına gaz besleme hattından verilir. Plazma çakıldıktan

sonra biriktirme odasındaki gaz basıncının sabit kalması kelebek vanalar sayesinde sağlanır.

Plazma değişken bir yük gibi davranır. Bu tür plazmalara kapasitif olarak bağlaşıklık plazma denir. RF güç kaynağı ile plazma arasındaki empedans uyumunu sağlayarak güç aktarımını optimize edilmesi gerekir. Bu yüzden sistemde değeri RF güç kaynağı tarafından kontrol edilen ayarlanabilir elektronik yükler (matching box-uyumlama kutusu) mevcuttur.

PECVD sisteminde kullanılan gazların birçoğu zehirli, patlayıcı, parlayıcı ve tahriş edici özelliklere sahip olduğundan biriktirme odası çıkışlarında bulunan atık hattından pompalar yardımıyla gaz yıkama sistemine pompalanırlar. Kimyasal olarak çevreye zarar vermeyecek kadar güvenli hale gelen atık gaz asal gazlarla seyreltilerek atmosfere bırakılır.

Bu karmaşık işlemler dizisinin yönetmek için bir programlanabilir bir ticari kontrol birimi kullanılmıştır.

3.1.2 Biriktirme Odası Temizliği

Biriktirme süresince sadece alttaban üzerinde değil biriktirme odasının duvarlarında, elektrotlarda ve benzer yüzeylerde de film oluşumu gerçekleşir. Çalışmamızda biriktirme odalarının yüzeyinde birikmiş olan bu film katmanları NF_3 gaz plazması ile aşındırma yöntemi kullanılarak belli aralıklarla temizlenmiştir. NF_3 ya da SF_6 gibi gazların plazmaları geride kirlilik yapan artıklar bırakmadıkları için yaygın olarak kullanılırlar [44]. Ayrıca her NF_3 plazması ile aşındırma sonrası 15 dakikalık SiH_4 plazma ile ön biriktirme uygulanarak biriktirme odasının pasivasyonu yapılmıştır

3.1.3 c-Si Alttaban Temizliği

Eklemler, a-Si:H/c-Si ara yüzeylerinde oluştuklarından alttaban yüzeyinin, organik, inorganik, metalik ve oksit kirlilikler ile kusurlardan arındırılmış olması, bunların neden olduğu arayüzey kusurlarına engel olarak yüksek performanslı aygıtlar elde edilmesinde önemli rol oynar [45].

Film büyütülen yüzeylerin temizliğinin ve pasivasyonunun kalitesi kullanılan temizlik yöntemine bağımlılık gösterir. Alttaban yüzey temizliği yöntemleri temel olarak yaş kimyasal [46], [47], [48], [49], [50], [51] ve kuru temizlik [52], [53] prosedürleri olarak kategorize edilebilirler.

3.1.3.1 Yaş Kimyasal Temizlik Yöntemleri

Güneş pili üretiminde alttaban yüzeyi hazırlamak için kullanılan yöntemlerden biri olan yaş kimyasal yöntem, temel olarak üç nedenle kullanılır: (i) c-Si külçelerin ince dilimler halinde kesilmesi ile elde edilen alttaban yüzeylerindeki testere hasarının giderilmesi, (ii) doku oluşturmak ve (iii) birbirini takip eden pasivasyon ve/veya p/n eklem ve kontak oluşturma işlemleri için yüzey iyileştirilmesi [54].

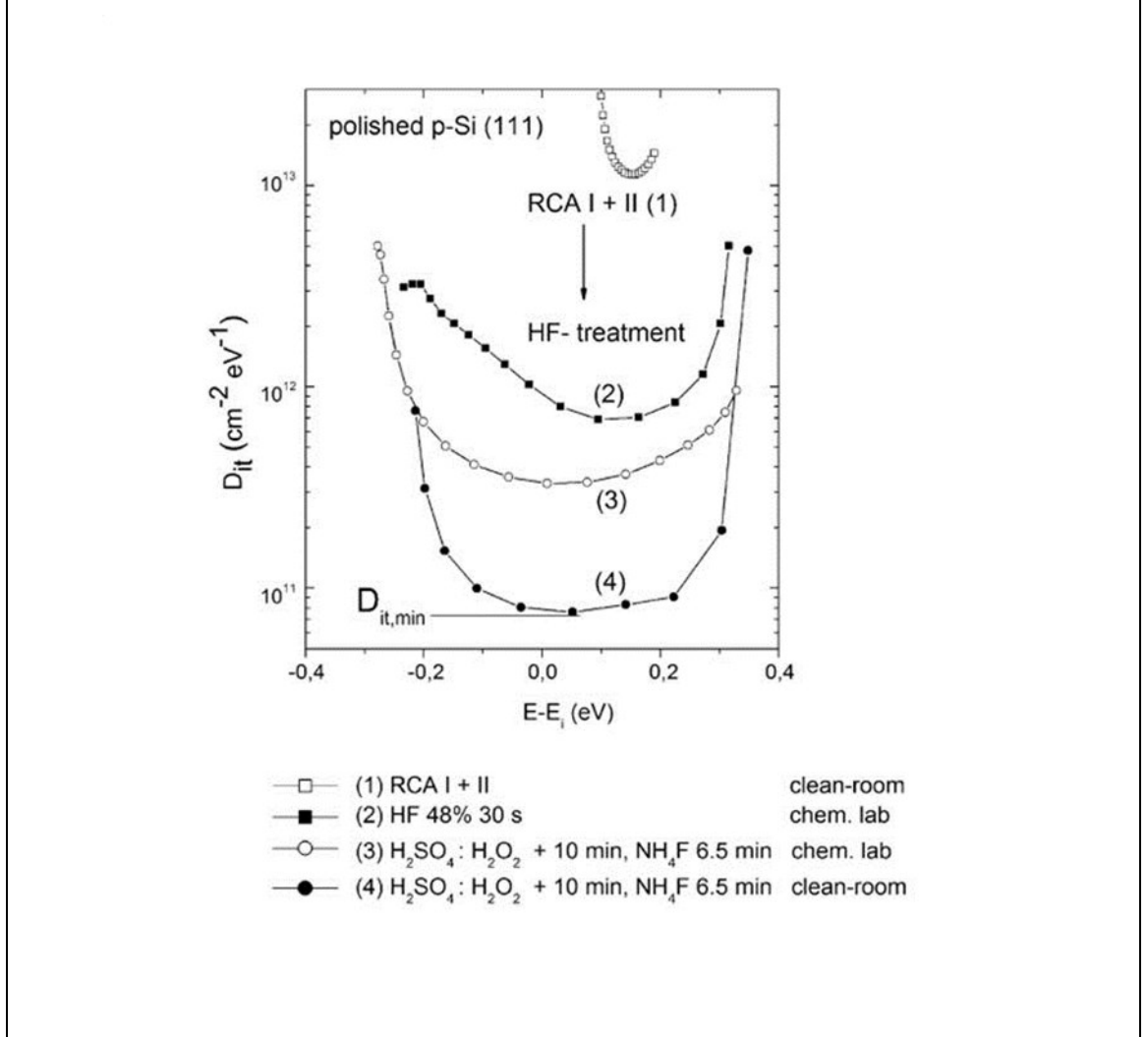
Silisyum alttabanların yaş kimyasal temizleme işlemi, elde edilen nihai yüzey durumuna göre: yüzey pasivasyonunun (i) hidrofobik yüzey elde edilen H-sonlandırma ile ya da (ii) hidrofilik yüzey elde edilen ince yaş kimyasal oksit tabakaları serilerek gerçekleştirildiği iki sınıfa ayrılır. Silisyum güneş pillerine hangi yüzey şartının uygulanacağı büyük oranda aygıtın yapısına ve yüzeye biriktirilecek tabakanın türüne bağlıdır [54].

Çalışmamızın başında özellikle PECVD parametrelerinin belirlenmesi aşamasında pahalı ve uzun süren temizlik prosedürü yerine daha ucuz kimyasallarla ve daha kısa sürede gerçekleştirilen bir yöntem tercih ettik. K1 adını verdiğimiz bu yöntemde göre alttabanlar kimya laboratuvarında sırası ile ultrasonik banyo içinde oda sıcaklığında:

- 10 dakika asetona daldırma
- 1 dakika de iyonize su ile durulama
- 10 dakika izo propil alkole daldırma
- 1 dakika de iyonize su ile durulama
- 10 saniye süre ile % 5 seyreltilmiş HF aside daldırma
- 1 dakika de iyonize su ile durulama

Uygulanarak temizlendi.

Literatürde teknolojik uygulamalarda elektronik yüzey kalitesinin bir göstergesi olarak kullanılan arayüzey durumlarının enerji dağılımındaki minimum değerin $D_{it,min}(E)$, standart RCA (Radio Company of America) yöntemine ek olarak, alttaban üzerine oksitleyiciler ile oksit tabaka serilmesi ve ardından bu tabakanın HF ya da NH_4F asit ile kaldırılması ile elde edilebileceği sonucunu elde etmiştir [55] (şekil 3.3).



Şekil 3.3 p-türü Si(111) yönelimli yüzey için Yüzey Foto Gerilim eğrileri: RCA I ve II işlemi (1), takiben HF-içeren çözeltilerle aşındırma (2), ve standart H-sonlandırması laboratuvar şartlarında (3) ve temiz oda şartlarında (4) [55].

Standart RCA işlemleri özetle aşağıdaki tabloda verilmiştir:

Çizelge 3.1 RCA Kimyasal temizlik

Çözelti	İçerik	Safsızlık
RCAI	H ₂ O:NH ₄ OH:H ₂ O ₂	Tanecikler, organik malzemeler ve metaller
HF dip.	HF:H ₂ O	Doğal oksit
RCAII	H ₂ O:HCl:H ₂ O ₂	Atomlar ve iyonlar

Bu bilgiler doğrultusunda çalışmamızın devamında yaş kimyasal ön temizliğin güneş pilinin yapısına olan etkisini çalışmak amacıyla:

1-RCA (Radio Company of America) yöntemi ile temizlik ve doğal oksit tabakayı kaldırmak için seyreltilmiş HF'e daldırma [56].

2-Alttabanların RCA temizliği sonrasında üzerlerine kimyasal yöntemle oksit tabakası büyütülmesi ve oksit tabakayı kaldırmak için seyreltilmiş HF'e daldırma [56] olarak iki farklı yaş kimyasal temizlik prosedürü uygulanmıştır. K2 adını verdiğimiz bu yöntemle göre kristal Si(100) alttabanları temiz oda ortamında:

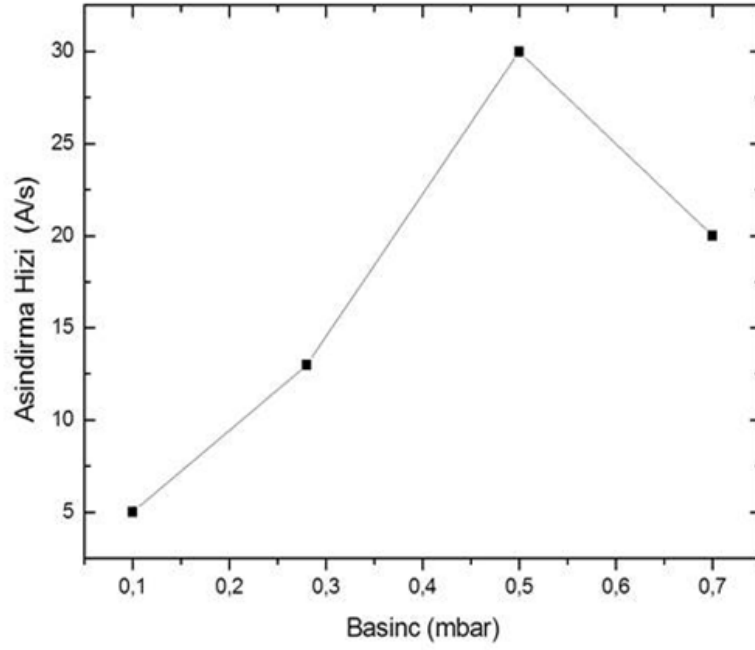
- Standart RCA temizliği
 - 1 dakika de iyonize su ile durulama
 - 10 dakika H₂SO₄:H₂O₂ (1:1) çözeltisine daldırma ile yaş kimyasal oksitleme
 - 1 dakika de iyonize su ile durulama
 - Oksit tabakayı kaldırmak için 60 saniye % 1 seyreltilmiş HF aside daldırma
 - 1 dakika de iyonize su ile durulama
- uygulanarak temizlendi.

3.1.3.2 Kuru Temizlik Yöntemleri

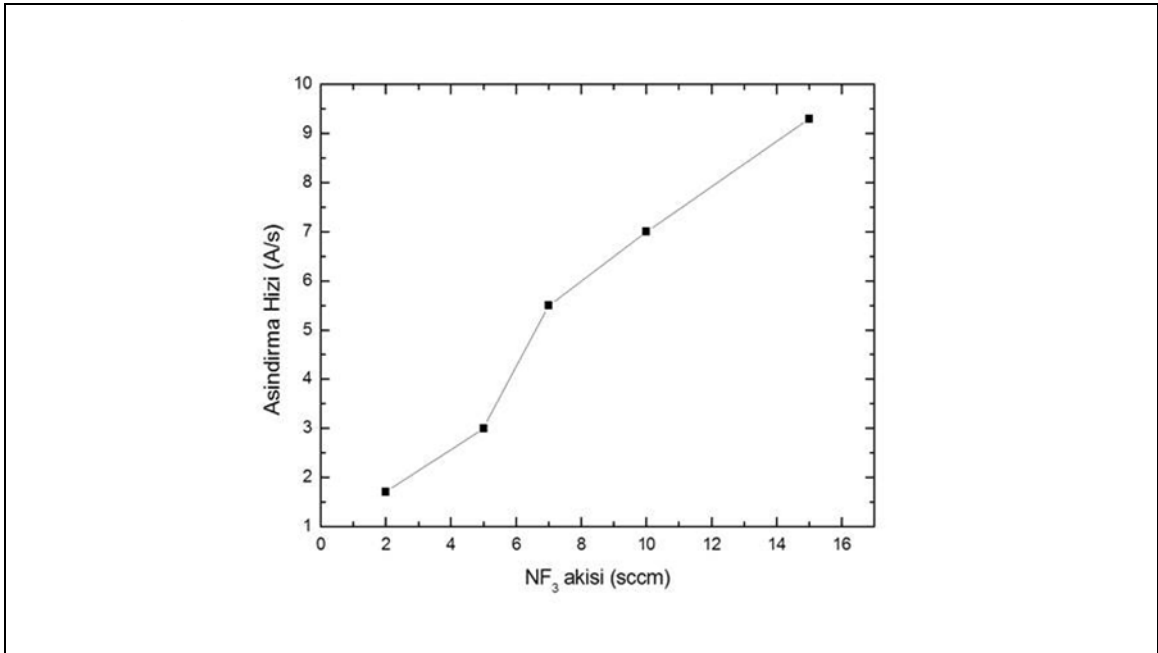
Daha ekonomik olduğu için güneş pil üretiminde plazma temizliği büyük miktarlarda kimyasal madde sarf edilen yaş kimyasal yöntemlere tercih edilebilmektedir.

Alttaban yüzeyinin plazma ile temizliğinde H_2 , CF_4/O_2 ve NF_3 gazları yaygın olarak kullanıla gelmiştir [57]. Diğer gazlardan farklı olarak, NF_3 artık bırakmadığı için tercih edilen bir gazdır Ancak plazma temizliği kristal alttaban yüzeyini aşındırdığı için yapıya zarar verebilmektedir.

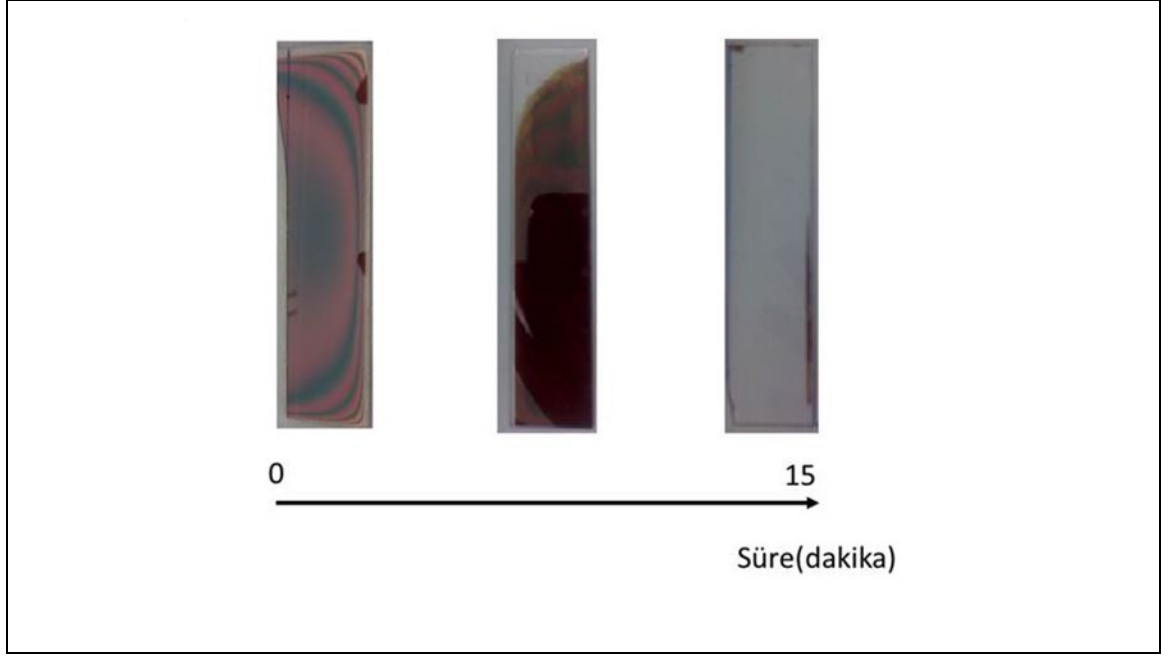
Uygun NF_3 plazma parametrelerinin belirlenmesi için yaklaşık $1\mu m$ kalınlığında filmler cam alttabanlar üzerinde büyütüldü ve oluşturulan NF_3/Ar plazması ile film kalınlığındaki azalma profil metre ölçümleri ile incelendi. NF_3 plazması kararlı olmadığından, gaz 15:1 oranında Ar gazı ile seyreltilmiştir. a-Si:H film aşındırma hızının vakum odası basıncı ile değişimi Şekil 3.4'te ve gaz akış hızı ile değişimi Şekil 3.5'te gösterilmektedir. RF gücünün, 20 W üzerinde aşındırma hızını değiştirmediği görülmüştür. Böylece aşındırma plazma koşulları (P1) vakum odası basıncı 0.5 mbar, RF gücü 40 W, gaz akışı 40 sccm olarak belirlenmiştir. Belirlenen parametreler hem vakum odalarının temizliğinde ve c-Si alttabanların temizliğinde kullanılmıştır. Bu şekilde, cam alttaban üzerinde bulunan $1\mu m$ kalınlığında a-Si:H film 15 dk. içerisinde temizlenebilmektedir (şekil 3.6).



Şekil 3.4 Corning 1737F cam üzerine 225 °C'de büyütülen filmin NF_3 aşındırma hızının vakum odası basıncı ile değişimi



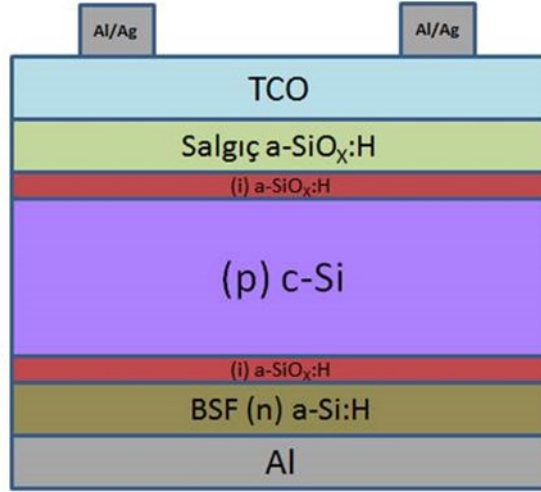
Şekil 3.5 Corning 1737F cam üzerine 225 °C'de büyütülen filmin NF_3 aşındırma hızının NF_3 akışı ile değişimi



Şekil 3.6 NF_3 aşındırma etkisinin zamanla değişimi

3.1.4 Filmlerin Büyütülmesi

Bu tez çalışmasında şekil 3.7’de verilen yapıdaki güneş pili çalışılmıştır. Alttaban olarak CZ <100> yönelimli p-türü katkı c-Si alttabanlar kullanıldı. Alttabanın her iki yüzeyinde pasivasyon amacı ile ince bir $a-SiO_x:H$ tabakası kullanıldı. Bu tabaka yük taşıyıcılarının taşınmasına imkân verebilecek kadar ince olmak zorundadır. Genel olarak pilin ön yüzüne c-Si alttabanın ters türünde katkı ve emiter (salgıç) tabakası adı verilen bir ince $a-Si:H$ film büyütülür. Emiter (Salgıç) tabakası pilde bir pn eklemi oluşturur. Bu pn eklemi c-Si alttabanda $a-Si:H/c-Si$ ara yüzeyine yakın bir bant eğilmesi yaratarak yük ayırımına imkân verir. Bu çalışmada emiter tabakası olarak $a-SiO_x:H$ tabakası büyüttük. Pilin arka yüzeyinde ise c-Si alttaban ile aynı türde katkı ince bir $a-Si:H$ film büyütüldü. Bu tabaka arka yüzey alanını (BSF) oluşturur. Bu tabakanın esas amacı azınlık taşıyıcılarını arka yüzeyden uzaklaştırmak ve böylece c-Si alttabanın arka tarafındaki yeniden-birleşme kayıplarını daha fazla azaltmaktır. Katkı ve katkısız $a-Si:H$ tabakalarında Bundan sonra salgıç (emiter) tabakasının üzerine hem yansımayı önleme hem de iletkenliği arttırarak seri direnç kayıplarını azaltmak amacı ile yaklaşık TCO film büyütüldü. Son olarak ön ve arka kontaklar atılarak pil yapısı tamamlandı.



Şekil 3.7 Heteroeklem güneş pili yapısı

Filmler, 12 mW/cm^2 RF güç yoğunluğunda; $190 \text{ }^\circ\text{C}$ - $225 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta; 0.8 Torr basınçta büyütüldü. (i) tabakası için 10 sccm SiH_4 , 4-40 sccm CO_2 ve hidrojenle 1/10 oranında seyreltme uygulandı. (n) türü katkıli tabakalar için 40 sccm SiH_4 , 20 sccm PH_3 , 0-24 sccm CO_2 , (p) tabakası için 40 sccm SiH_4 , 67 sccm B_2H_6 gaz karışımları kullanıldı.



Şekil 3.8 UME'de temiz odasında bir görünüm. Sol tarafta PECVD, sağ ileride TCO ve metalizasyon kaplama sistemleri görülmektedir.

3.1.5 TCO Büyütme

Yapısında a-Si:H bulunan tüm güneş pilleri türlerinde Saydam İletken Oksit (TCO) tabakaları önemli bir rol oynar. Bu güneş pillerinde TCO tabakası yük taşıyıcı toplama verimliliği ve ışık tuzaklama için olduğu kadar iyi pencere özellikleri, başka bir deyişle optik saydamlık, için de önemlidir. Bu tür tabakaları üretmek için bir kaç malzeme ve büyütme tekniği kullanılabilir. En önemli malzemeler İndiyum Kalay Oksit (ITO) [58], [59], Alüminyum katkılı Çinko Oksit (ZnO:Al, AZO) [60], [61], [62] ve Boron katkılı Çinko Oksit (ZnO:B) dir [63]. ITO ve AZO için en önemli büyütme teknikleri RF ve DC magnetron kopartma tekniğidir. TCO tabakaları için güneş ışığı spektrumunun görünür ve yakın kızılötesi bölgesinde saydamlık (400-1100 nm için $T > 85\%$) ve yüksek iletkenlik ($\rho < 10^{-3} \Omega\text{cm}$) gereklidir. Verimli bir yansıma önleyici kaplama özelliği gösterebilmesi için kaplama kalınlığı 80 nm- 100 nm aralığında olması gerekir.

Bu bilgiler ışığında yaklaşık 80 nm kalınlıkta ZnO ve ZnO:Al filmler RF (13.56 MHz) magnetron kopartma tekniği kullanılarak oda sıcaklığında, 10⁻² torr baz basıncında, bir yüksek vakum buharlaştırma sisteminde büyütüldü.

3.1.6 Metal büyütme

Pilin ön tarafında kullanılacak olan elektrotların, seri direnci arttırmayacak ve gelen ışığı mümkün olduğunca az gölgeleyecek tasarıma sahip olması istenir [25]. Ön elektrotlar birbirlerine paralel 150 µm genişlikte finger'lar ve bunlara dik 1,9mm genişlikli 2 adet bus bar olacak şekilde paslanmaz çelik gölge maske kullanılarak büyütüldü. Pilin arka kontaklarında Al, ön kontaklarında ise Al/Ag alaşımı kullanıldı. Tüm kontaklar ısı buharlaştırma yöntemleri kullanılarak bir yüksek vakum buharlaştırma sisteminde büyütüldü

3.1.7 Büyütme sonrası tavlama

Tavlamanın güneş pillerinin performansına etkisini incelemek amacıyla uygulanan tavlama işlemi için sıcaklığı kontrol edilebilen bir sıcak tabla kullanıldı. Filmlerin tavlama ve takip eden soğuması sürecinde azot gazı kullanılmadı.

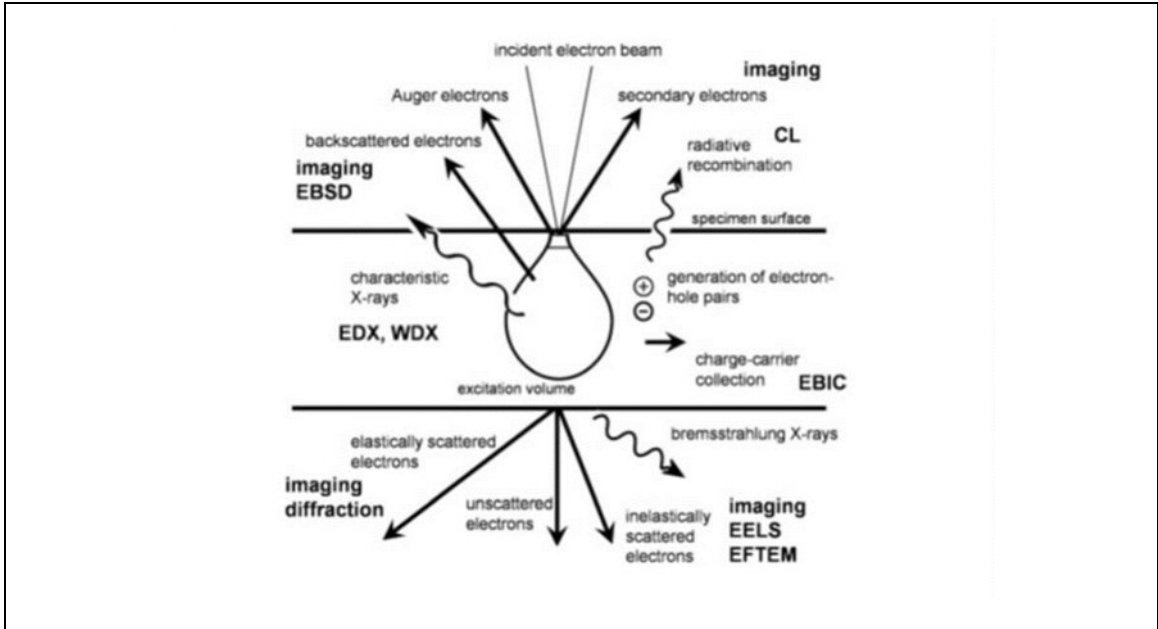
3.2 Film ve güneş pillerinin karakterizasyonu

Bu tez çalışmasında PECVD ile kaplanmış filmlerin mikro yapılarının belirlenmesi için Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM), Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron mikroskopisi (HR-TEM), Atomal Kuvvet Mikroskopisi (AFM), optiksel özelliklerinin belirlenmesi için Tayfsal Elipsometre (SE) yöntemleri, kullanıldı. Üretilen güneş pillerinin elektriksel ve optiksel ortamlara olan cevaplarının belirlenmesi için ise I-V ölçümleri, Elektrolüminesans ve Tayfsal Cevap Ölçümleri ile gerçekleştirildi

3.2.1 Film Karakterizasyonu

3.2.1.1 Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM)

İnce film güneş pillerinin görüntülenmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri SEM dir. Çözünürlüğü 1 nm'nin altında olan bu yöntem, bulk (hacimsel) güneş pilindeki ince film yığınlarının tabaka kalınlığı, yüzey topografyası ve başka diğer özelliklerinin anlaşılmasına yardımcı olur. Taramalı elektron mikroskopları genellikle bir enerji dağılımlı X-ışınli detektörlerle (EDX) donatılmış olup bu sayede ince filmlerdeki yerel temel özellikleri analiz için kullanılabilirler.

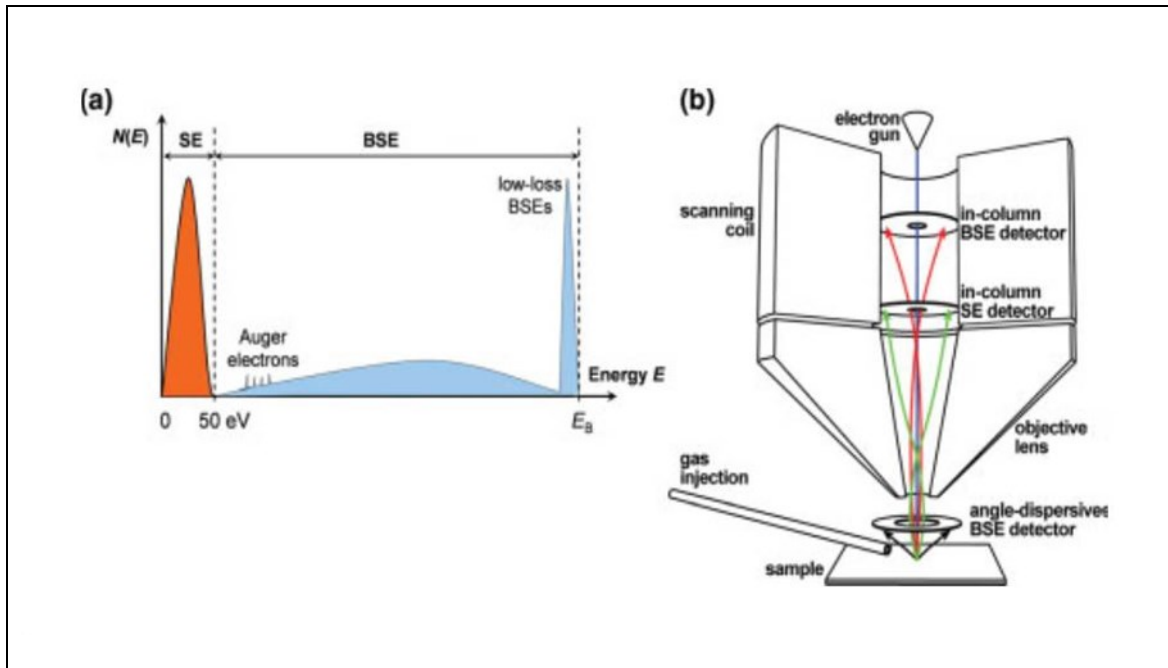


Şekil 3.9 Bir elektron demeti ile ışınlanan bir yarıiletken numunedeki çeşitli elektron ve foton salımları

SEM görüntüleme teknikleri genel olarak ikincil elektronların (SE) ve geri saçılan elektronların (BSEs) kullanıldığı iki türe ayrılır (şekil 3.9) Her iki teknikte farklı kontrastlı görüntüler sağladıklarından bileşim, mikro yapı ve yüzey potansiyelleri hakkında verdikleri bilgiler farklılık gösterir. Bu iki teknik ayrı ayrı kullanıldığı gibi birlikte de kullanılarak daha detaylı sonuçlar elde edilebilir.

Tüm SEM tekniklerinde gelen elektron demetinin enerjisi (E_b , hızlandırma gerilimi ile ayarlanır) ve elektron demeti akımı (I_B , termiyonik elektron tabancalarının filamanlarından akıtılan akım ile ayarlanır) özel öneme sahiptir. Elektron demeti enerjisi E_b numune malzemeye nüfuz derinliğini (R) belirler. Elektron demeti akımı I_B ise elektron demetindeki birim saniyedeki elektron sayısını dolayısıyla örneğe enjekte edilen elektron-enjeksiyon hızını etkiler.

Elektronlar bir dizi elektromanyetik merceklerle odaklanarak numune yüzeyindeki elektron probu çapını 1nm'nin altına indirir. Tarama bobinleri odaklanmış demeti örnek yüzeyi boyunca hareket ettirir [64].



Şekil 3.10 (a) Saçılmış Ses ve BSEs'lerin enerji dağılımı (b) Tipik bir taramalı elektron mikroskobunda elektron yörüngeleri

Genel kabule göre SEs 0-50 eV arasında enerjilerde, BSEs ise 50 eV ile birincil demet E_b enerjisi değerleri aralığında bir enerjidedir (şekil 3.10).

SEs'ler birkaç nanometre olan çıkış derinliğine sahip olduklarından ve de SE verimi numunenin yüzey eğimine bağlı olduğundan yüzey topografya görüntülemesi için kullanılırlar. Ayrıca yerel katkılama hakkında bilgi verirler.

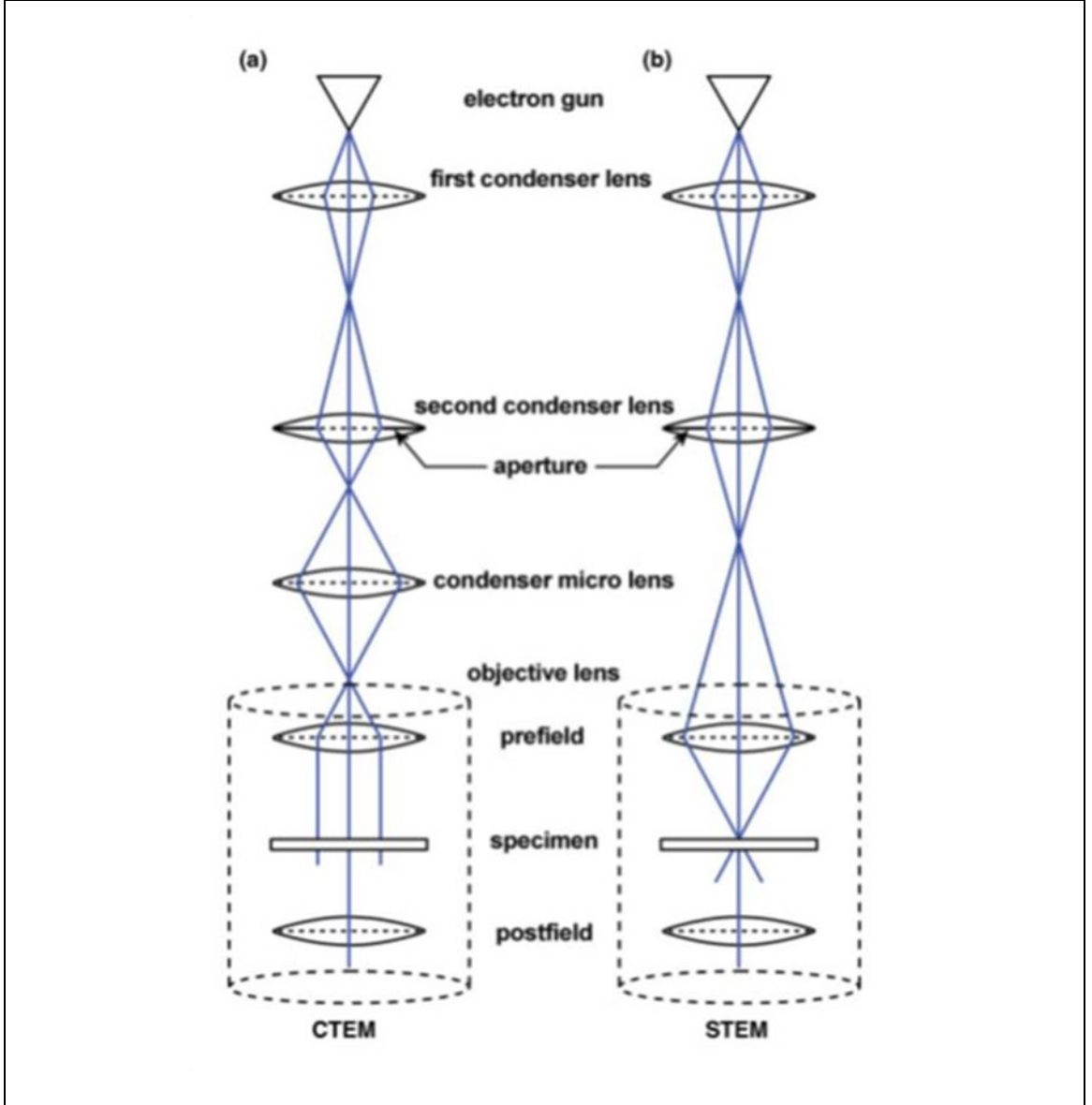
BSEs'ler ise ince filmlerin görüntülenmesi yanında atom düzlemlerinden kırılarak yansındıklarında kristal simetrisi ve yönelimi hakkında da bilgi sağlarlar.

Hazırladığımız örneklerin SEM ölçüm ve analizleri TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsünde gerçekleştirildi.

3.2.1.2 Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskopisi (HR-TEM)

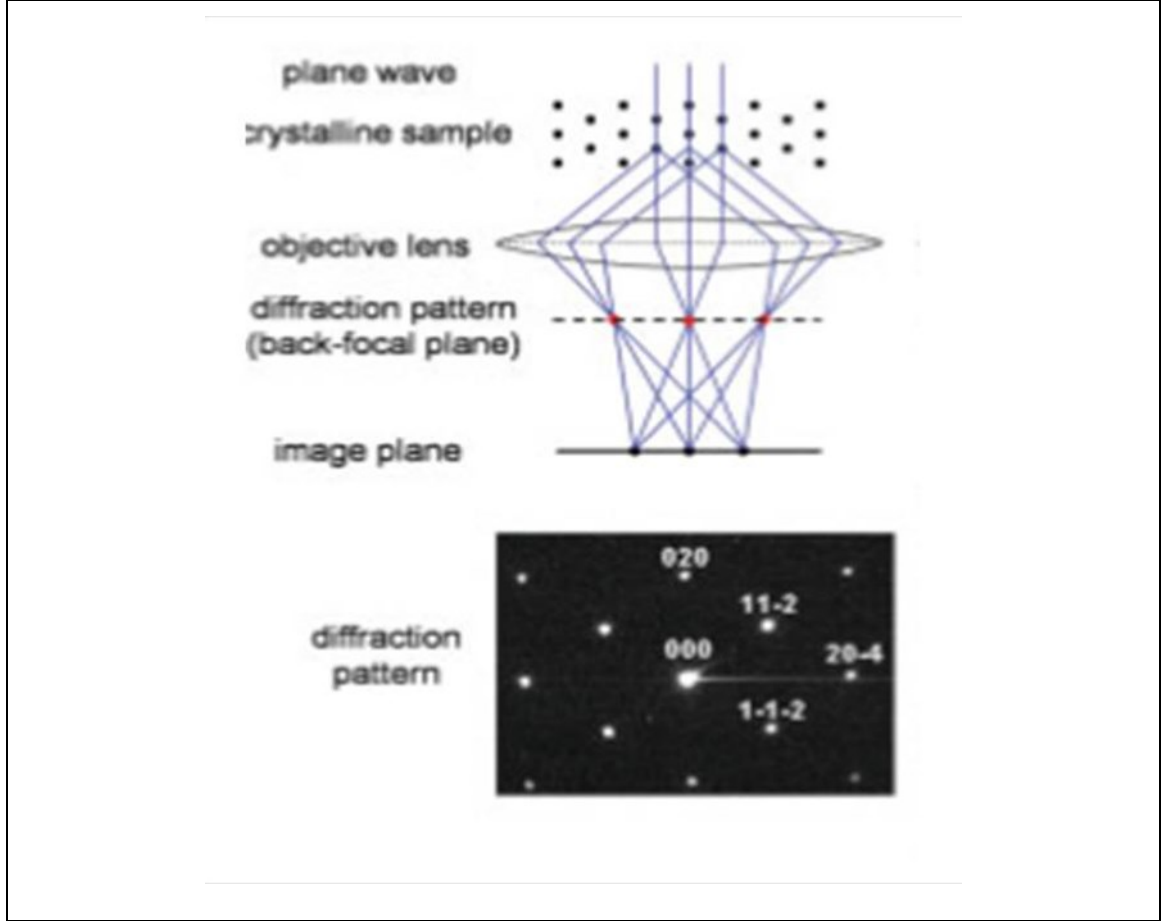
Geçirimli Elektron Mikroskop (TEM) ve ilişkili teknikler Angström mertebesinde görüntüleme ve analiz için uygun araçlardır. Özellikle tabakalar arasındaki ara yüzeylerin ya da tanecik sınırlarının özelliklerini ve başka nanometre(altı) ölçekteki özelliklerin çalışılmasına imkân verir.

TEM ta elektron demetini 80 keV ile 1200 keV aralığında enerjilerde hızlandırılan bir elektron tabancası bulunur. Elektronları örneğe çarptırma yöntemleri geleneksel (CTEM) ve taramalı TEM (STEM) modları olarak ayrılır (şekil 3.11) [65].



Şekil 3.11 (a) CTEM (b) STEM

Bir paralel elektron demeti bir kristal örnekten saçıldığında, elektronların bir kısmı atom düzlemlerinden kırınıma uğrar. Örneği geçen tüm elektronlar görüntü merceğinin (objective lens) arka odak düzleminde kırınım örütü oluşturur Şekil 3.12



Şekil 3.12 TEM Kırınım örütü

Projeksiyon mercekleri kullanılarak ya örneğin görüntüsü ya da kırınım örütü görüntü ekranında incelenebilir. HR-TEM görüntüleri ise atom örgüsünün doğrudan görüntüleri değil, doğrudan ya da kırınım uğramış demetlerin faz ilişkileri ile oluşan girişim desenleridir. Bu yüzden HR-TEM görüntüsü faz karşılığında (contrast) kaynaklanır. Görüntü çözünürlükleri 0.05 nm'ye kadar düşebilir [64].

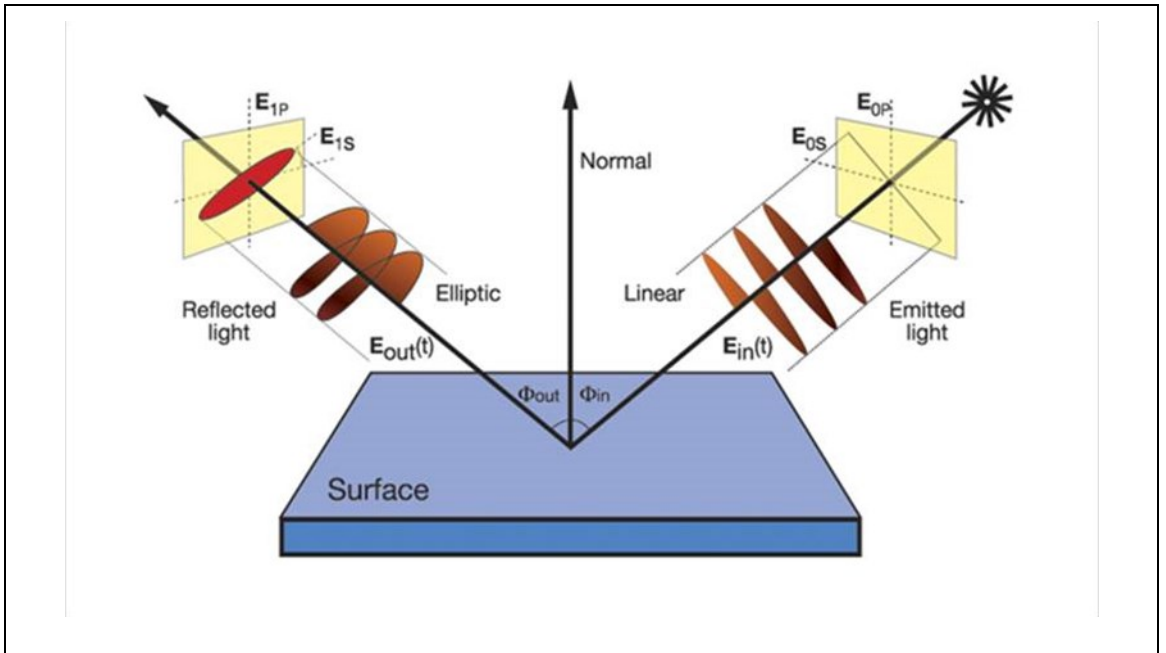
Hazırladığımız örneklerin HR-TEM ölçüm ve analizleri TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsünde gerçekleştirildi.

3.2.1.3 Tayfsal Elipsometre

Elipsometre yüzey ve ince film analizinde kullanılan optiksel bir yöntemdir. Işık demetinin malzeme yüzeyinden yansması ya da malzemenin içinden geçmesi nedeniyle polarizasyon durumundaki değişiminin ölçülmesine dayanır. Polarizasyon durumundaki değişimden film kalınlığı ve malzemenin optiksel özellikleri anlaşılabilir. Mikro elektronik, gösterge, optoelektronik, fotovoltaik, kimya, metalürji gibi geniş bir

uygulama alanı vardır. Elipsometre özellikle kalın alttabanlar, birkaç nanometreden birkaç on mikrometre kalınlığına kadar ince filmler ve hatta çoklu tabakalı yapıların görüldüğü yarıiletkenlerin karakterizasyonu için uygun bir yöntemdir. Ayrıca tahribatsız bir teknik olduğundan film büyüme sürecini gerçek zamanlı gözlemlemek için de uygundur.

Elipsometre ile ölçülen parametrelere elipsometrik açılar Ψ ve Δ adı verilir. Bu açılar kompleks Fresnel yansımaya sabitlerinin r_s ve r_p oranları ile ilişkilidir. Geliş düzlemine dik olarak polarize olmuş ışığın yansımaya katsayısı r_s , geliş düzlemine paralel olarak polarize olmuş ışığın yansımaya katsayısı r_p olarak temsil edilir (şekil 3.13).



Şekil 3.13 Gelen ve yansıyan ışıklar için elektrik alan bileşenleri

Elipsometrinin temel denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad (3.1)$$

Burada

$$\tan \Psi = \frac{|r_p|}{|r_s|} \quad 0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ \quad (3.2)$$

ve

$$\Delta = \delta_p - \delta_s \quad 0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ \quad (3.3)$$

Psi (Ψ) ve Delta (Δ) Şu Şekilde llr: IŞık fiber optik kablolar ile polarizre aktarılır. Polarizör gelen iŐıĝın örnek üzerine çarpmadan önceki polarizasyon durumunu belirler. Polarizasyon modlatr polarizasyon elipselliĝini zamanın fonksiyonu olarak deĝiŐtirerek polarizasyon durumunu deĝiŐtirir. Daha sonra yansayan iŐık demetinin polarizasyonu başka bir polarlayıcı analizör ile analiz edilir. Analizörden sonra iŐık monokromatör'e geçer ve tayfsal bölgeye göre UV ve görünür bölge için fotooklayıcılar, IR bölge için InGaAs detektörler tarafından algılanır. Detektör yansayan polarizasyonu belirlemek için iŐıĝı elektriksel iŐarete dönüŐtürür. rnekten yansıma sonucu oluşan polarizasyonu belirlemek için bu bilgi bilinen giriş polarizasyonu ile karŐılaŐtırılır.

Ölçülen Ψ ve Δ parametrelerinden uygun modelleme kullanılarak aŐaĝıdaki parametreler belirlenebilir:

- yakın UV, görünür ve yakın IR dalga boyu bölgelerinde optik katsayılar
- tek ya da çoklu tabaka kalınlıkları
- süperlatis yapısındaki tabakaların kalınlıkları
- yüzey ve arayüzey przllĝ
- anizotropi
- tek tabakalarda optik katsayıların deĝiŐimi

Elipsometre ile ölçülen Ψ ve Δ veriler, örnek parametrelerinin belirlenmesi için tayin edilen bir model kullanılarak iyi bilinen bir fiziksel dispersiyon denklemine yerleŐtirilir ve birbirleri ile en uyumlu deneysel veri ve hesaplanan veri setleri elde edilmeye çalıŐılır.

Tayfsal elipsometre özellikle kristallik ve yüzey przllĝ gibi malzeme özelliklerindeki deĝiŐimlere duyarlıdır. Yapısal deĝiŐim analizi için malzemenin denklem

(3.4) ile ifade edilen pseudo (görünür) dielektrik fonksiyonundaki dielektrik sabitinin sanal kısmının incelenmesi gerekir.

$$\langle \epsilon(\omega) \rangle = \sin^2 \theta_0 \left(1 + \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \tan^2 \theta_0 \right) = \langle \epsilon_1(\omega) \rangle + i \langle \epsilon_2(\omega) \rangle \quad (3.4)$$

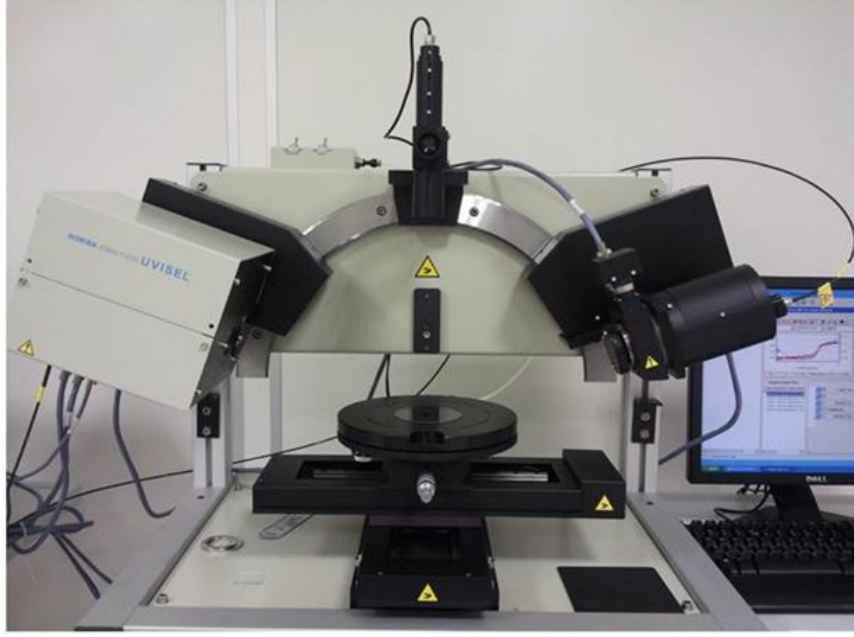
Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ince filmlerde malzemeyi analiz etmek için genellikle Tauc-Lorentz dispersiyon yasası kullanılır. Bu yaklaşıma göre dielektrik fonksiyonun sanal kısmı denklem (3.5) gibi tanımlanır:

$$\epsilon_2 = \begin{cases} \frac{AE_0C(E-E_g)^2}{E[(E^2-E_0^2)^2+C^2E^2]} & \text{eğer } E > E_g \\ 0 & \text{eğer } E \leq E_g \end{cases} \quad (3.5)$$

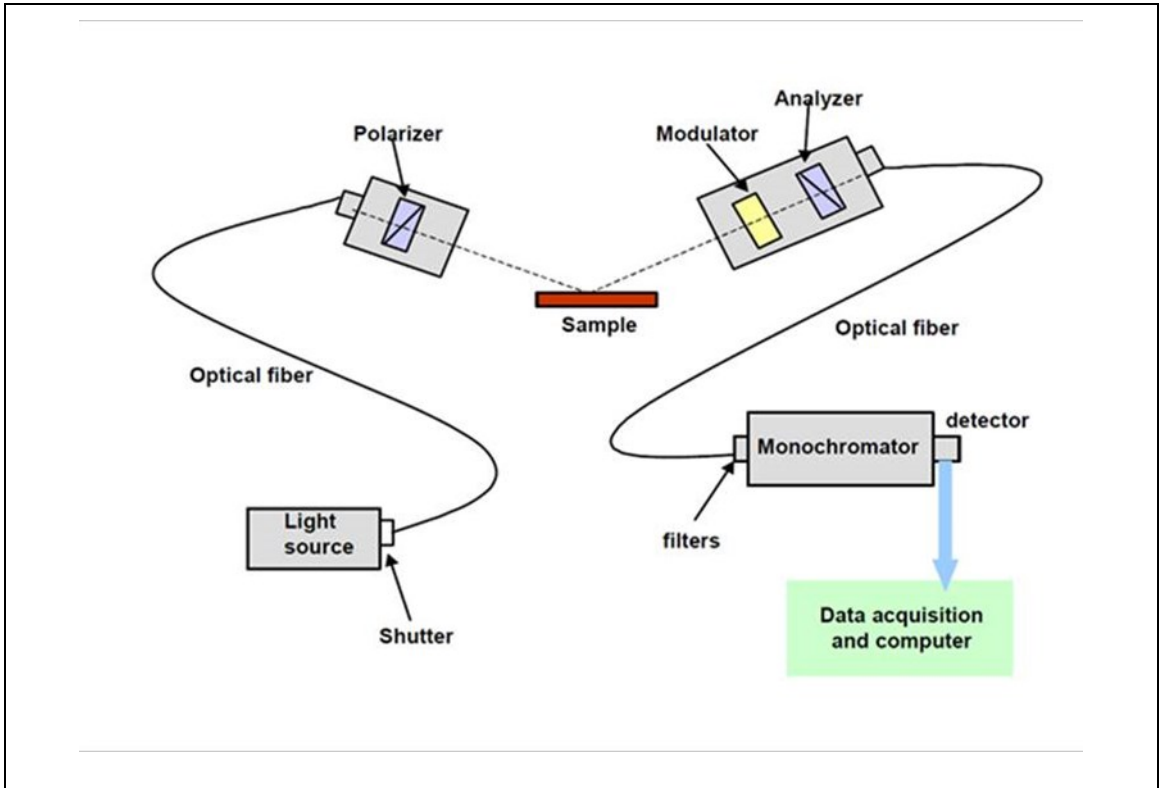
Burada E_g optik bant açıklığı enerjisi, E_0 maksimum yutulma enerjisidir. A malzemenin yoğunluğu ile orantılı genlik faktörüdür ve ϵ_2 nin yükseği ile orantılıdır. C genişletme parametresi olup malzemenin kısa erim düzeniyle ters orantılıdır.

Amorf yarıiletkenlerin bandgap'i Cody gap'ile ifade edilir ve Cody gap'i $(\epsilon_2)^{1/2}=0$ nin enerji konumundan tahmin edilir [65].

Bu tez çalışmasında oksijen katkılı hidrojenlendirilmiş amorf silisyum filmlerin SE ölçümleri şekil 3.14'te resmi görülen TÜBİTAK UME'de bulunan Horiba Jobin-Yvon Uvisel Tayfsal elipsometre sistemi kullanılmıştır. Katkısız a-Si:H filmleri ile ilgili SE ölçümleri sonuçları Özlem Pehlivan Güven'in tez çalışmasından [66] alınmıştır.



Şekil 3.14 TÜBİTAK UME Jovin Yvon UVISEL Tayfsal Elipsometre Ölçüm Sistemi
Sistem, 75 Watt Xenon ark lambası ışık kaynağı, polarizasyon üretici, modülatör, polarizasyon analizörü ve bir detektörden oluşur (şekil 3.15).

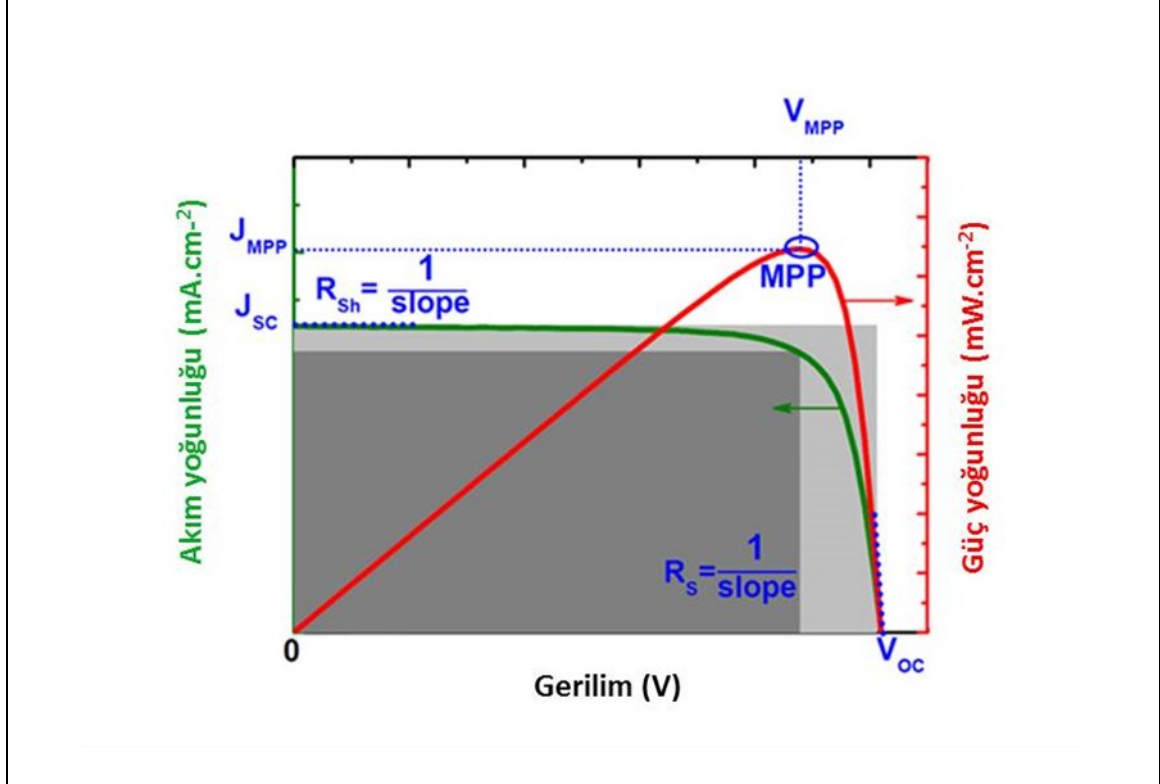


Şekil 3.15 TÜBİTAK UME Jovin Yvon UVISEL Tayfsal Elipsometre Ölçüm Sistemi

3.2.2 Güneş Pili Karakterizasyonu

3.2.2.1 I-V ölçümleri

Fotovoltaik aygıtlar için en temel ve en önemli karakterizasyon aracı I-V ölçümleridir. Basit olmasının karşın aygıt kalitesi hakkında en çok bilgiyi veren yöntemdir.



Şekil 3.16 İdeal I-V Eğrisi

İdeal bir I-V eğrisi şekil 3.16 da görülmektedir. Aydınlatma altında yapılan ölçümlerde toplam akım sıfır olduğunda ölçülen gerileme açık devre gerilimi (V_{oc}), uygulanan gerilim sıfır olduğunda ölçülen akıma kısa devre akımı (I_{sc}) adı verilir. Akım ve gerilim çarpımının maksimum olduğu noktaya maksimum güç noktası (MPP) adı verilir. Maksimum güç noktası (MPP) doluluk faktörü (FF) parametresini belirler:

$$FF = \frac{J_{MPP} \times V_{MPP}}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (3.6)$$

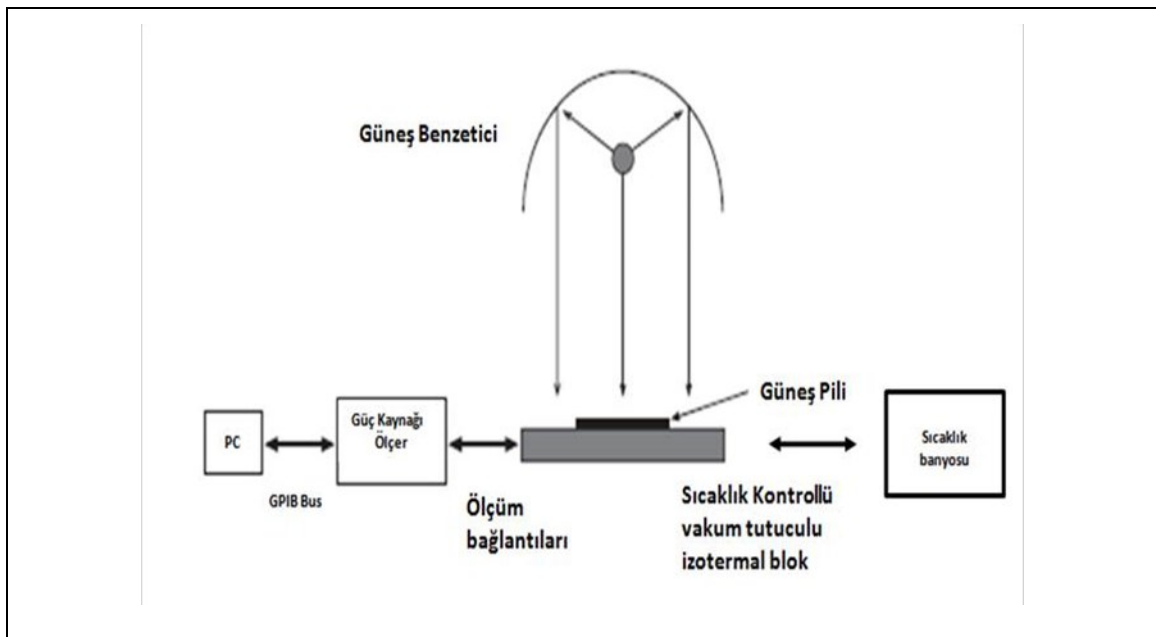
$V \rightarrow \infty$ için eğrinin eğiminin tersi seri direnç, R_s ve $V \rightarrow -\infty$ için eğrinin tersi şönt direncidir (R_{sh}).ve verim kayıplarına neden olurlar. R_s güneş pilindeki tüm dirençsel kayıplardan sorumludur (kontakt dirençleri, tabakaların özdirençleri gibi) ve bu nedenle mümkün

olduğunca düşük değerde tutulması gerekir. Şönt direnci (R_{sh}), Şönt kayıplarından sorumludur ve m¼m¼n olduğunca y¼ksek olması gerekir.

Bir g¼neř pilinin verimliliği (η) ışık etkisi ile ¼retilen elektriksel g¼ç ve g¼neř pilinin ¼zerine d¼řen ışık g¼c¼n¼n arasındaki oran olarak tanımlanır:

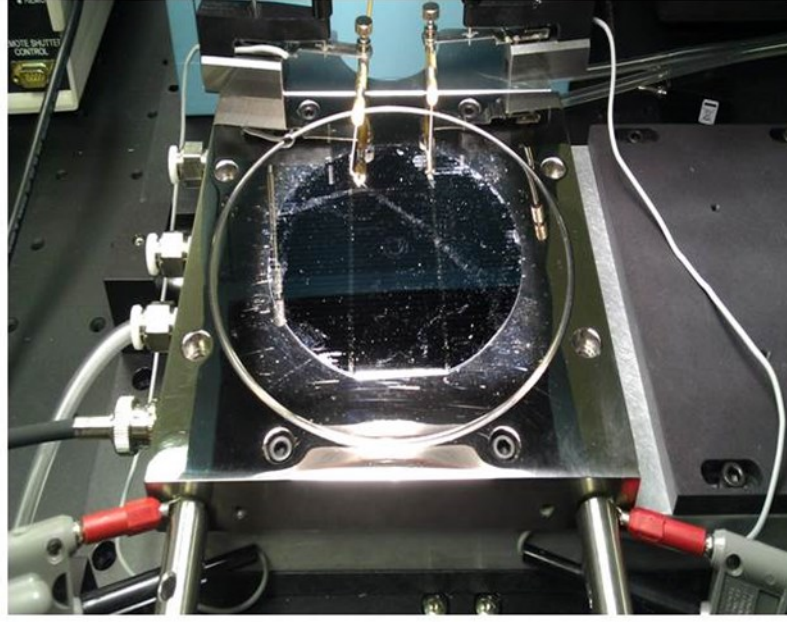
$$\eta = \frac{J_{MPP} \times V_{MPP}}{P_{in}} = \frac{J_{SC} \times V_{OC} \times FF}{P_{in}} \quad (3.7)$$

G¼neř pillerinin I-V karakteristiği ¼lç¼mlerinde kullanılan ¼lç¼m sistemin Şematik g¼sterimi Şekil 3.17 de g¼r¼lmektedir.



Şekil 3.17 I-V Karakteristik ¼lç¼m d¼zeneđi Şematik g¼sterimi

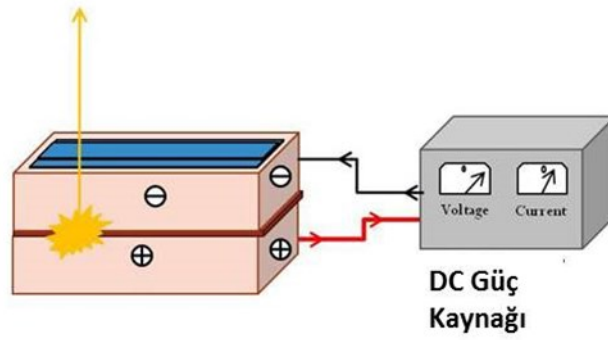
¼lç¼mler AM1.5G (ASTM G173-03) tayfsal dağılımda, g¼neř pilinin ¼zerinde 1000 W/m^2 g¼ç yoğunluğunda ışık sağlayan bir A sınıfı g¼neř benzeticinin aydınlatmasında gerçekteştirildi. Sıcaklık kontroll¼ bir vakum tutucu ¼zerine yerleştirilen g¼neř pillerinin sıcaklıklarının ¼lç¼mler s¼resince $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sabit kalması sağlandı. Kablo ve bağlantılardan kaynaklanacak kayıpları azaltmak i¼in akım-gerilim ¼lç¼mleri d¼rt-¼çl¼ ¼lç¼m y¼ntemi ile alındı. Kullanılan ¼lç¼m sisteminin resmi Şekil 3.18'de g¼r¼lmektedir.



Şekil 3.18 I-V Karakteristik ölçüm düzeneği

3.2.3 Elektrolüminesans Ölçümleri

Elektrolüminesans'ın temeli şekil 3.19 da gösterilmektedir.



Şekil 3.19 Güneş pilinde EL

Bir güneş piline doğru yönde gerilim uygulanmasıyla yük taşıyıcıları ekleme sokulur. Bu yük taşıyıcıları tekrardan birleşinceye kadar malzeme içinde hareket ederler. Yük taşıyıcılarının ışınımsal yeniden birleşmeleri elektrolüminesans biçiminde enerji yayar. EL işaretinin parlaklığı malzemenin yüzey yeniden birleşim hızı ve kusurlardan kaynaklanan yeniden birleşme gibi özelliklerine bağlı olduğu kadar üretim sürecinden ortaya çıkan dış kusurlara da bağlıdır.

EL işaretinin pilin malzeme özellikleri ile olan ilişkisini anlamak için p-n eklemının p tabakasındaki azınlık taşıyıcılarının (elektronlar) dağılımı dikkate alınmalıdır. Güneş pilinin p tabakasındaki azınlık taşıyıcılarının (n) sayısı p-n eklemının kenarından olan uzaklığın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$n(x) = n_0 \exp\left(-\frac{x}{L_e}\right) \quad (3.8)$$

Burada L_e efektif difüzyon uzunluğu ve n_0 eklem kenarındaki fazlalık azınlık taşıyıcıları sayısıdır. Efektif difüzyon uzunluğunun L_e eklem ile yüzey arasında sabit olduğu kabul edilir. Böylece p tabakasındaki toplam elektron sayısı, N, (3.8) eşitliğinin pil kalınlığı, W, üzerinde entegrasyonu ile belirlenir.

$$N = n_0 \int_0^W \exp\left(-\frac{x}{L_e}\right) dx = n_0 L_e \left[1 - \exp\left(-\frac{W}{L_e}\right)\right] \quad (3.9)$$

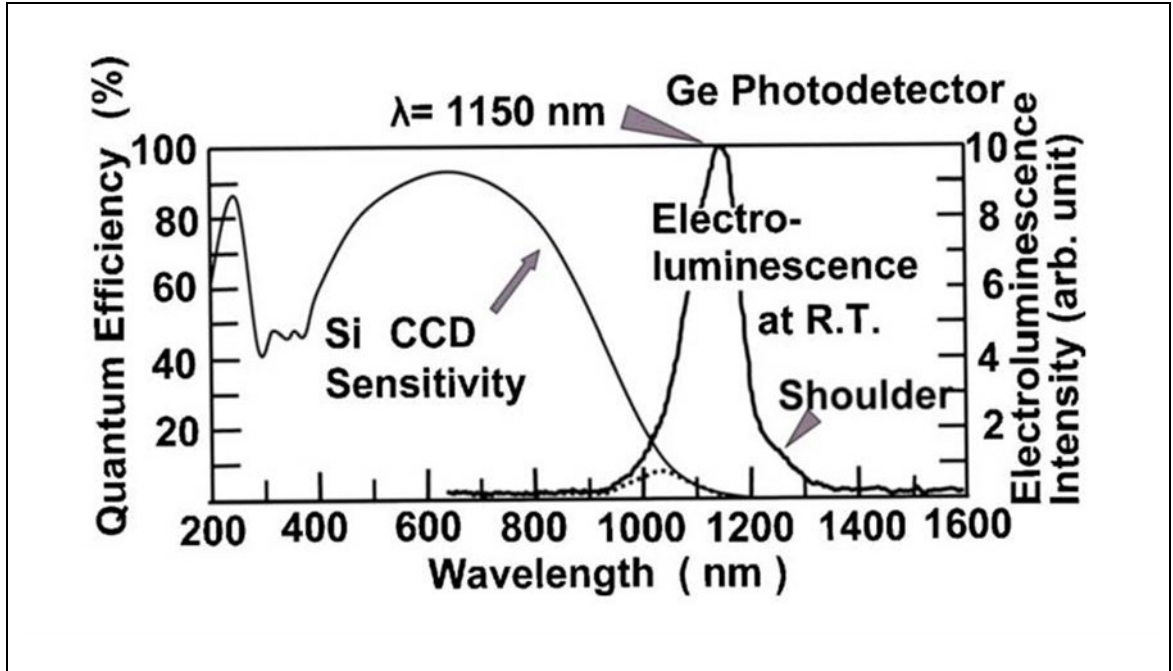
$\exp(-W/L_e)$ terimi 1 den daha küçük olduğundan (3.9) eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$N = n_0 L_e \quad (3.10)$$

Elektrolüminesans işaretinin parlaklığı (I_L) azınlık taşıyıcı sayısı ve $n_0 L_e$ ile orantılıdır. İleri yönlü akım ($J_F = J_0 \exp(eV_f/nkT)$) uygulanan gerilimle üstel olarak arttığından elektrolüminesans işaretinin şiddeti ileri yönlü akımla artar. Yüksek akım yoğunluklarında özellikle busbarlar ve kontak noktaları boyunca yeniden birleşmeler daha sık gerçekleştiğinden EL işaretinin parlaklığı da daha fazla olur. Malzemedeki enerji seviyeleri ile değişen azınlık yük taşıyıcı uzunluğu ve ömürleri gibi özellikler sıcaklıkla etkilendiklerinden, sıcaklık değişimi kristalografik kusurlar ve tanecik sınırları gibi yapısal kusurlar etrafındaki yeniden birleşmeleri etkiler.

Bu teknik mikro-çatlaklar gibi sıcaklıktan etkilenmeyen dış kusurlar ile yapısal kusurların ayırt edilmesinde de kullanılabilir. Pil boyunca busbarlar dik finger adı verilen kontaklar üzerinde meydana gelen bir kırılma elektriksel kontağın azalmasına neden olur. Bu kusurlar EL görüntüsünde kırık finger etrafında daha koyu bir görüntü olarak ortaya çıkar.

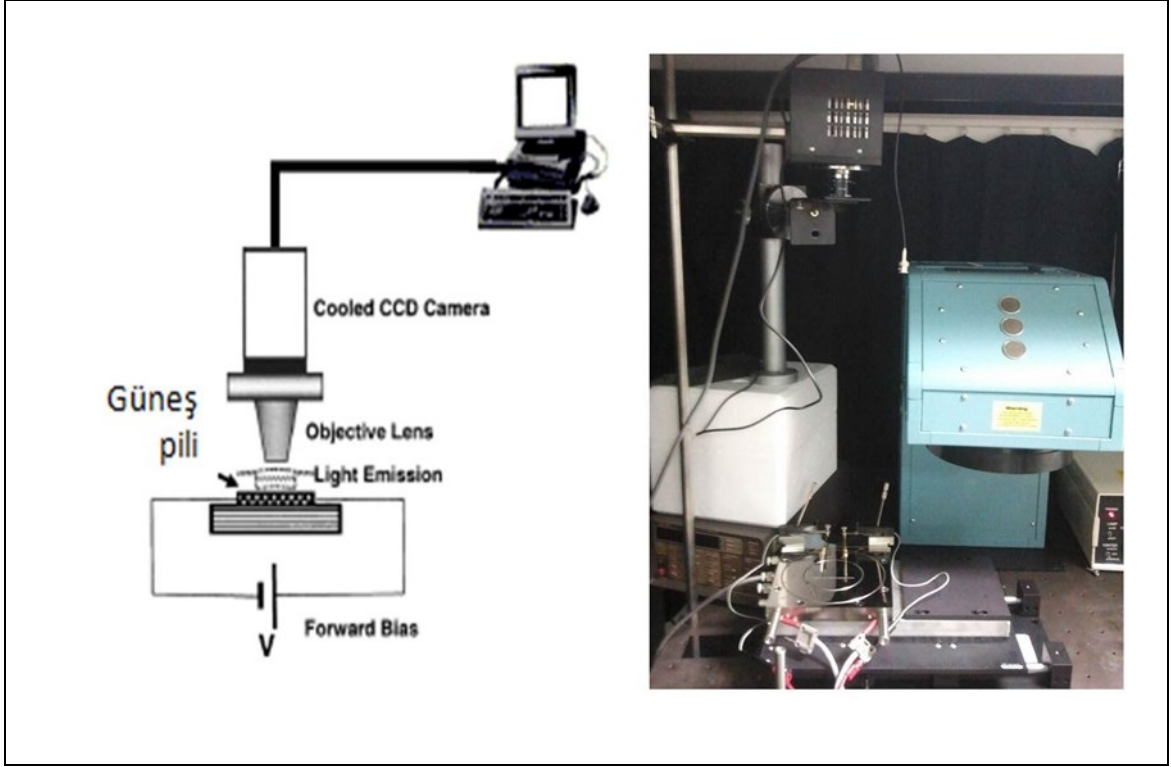
EL işaret parlaklığı, pildeki kusurların konumlarını gri tonlarda gösteren bir soğutmalı Si-CCD (Si-Charge Coupled Device) kamera kullanılarak saptanabilir. Şekil 3.20 oda sıcaklığında Si CCD kameranın tipik emisyon tayfını ve duyarlılığını göstermektedir.



Şekil 3.20 Si CCD kameranın tipik emisyon tayfı ve duyarlılığı [59]

Kameranın duyarlı olduğu 300-1100 nm aralığındaki bölge silisyumun elektrolüminesans pikinin olduğu 1150 nm ile örtüşür [67].

Bu tez çalışmasında şeması şekil 3.21'de verilen bir EL ölçüm sistemi kullandık. Sistem bir soğutmalı Si CCD kamera, Bir IR filtre, programlanabilir bir güç kaynağı ve PC içermektedir.



Şekil 3.21 a-Si:H/c-Si heteroeklemlerinin elektrolüminesans yöntemi ile incelenebilmesi için UME’de kurulan deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.2.4 Kuantum Verimliliği Ölçümleri

Bir güneş pilinin optik performansı, güneş pilinin farklı dalga boylarındaki optik ışınımaya duyarlılığını belirleyen tayfsal cevabı (SR) ölçümü ile belirlenebilir. Tayfsal cevap büyüklüğü güneş piline gelen güç ile güneş pili tarafından üretilen akım arasındaki oran olarak ifade edilir:

$$SR(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P_{\lambda}} \quad (3.11)$$

Tayfsal cevap kavramsal olarak kuantum verimliliğine (QE) benzerdir. Kuantum verimliliği güneş pili üzerine gelen foton sayısının ölçülen elektron sayısına oranı olarak tanımlanır. Tayfsal cevap ve kuantum verimliliği arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir.

$$SR(\lambda) = QE(\lambda) \frac{q\lambda}{hc} \quad (3.12)$$

QE ve tayf ya dalga boyunun ya da enerjinin fonksiyonu olarak ifade edilir. Foton enerjisi ile dalga boyu birbirlerine $E/eV=1240(\lambda/nm)$ şeklinde dönüştürülebilirler. Güneş pilinin ürettiği fotoakım aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$J_{AM1.5} = q \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} SR(\lambda) \Phi_{AM1.5}(\lambda) d\lambda \quad (3.13)$$

Aşağıda tanımları verilen iç kuantum verimliliği (IQE) ve dış kuantum verimliliği (EQE) olmak üzere iki farklı kuantum verimliliği vardır:

$$IQE = \frac{\text{ölçülen elektron sayısı}}{\text{yutulmuş foton sayısı}} \quad (3.14)$$

$$EQE = \frac{\text{ölçülen elektron sayısı}}{\text{gelen foton sayısı}} \quad (3.15)$$

Yukarıdaki gibi tanımlanan EQE, aktif aygıt kalınlığındaki ışık yutulma olasılığı ile ışık tarafından üretilen taşıyıcıların dış devreye (kontaklara) ulaşma olasılığının çarpımı ile de ifade edilir. Bir güneş pilinin EQE'i transmisyon ve yansıma gibi optik kayıpları içerir. Ancak genellikle yansıyan ve geçen ışık kaybolduktan sonra geriye kalan ışığın verimi olarak ele alınır

IQE ise güneş piline gelen bir fotona karşılık bir elektronun güneş pilinin dış devresine verilme olasılığıdır. Güneş pillerinin, (özellikle aynı tabakaları içeren dokulu yüzey ve düz yüzeyli güneş pillerinin) IQE'lerinin karşılaştırılması ön yüzey yansımalarını etkisinin görülmesine imkân verir.

Bir güneş pillin IQE'i aygıtın yansıma ve transmisyonu ölçülerek bu sonuca göre EQE eğrisinde bir düzeltme yapılarak belirlenir Bunun için aygıtın yansımalarının da ölçülmesi gerekir. Yansıma şu şekilde tanımlanır:

$$\rho(\lambda) = \frac{\Phi^r(\lambda)}{\Phi^i(\lambda)} = \frac{\text{Yansıyan ışımaya akısı}}{\text{Gelen ışımaya akısı}} \quad (3.16)$$

Bir nesneden toplam yansıma iki kısma ayrılır: Aynasal (specular) Yansıma (ρ_s) ve Dağınık (diffuse) (ρ_d) Yansıma.

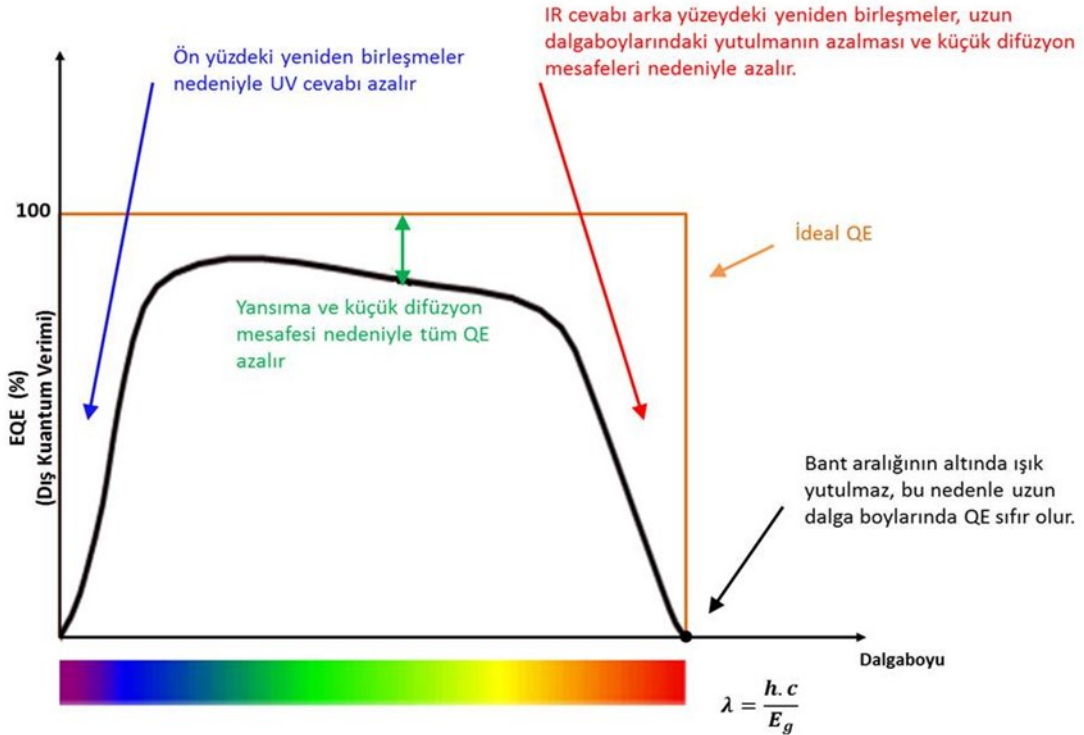
$$\rho = \rho_s + \rho_d \quad (3.1)$$

Bu çalışmadaki güneş pilleri bazı örnekler hariç tek taraflı ve düz yüzeyli olmasına rağmen hem aynasal hem de dağınık yansıma ölçümleri yapılmıştır.

Güneş pilindeki optik kaybın toplam yansımadan kaynaklandığını dolayısıyla transmisyon kaybının olmadığı kabul edilerek, yansıma ölçümlerinden EQE ve IQE aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$EQE = \frac{IQE(100 - R_{pil})}{100} \quad (3.1)$$

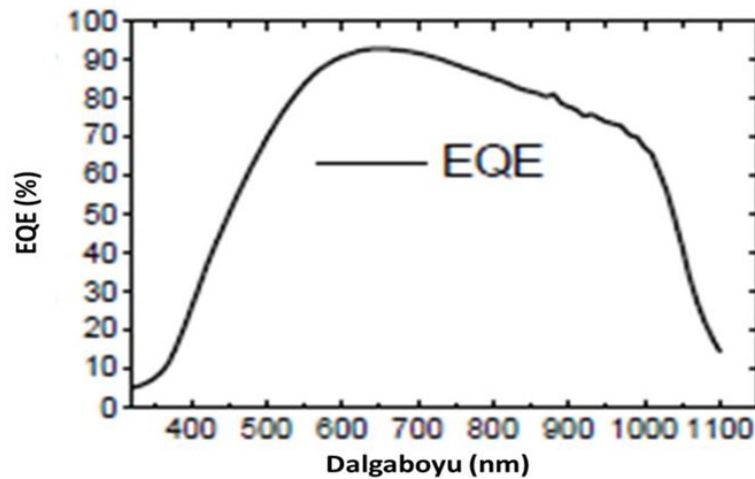
QE farklı şartlar altında güneş pilinin performansını tanımlayan anahtar büyüklüklerden biridir.



Şekil 3.22 Dış Kuantum verimliliği

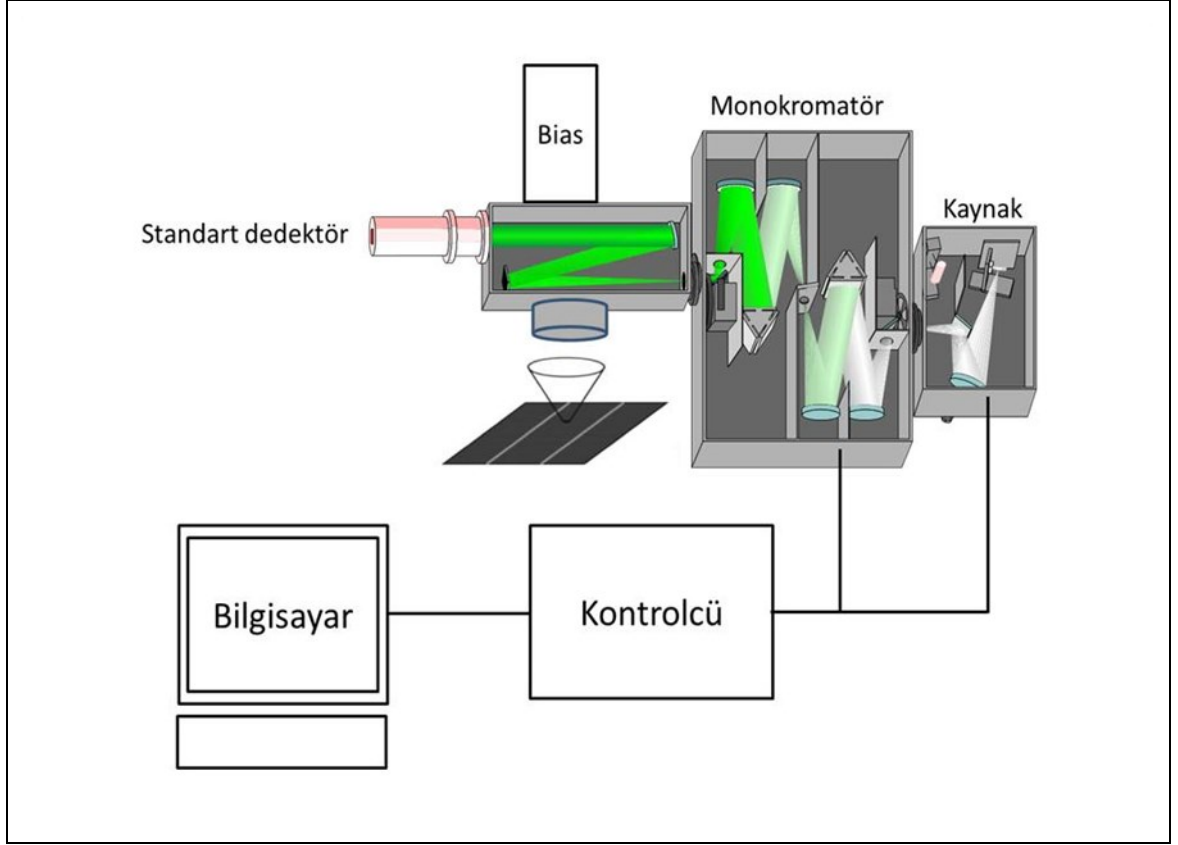
Dış kuantum verimi grafiği idealde yukarıdaki şekil 3.22'den de görüleceği gibi dikdörtgen şeklindedir. Ancak birçok güneş pilinde yeniden birleşme etkisi yüzünden kuantum verimi azalır. Toplama verimliliğini etkileyen mekanizmalar da kuantum verimliliğini etkilemektedir. Örneğin ön yüzey pasivasyonu yüzeye yakın üretilmiş taşıyıcılarını etkiler, mavi ışık ön yüzeyin çok yakınında yutulduğu için, yüksek ön yüzey yeniden birleşmesi kuantum veriminin mavi dalga boyu bölgesini etkileyecektir. Benzer şekilde yeşil dalgaboylu ışık güneş pilinin esas (bulk) kısmında yutulduğundan ve kısa difüzyon mesafesi esas (bulk) güneş pilinden toplama verimliliğini etkileyeceğinden tayfın yeşil dalga boyu bölgesinde kuantum verim azalacaktır.

Şekil 3.23'te bir heteroeklem güneş pilinin tipik EQE grafiği görülmektedir



Şekil 3.23 Heteroeklem güneş pilinin tipik Dış kuantum verimliliği

IQE ölçüm sonuçları elektriksel olarak aktif olmayan ITO, yaygıç be arka kontak gibi tabakalardaki yutulma sonuçlarını içerir. Bu çalışmadaki güneş pillerinde ITO kullanılmadığından ve arka kontaklardaki yutulma ihmal edildiğinden bunlardan dolayı yutulmaya katkı olmadığı kabul edilmiştir. SR ve Yansıma ve ölçümleri şekil 3.24'te şeması verilen ölçüm sistemi ile alınmış ve sisteme ait yazılım ile QE ve IQE hesaplanmıştır.



Şekil 3.24 Tayfsal Cevap Ölçüm sistemi

Monokromatör kullanılan SR ölçüm sistemlerinin özelliği yüksek dalga boyu çözünürlüğü ve geniş tayfsal bölgeye sahip olmalarıdır. Kuvars-halojen lambanın ürettiği beyaz ışık önce kilitlemeli yükseltici için gerekli olan periyodik işaret üretilmesi için bir ışık kesiciden geçer ve sonra monokromatör'e girer. Monokromatör çıkışında monokromatik ışık için bir standart dedektör tarafından kalibrasyon ölçümü alınır. Bir yarısaydam ayna düzeneği ile bölünen monokromatik ışık hem kalibrasyon ölçümü hem test ölçümü sırasında güneş pilinin üzerine düşürülerek bu iki ölçüm için standart dedektör çıkış sinyalleri arasındaki oran belirlenmiş olur. Ölçümler sırasında güneş pillerinin gerçek çalışma ortamını yaratmak için test edilen güneş pilleri yaklaşık 1 güneş sabiti (1370 W/m^2) aydınlatma ile aydınlatılmıştır. Sistem kalibrasyonu bias ışık kesilerek yapılmıştır.

DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Tez çalışması kapsamında hidrojenlendirilmiş amorf silisyum alt oksit oksijenleri ($a\text{-SiO}_x\text{:H}$, $x < 1$), silisyum heteroeklem (SHE) güneş pillerinin geliştirilmesi amacıyla yaygıç (emitter), tampon (buffer) ve arka yüzey etkisi (back surface field-BSF) olarak kullanılmıştır. Bu amaçla farklı film büyütme koşullarında amaca uygun olarak büyütülen $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ filmler ve bu filmlerin kullanıldığı SHE güneş pillerinin bölüm 3’de özetlenen yöntemler kullanılarak elde edilmiş karakterizasyon sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

Bu bölümde ilk olarak katkısız tampon tabakası olarak kullanılan $a\text{-Si:H}$ filmlerin optiksel özelliklerinin istenilen uygulamalar için optimizasyonu incelenecektir. Ardından, bu katkısız tabakalar c-Si wafer üzerinde kullanılarak oluşturulan SHE güneş pillerinde optimum katkı yoğunluğunun belirlenmesi üzerinde durulacaktır. Bu çalışmalar ardından c-Si alttabanların temizliği için kullanılan plazma ve kimyasal temizlik yöntemlerinin elde edilen güneş pillerinin performansına etkisi vurgulanacaktır. Takiben farklı alttaban sıcaklıklarında büyütülmüş katkısız ve n-tipi katkılı filmler kullanılarak büyütülen SHE’in performansından bahsedilecektir (Bu çalışmada, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünde yapılan bir doktora tez çalışmasında elde edilen sonuçlardan [66] faydalanılmıştır).

Deneysel sonuçlar, $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ oksijenlerin tampon ve yaygıç kullanıldığı optimizasyon ile devam edecektir.

4.1 Katkısız a-Si:H kullanılarak SHE güneş pillerinin optimizasyonu

4.1.1 Aygıt Yapımına Uygun Katkısız a-Si:H filmler için PECVD parametrelerinin belirlenmesi

Heteroeklem aygıtlarda (i) a-Si:H tabakası tabaka c-Si yüzeyindeki arayüzey kusurlarını doyurulmasına ve yeniden birleşme kayıplarını azaltmaktadır. Bu nedenle heteroeklem güneş pillerinde yüksek açık devre gerilimlerine ulaşılmasında anahtar bir rol oynar [68]. Ancak i-tabakası seri direnci arttırarak pilin doldurma oranını azaltır. Yüksek açık devre gerilimi ve düşük seri direnç elde edilebilen (i) a-Si:H tabaka kalınlıkları 2-3 nm gibi çok dar bir aralıkta değiştiği gözlenmiştir [69]. Bu nedenle (i) a-Si:H tabakasının homojenliği yüksek verimli heteroeklem güneş pillerinin üretilebilmesi için önemlidir.

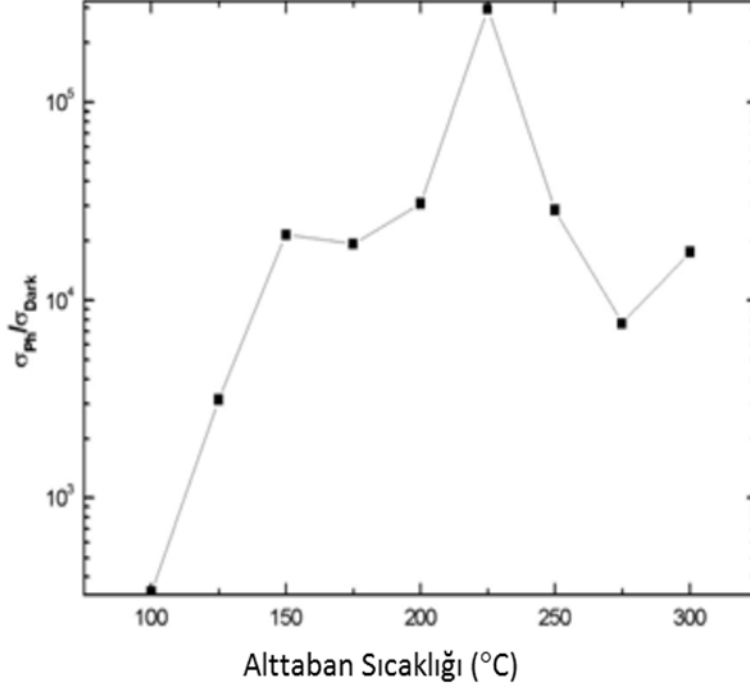
Aygıt yapımına uygun katkısız hidrojenlendirilmiş amorf silisyum filmlerde düşük karanlık iletkenlik, σ_d , ($<10^{-10} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) elektronik olarak aktif safsızlıkların olmadığı bir göstergesidir. Oda sıcaklığında yüksek fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe oranı ($\sigma_{ph}/\sigma_d \geq 10^5$) ışık tarafından üretilen yük taşıyıcıların düşük yeniden birleşme hızlarına sahip olduğunu gösterir [70]. Yüksek soğurma katsayısının ise bant aralığının E_g 1.6 eV ile 1.8 eV aralığında olduğunu gösterdiği bilinmektedir [71].

Bu tez çalışmamızda güneş pillerine uygulanmak amacıyla aygıt yapımına uygun katkısız tabakanın (i) a-Si:H büyütme koşullarını optimize etmek için farklı alttaban sıcaklığı, RF gücü, gaz akış hızı, işlem sürecinde vakum basıncı değiştirerek bir seri film büyüttük ve filmlerin fiziksel ve optiksel özelliklerini karanlık iletkenlik, fotoiletkenlik, profilometre, SEM, AFM ve SE kullanılarak incelenmiştir.

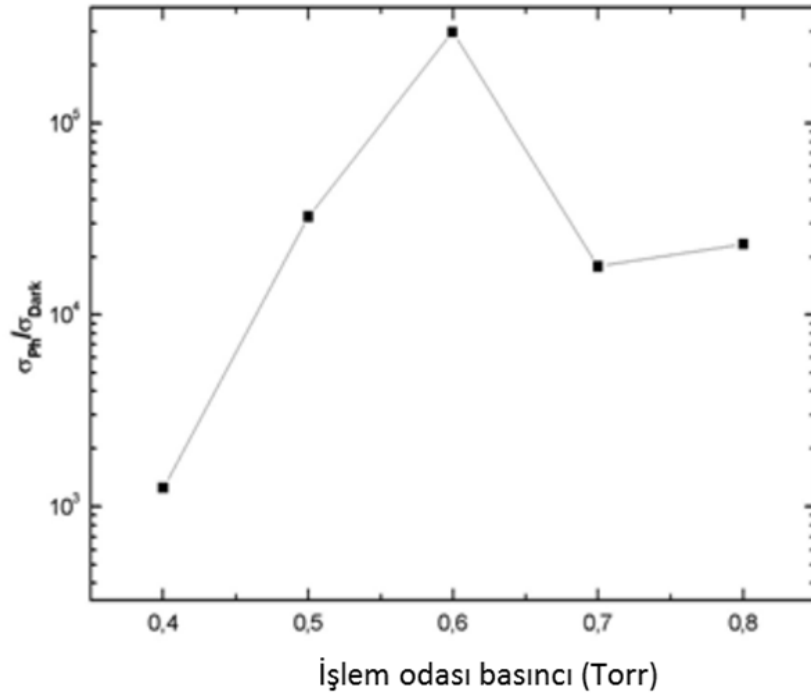
Katkısız amorf silisyum ince filmler Corning 7059 cam alttabanlar üzerine 30 dakika biriktirme sürelerinde üretildi. Alttaban sıcaklıkları 100 °C ile 300 °C arasında biriktirme basıncı 0.4 Torr ile 0.8 Torr arasında, plazma gücü 3 Watt ile 12 Watt arasında ve SiH₄ gaz akışı 3 sccm ile 40 sccm arasında değiştirildi.

Bu şekilde büyütülen filmlerin üzerinde, iletkenlik ölçümleri için ısı buharlaştırma metodu ile eş düzlemler alüminyum elektrotlar oluşturuldu. Filmlerin fotoiletkenliği elektrotlara sabit gerilim uygulanarak, AM1.5G 1000 W/m² aydınlatma altında 25 °C sıcaklıkta Keithley 6517 Elektrometre ile ölçüldü. Fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe

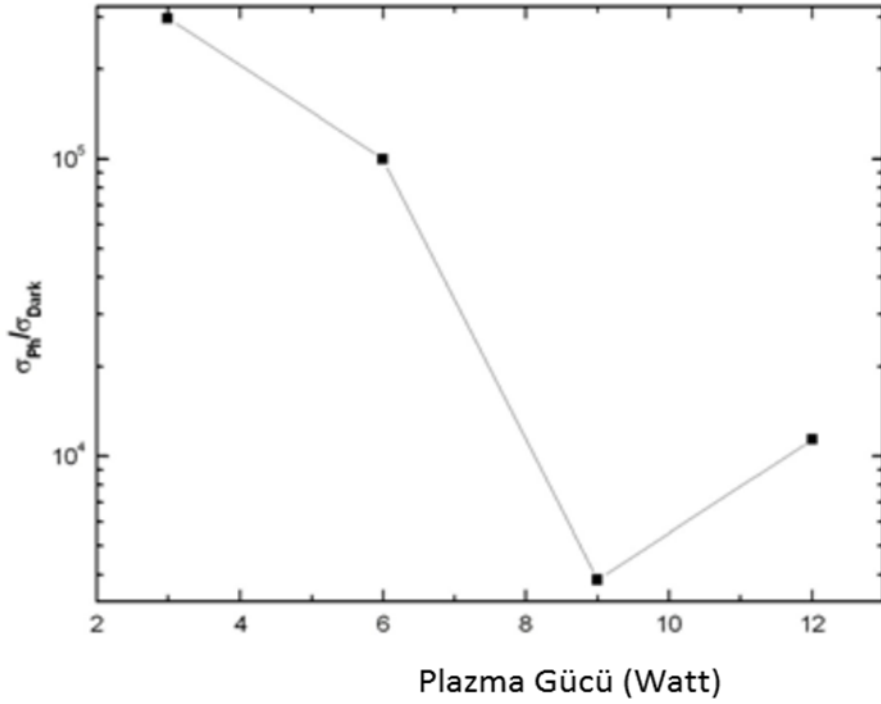
oranının, alttaban sıcaklığına bağımlılığı şekil 4.1, işlem odası basıncına bağımlılığı şekil 4.1, RF gücüne bağımlılığı şekil 4.2 ve gaz akış hızına ve bağımlılığı Şekil 4.3'te sunulmuştur.



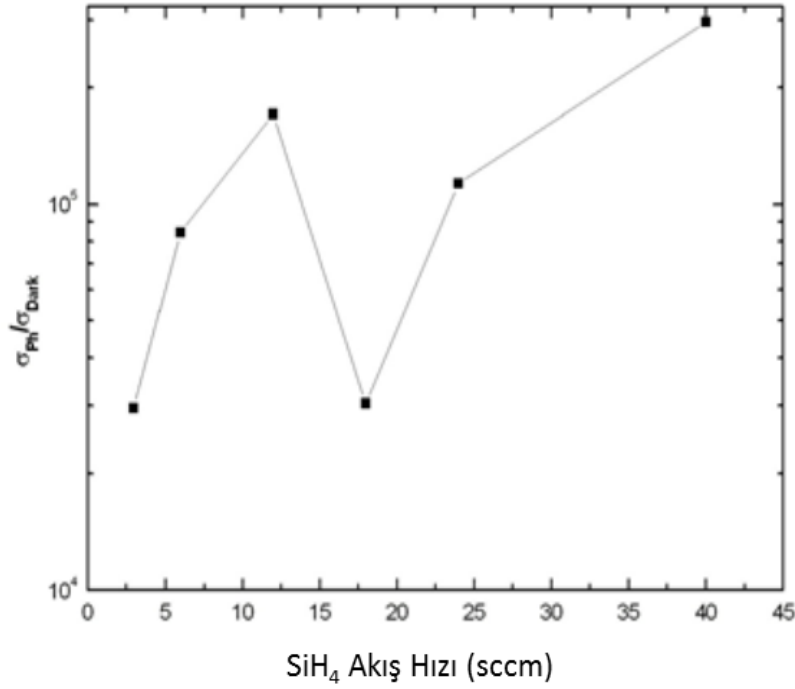
Şekil 4.1 AM1.5G aydınlatma altında ölçülen fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe oranının altıtaban sıcaklığına bağımlılığı



Şekil 4.2 AM1.5G aydınlatma altında ölçülen fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe oranının işlem odası basıncına bağımlılığı



Şekil 4.3 AM1.5G aydınlatma altında ölçülen fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe oranının, RF gücüne ve gaz akış hızına bağımlılığı



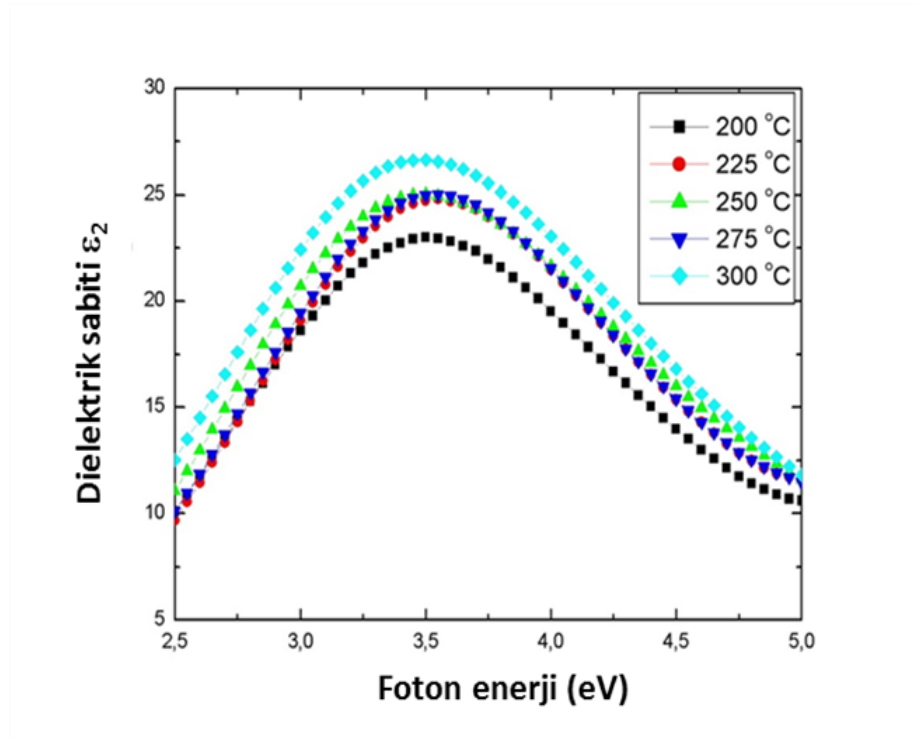
Şekil 4.4 AM1.5G aydınlatma altında ölçülen fotoiletkenliğin karanlık iletkenliğe oranının, RF gücüne ve gaz akış hızına bağımlılığı

Yapılan ölçümler sonucunda AM 1.5G aydınlatma altında 10⁵'den daha büyük aydınlık/karanlık iletkenlik oranına sahip filmlerin, 225 °C'de, 3 W RF gücünde, 40 sccm gaz akışında ve 0.6 Torr basınçta büyütülebildiği görüldü.

4.1.1.1 Tayfsal Elipsometre Ölçümleri

Tayfsal elipsometre ile hesaplanan dielektrik sabitinin sanal bileşenin $\langle \epsilon_2 \rangle$ a-Si:H kalitesini gösterdiği ve $\langle \epsilon_2 \rangle$ arttıkça daha yüksek dönüşüm verimliliğine neden olduğu önerilmiştir [72]. FF'nün diğer güneş pili parametreleri arasında (i) a-Si:H tabakanın kalitesinden en çok etkilenen parametre olması nedeniyle [73] eğer katkısız tabaka için SE sonuçlarının analizi uygun şekilde yapılırsa büyütülecek heteroeklem güneş pilinin performansı hesaplanabilir.

Bu bilgiler ışığında farklı alttaban sıcaklıklarında cam üzerine büyütülmüş katkısız a-Si:H filmlerin tayfsal elipsometre (SE) ölçümleri alındı ve bu ölçümler kullanılarak filmlerin optik soğurma katsayıları hesaplandı. Aşağıda şekil 4.5'te hesaplanan dielektrik sabitinin sanal bileşenin $\langle \epsilon_2 \rangle$ alttaban sıcaklığı ile değişimini veren grafik verilmiştir.



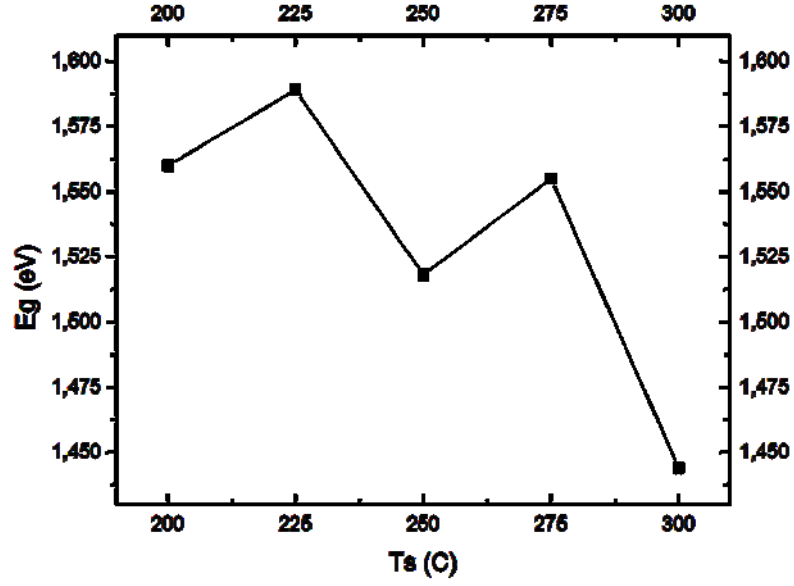
Şekil 4.5 Farklı sıcaklıklarda büyütülen katkısız a-Si:H filmlerin SE ölçümlerinden elde edilen dielektrik sabitinin sanal bileşeni

En yüksek soğurma 300 °C sıcaklıkta büyütülen filmde görüldü. En yüksek aydınlık/karanlık iletkenlik oranına sahip film 225 °C olarak belirlendi. Bu filmde ϵ_2 nin daha yüksek enerjilere doğru görülen kaymanın nedenin, bu filmin daha yüksek hidrojen içermesinden kaynaklandığı düşünülmüştür [66]. Böylece H₂ seyreltmesi kullanmaksızın katkısız a-Si:H filmler için biriktirme sıcaklığı olarak 225 °C seçtik.

Aşağıdaki ifade ile verilen Cody gap hesaplanarak bant aralığı tahmini olarak belirlendi:

$$\epsilon_2 = A(E_n - E_g)^2 \quad 4.1$$

Cody gap, $(\epsilon_2)^{1/2} - E_n$ grafiğinde $(\epsilon_2)^{1/2} = 0$ noktasındaki enerji değerinden belirlenir ve aşağıda şekil 4.6 da görülmektedir.

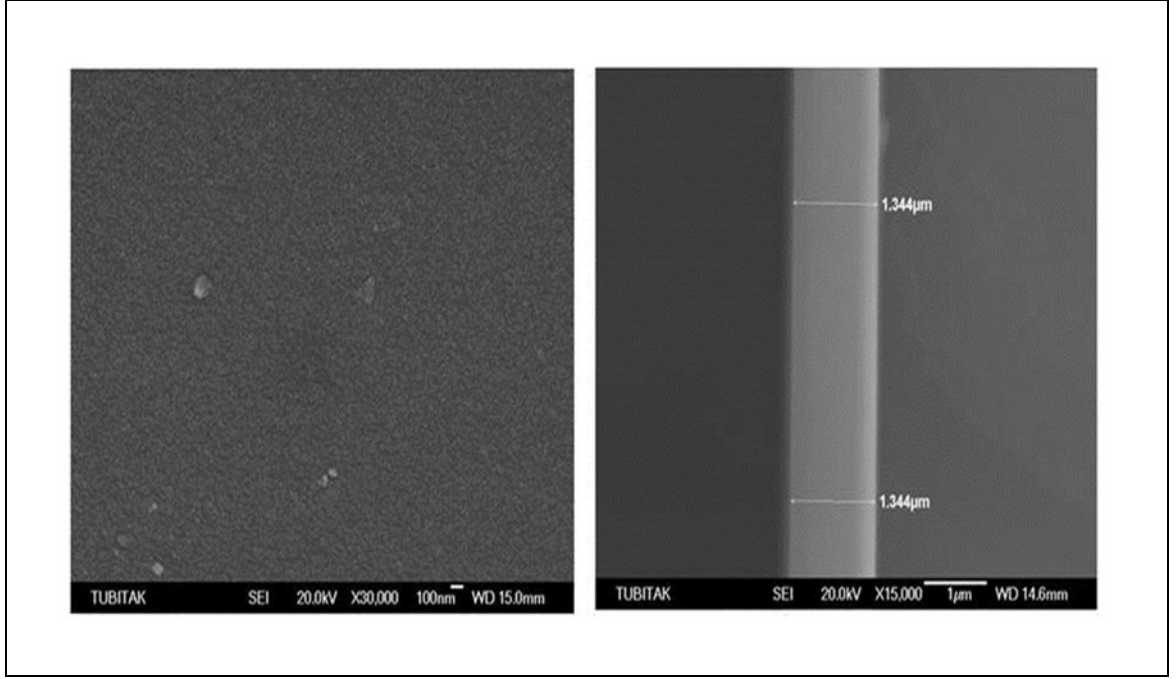


Şekil 4.6 Sıcaklık ile optik bant aralığı (Cody gap) değişimi

Bu şekilde 225 °C alttaban sıcaklığı için optik bant aralığının 1.59 eV olduğu ve sıcaklık arttıkça azaldığı gözlemlendi. Özellikle yüksek alttaban sıcaklıklarında bant aralığının azalması yüzeyden hidrojen kaybı nedeniyle büyük yoğunluklarda miktarda kopuk bağ oluşumu ile açıklanabilir [66].

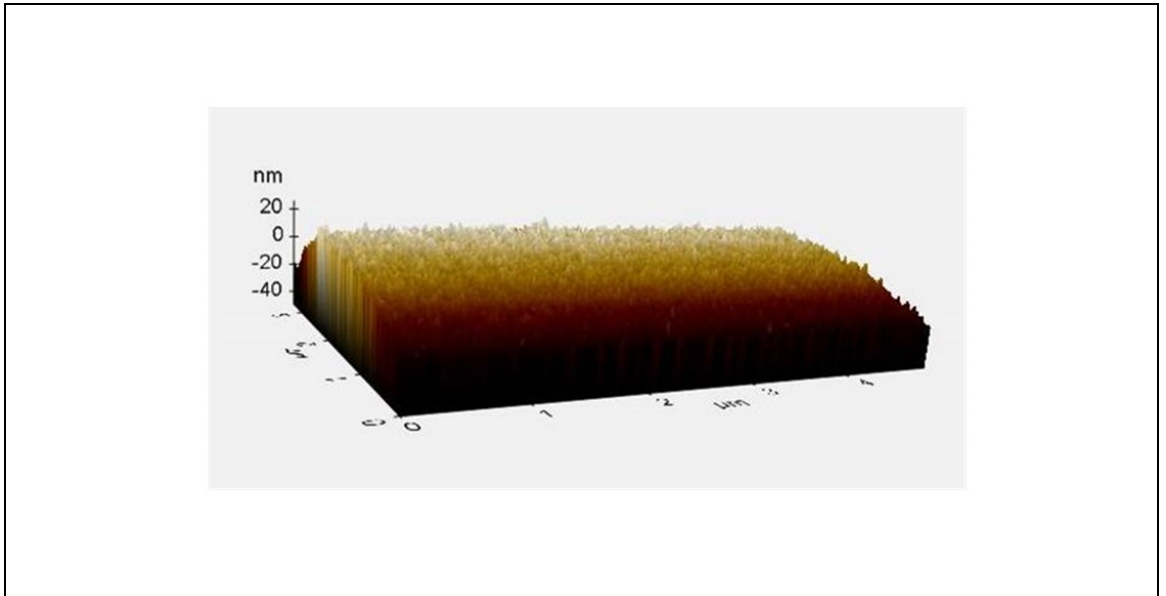
4.1.1.2 SEM ve AFM Ölçümleri

Daha önce de belirtildiği gibi (i) a-Si:H tabakasının homojenliği yüksek verimli heteroeklem güneş pillerinin üretilebilmesi için önemlidir. Bu nedenle yukarıda büyütme koşulları verilmiş olan filmin homojenliği SEM görüntüleri alınarak incelendi ve homojenlik açısından istenilen özelliği sağladığı görüldü (şekil 4.7).



Şekil 4.7 Corning 1737F cam üzerine 225 °C'de büyütülen filmin yüzey ve kesit SEM görüntüleri

Filmin AFM görüntüleri ise (şekil 4.8) 5 µm x 5 µm alan için 4 nm'lik bir yüzey pürüzlülüğü elde edildiğini göstermiştir. Buradan filmin yüzey pürüzlülüğü açısından da istenilen özellikleri sağladığı anlaşılmaktadır.



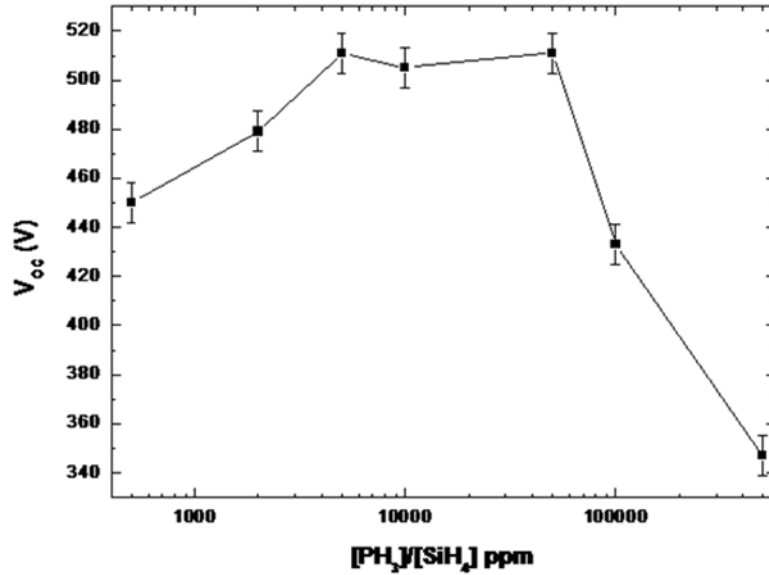
Şekil 4.8 Corning 1737F cam üzerine 225 °C'de büyütülen filmin AFM görüntüsü. Pürüzlülük 4 nm dir

4.1.2 a-Si:H/c-Si heteroekmlerinde katkılamanın etkisinin incelenmesi

Katkılama oranını belirlemek amacıyla 100mm, $<1 \Omega \cdot \text{cm}$, 525 μm kalınlıkta, p-tipi Czochralski (100) c-Si alttabanlar üzerine farklı katkıyla oranlarında a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) yapısında bir seri güneş pilleri üretildi. Alttabanlar PECVD'ye yüklenmeden önce Bölüm 3 de anlatılan K2 yaş kimyasal yöntem ile temizlendi.

Katkısız tabaka $12\text{mW}/\text{cm}^2$ RF güç yoğunluğu, 225 °C alttaban sıcaklığı, 0.6 Torr basınç, 40 sccm SiH_4 akışı ve 60 saniye biriktirme süresinde büyütüldü. Katkılama oranı n-tipi tabaka için 500 – 500000 ppm aralığında değiştirilerek 120 saniye biriktirme süresinde büyütüldü. Elde edilen güneş pillerinin yüzey alanı 72 cm^2 idi.

a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş pillerinde açık devre geriliminin büyüklüğü verimin ve büyütülen katkısız filmin c-Si yüzeyini pasivasyonunun bir ölçüsüdür [68] Şekil 4.9'da farklı $[\text{PH}_3]/[\text{SiH}_4]$ katkılama oranları için büyütülen a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) güneş pillerinin AM1.5G aydınlatma altında ölçülen açık devre gerilimleri verilmiştir.



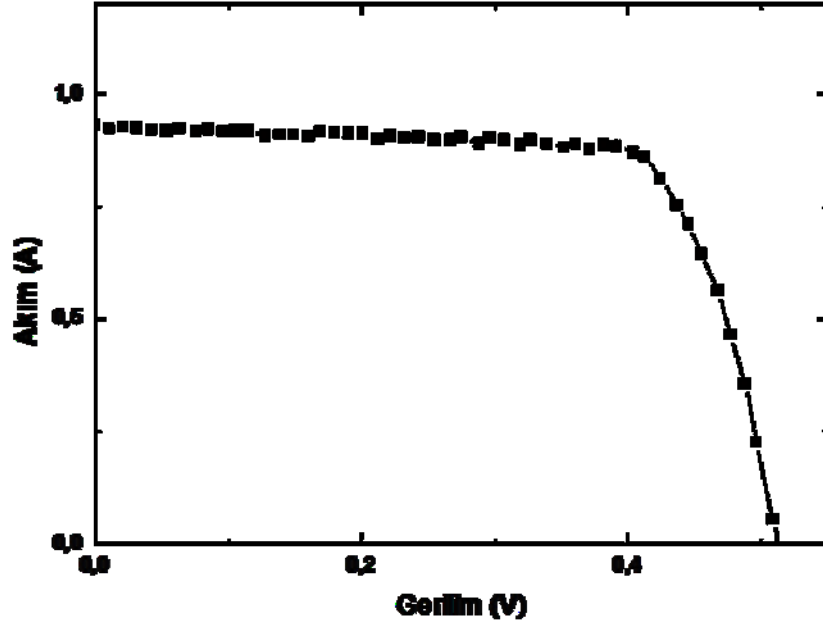
Şekil 4.9 Farklı katkılama oranları için büyütülen a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) yapısındaki güneş pillerinin AM1.5G aydınlatma altında ölçülen açık devre gerilimleri

Yüksek Voc değerleri 5000 ppm -50000 ppm aralığını kapsayan katkılama oranları için elde edilmiştir. Literatürde katkılama oranına göre pil performansının değişim daha dar bir aralıkta verilmiştir [69]. 10000 ppm'de gözlenen azalma daha önceki bu çalışmalarda da gözlenmiştir. Burada yeni olarak katkılama oranı 10000 ppm üzerine arttırıldığında 50000 ppm'de yeni bir en büyük değer gözlenmesidir. Bu değer üzerinde katkılı tabakada artan kusur yoğunluğu ile açık devre gerilimi azalmaktadır. Her iki en büyük değer ve aralarında yer alan 10000 ppm'deki azalma pek çok kez test edilmiş ve tekrarlanabilir olduğu anlaşılmıştır.

Literatür göz önüne alındığında 10000 ppm'den daha büyük katkılama oranlarında kusur yoğunluklarının artması nedeniyle çalışılmadığı görülmektedir. Ancak bazı guruplar SHJ ve HIT güneş pillerinde emitter ile TCO arasındaki arayüzey etkilerinin azaltması ve alüminyum katkılı ZnO gibi düşük maliyetli TCO malzemelerinin kullanılmasına imkân vermesi nedeniyle katkısız tabaka yerine (p) c-Si alttabanlar üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüş yüksek oranda n tipi katkılı tabakalar kullanmayı tercih etmektedir [70].

Çalışmamızın devamında düşük kusur yoğunluğuna sahip güneş pilleri için n tipi katkılı tabakada $[PH_3]/[SiH_4]= 5000$ ppm katkılama oranını kullanmaya karar verdik.

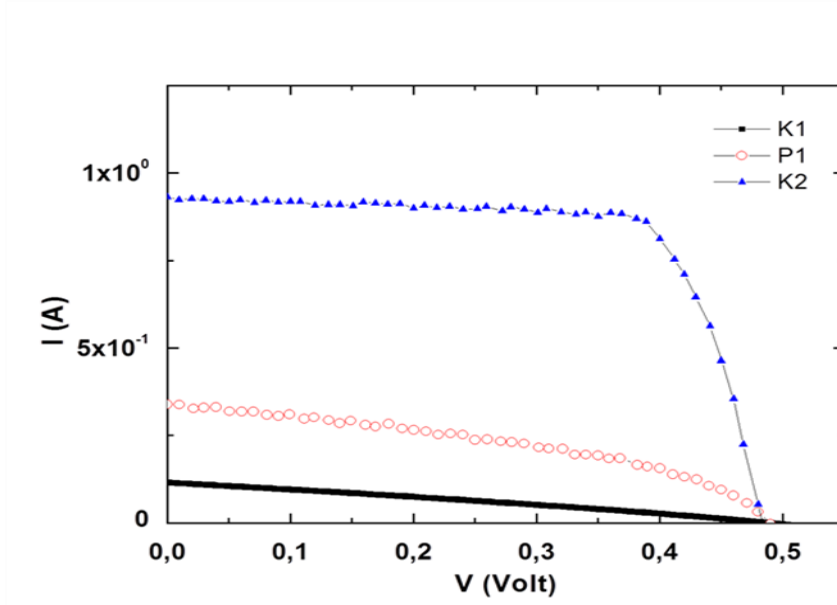
5000 ppm'de büyütülen güneş pillerinin AM1.5G aydınlatma altında, 25°C'de ölçülen I/V karakteristiği Şekil 4.10'da sunulmuştur. Alüminyum üst elektrot/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Al arka elektrot yapısındaki güneş pilinin aktif alanı 72cm² ve verimliliği %4.6'dır.



Şekil 4.10 5000ppm'de büyütülen güneş pilinin AM1.5G aydınlatma altında I/V eğrisi.
Aktif alan 72 cm^2 ve güneş pilinin verimliliği %4.6'dır

4.1.3 Kristal silisyum alttabanların temizliğinde kimyasal ve plazma yöntemleri arasındaki farkların incelenmesi

Kullanılan üç temizlik yöntemini birbirleri ile karşılaştırmak amacıyla, 100 mm çapında, <100> yönelimli p-türü $1-20 \Omega\text{cm}^{-1}$ c-Si alttabanlar yukarı belirtilen temizleme işlemlerinden geçirildikten sonra a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) yapısında güneş pilleri üretildi. Pillerin tamamı alttaban sıcaklığı $225 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de, RF gücü 3W ve 0.6 Torr basınçta büyütüldü. Gaz akışı i-tabakası için Silan akışı 40 sccm, n-tabakası için $[\text{SiH}_4]/[\text{PH}_3]=2$ ve Silan gaz akışı 40 sccm'de tutuldu.

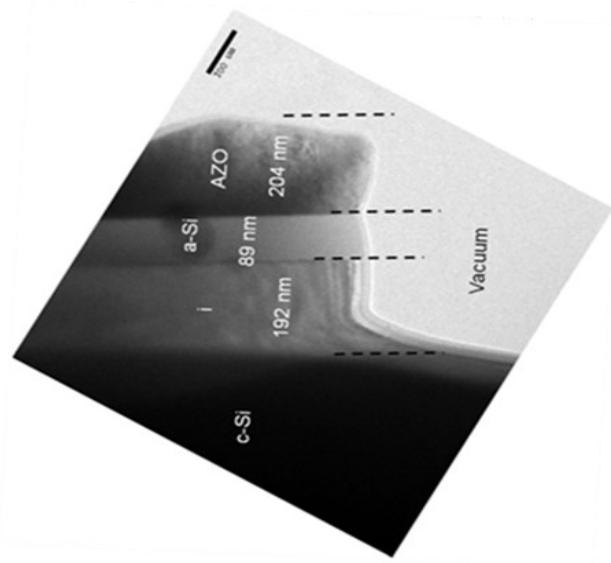


Şekil 4.11 K1, K2 ve P1 temizleme yöntemleri ile 100 mm çapında silisyum alttabanlar temizlendiğinde elde edilen güneş pillerinin I/V değişimi

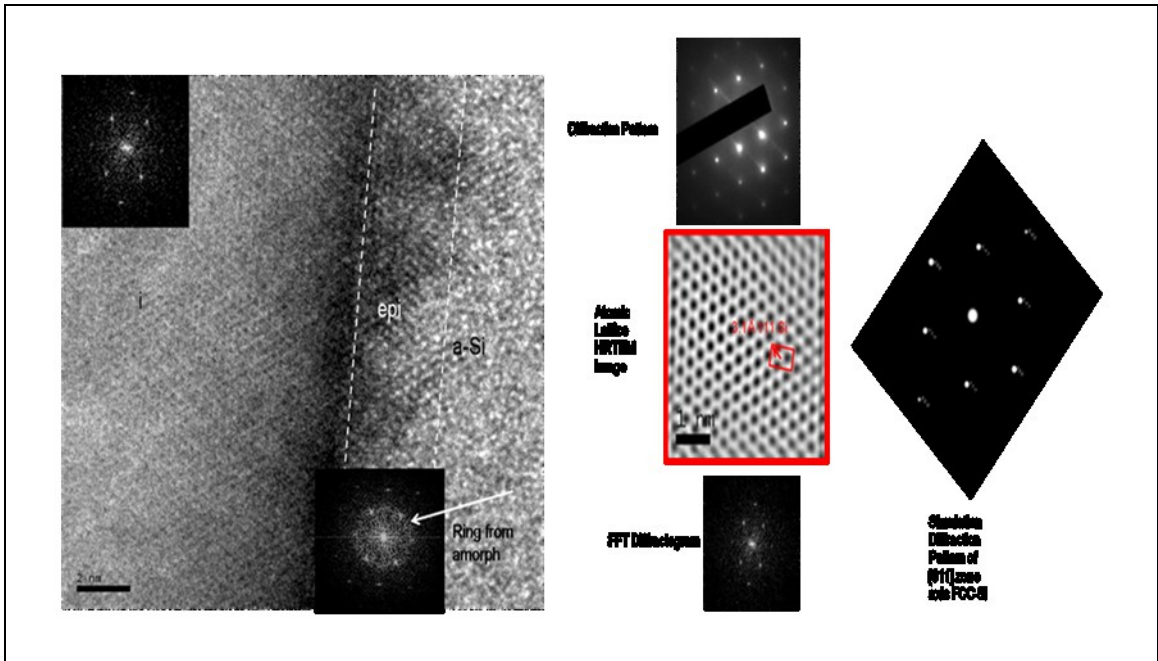
Elde edilen pillerin AM1.5G aydınlatma altında ölçülen I/V karakteristikleri şekil 4.11’de sunulmuştur. Grafikte görüldüğü gibi temizleme yöntemlerinden en verimli olanı K2 olarak görülmektedir. Tüm güneş pillerinde elde edilen gerilim 0.5V civarında iken, temizleme yöntemine bağlı olarak kısa devre akımı belirgin biçimde arttığı görülmüştür.

4.1.4 a-Si:H filmlerin c-Si üzerinde büyümesi ve TEM ile incelenmesi

Alüminyum üst elektrot/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Alüminyum arka elektrot yapısında K2 ile temizlenmiş (100) c-Si yüzeyinde 5 dk. a-Si:H (i) ve 5 dk. a-Si:H (n) ve üzerine 30 dk. ZnO:Al büyütülerek oluşturulan bir güneş pilinin tabakalarına ait HRTEM görüntüsü şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 c-Si(p)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n)/AZO yapısındaki güneş pilinin TEM görüntüsü, a-Si:H filmler 5dk. ve AZO 30 dk. büyütülmüştür. n-katkılı a-Si:H film a-Si olarak işaretlenmiştir



Şekil 4.13 AZO/ a-Si:H(n)/ a-Si:H(i)/ c-Si(p) yapısındaki güneş pilinde (i) ve (n) filmler arasındaki arayüzey (sol), c-Si üzerinde epitaksiyel olarak büyüyen katkısız filmin TEM kırınım görüntüsü (sağ)

Görüldüğü gibi a-Si:H ve AZO filmler geliştirilen yumuşak büyütme yöntemi ile c-Si alttaban üzerinde keskin ara yüzeyler oluşturacak şekilde büyümektedir.

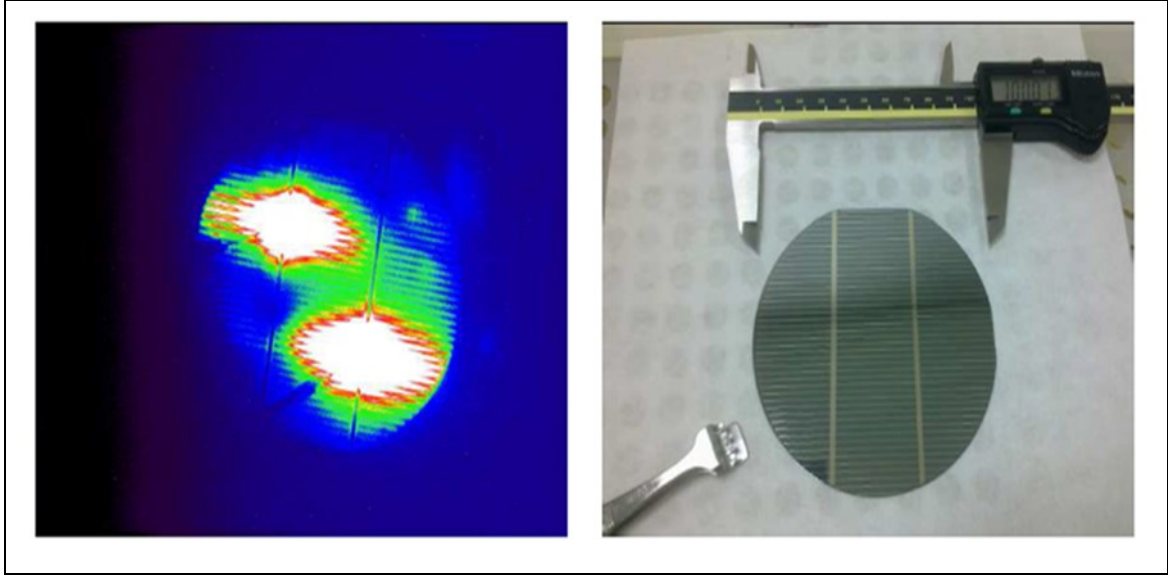
Kristal silisyum üzerinde katkısız tabakanın epitaksiyel olarak büyüdüğü şekil 4.13'teki a-Si:H (i)/a-Si:H(n) ara yüzeyine ait daha detaylı TEM görüntüsünde görülmektedir. Ayrıca a-Si:H(n) ara yüzeyine yaklaşıldığında piramitsel bir yapı gözlenmiştir. Katkısız tabaka bundan sonra amorf olarak büyümektedir. a-Si:H (n) tabakası ise amorf olarak büyümektedir.

Daha önce yapılan bazı çalışmalarda da <100> yönelimli c-Si alttabanlar üzerinde katkısız tabakanın epitaksiyel olarak büyüdüğü belirlenmiş ve bu etkinin a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş pillerinin verimliliği olumsuz etkilediği belirtilmektedir [71]. Başka bazı çalışmalarda ise etkinin öneminin olmadığı belirtilmiştir [74]. Fujiwara ve arkadaşları [75], a-Si:H daha iyi yüzey pasivasyon yeteneğine sahip olduğunu ve düşük taban sıcaklıklarında a-Si:H oluşturulabileceği üzerinde durmuş ve verimli güneş pillerinin a-Si:H/epi-Si geçiş fazında oluşturulabileceğini göstermiştir.

Katkısız a-Si:H tabakasının (p) c-Si alttaban üzerine büyüme mekanizması detaylı olarak çalışılmıştır [66].

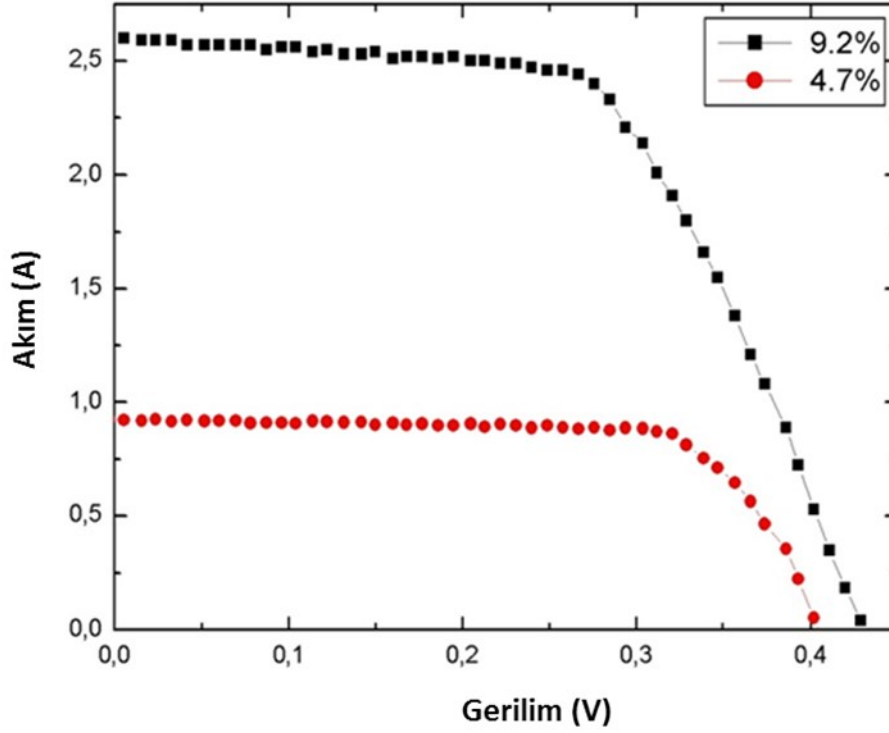
4.1.5 Silisyum Heteroeklem güneş pillerinin EL ile incelenmesi

Detayları bölüm 3.2.3'te verilen elektrolüminesans ölçümleri kullanılarak güneş pillerinin farklı performanslarda çalışan bölgelerini birbirlerinden ayırmak mümkündür. Önceki bölümde a-Si:H tabakaları 5000 ppm $[PH_3]/[SiH_4]$ katkılama oranında 225°C alttaban sıcaklığında 0.6 Torr basınçta ve 12 mW/cm² RF güç yoğunluğunda büyütülen güneş pilinin, karanlıkta açık devre gerilimi uygulandığında elde edilen EL görüntüsü ve fotoğrafı Şekil 4.14'te verilmiştir



Şekil 4.14 5000 ppm $[PH_3]/[SiH_4]$ katkılama oranında $225^\circ C$ alttaban sıcaklığında 0.6 Torr basınçta ve 12 mW/cm^2 RF güç yoğunluğunda büyütülen güneş pilinin karanlıkta açık devre gerilimi uygulandığında elde edilen elektrolüminesans görüntüsü (sol) ve fotoğrafı (sağ)

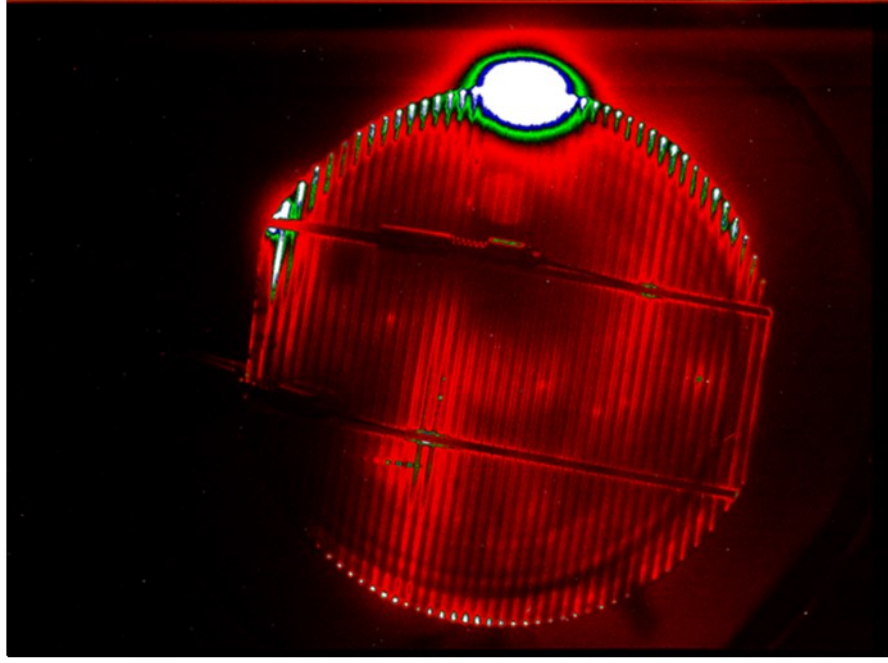
EL görüntüsünden de görüldüğü gibi güneş pilinin kontak noktalarının yakın çevresindeki elips şeklindeki bir alan yüksek verimle çalışmakta, geriye kalan bölgelerin ise ölçülen akıma katkıları belirgin biçimde düşüktür. Bu üst elektrot yüzey iletkenliğinin geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir. 5000 ppm'de büyütülen güneş pilini geliştirme için bir seri çalışma yapılmıştır bu amaçla, n-türü katkılı ve katkısız tabakaların kalınlıkları azaltılarak optimize edilmiştir. Arka yüzey büyütülmeden önce yüzey oksidini tekrarlanabilir şekilde kaldırabilmek için hidrofobik yüzey elde edene kadar %2 HF içerisine batırılmıştır. Üst elektrot olarak Al yerine çok daha kalın Al/Ag alaşımı elektrotlar kullanılmaya başlanmıştır. Sonuç olarak elde edilen Al/Ag üst elektrot/AZO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Al arka elektrot güneş pilinin AM1.5G aydınlatma altında ölçülen I/V eğrisi Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15 Optimizasyon öncesi ve sonrası elde edilen güneş pilinin AM1.5G aydınlatma altında I/V eğrisi.

Arka yüzey kusurlarının daha iyi pasivasyonu ve geliştirilen üst elektrot sonucunda güneş pilinin verimi % 4.7 % 9.2'ye artmıştır. Kısa devre akımı açıkça artarken, açık devre gerilimi 22 mV gibi hafifçe artmıştır. Bunun nedeni c-Si/a-Si:H ara yüzeyinde bir epitaksiyel tabaka olmasıdır. Sahip olduğu 72 cm^2 aktif alan nedeniyle literatürdeki p-tipi <100> yönelimli c-Si alttaban üzerine üretilmiş en geniş aktif Tek Eklem güneş pili olma özelliğine sahiptir.

Güneş pilinin karanlıkta açık devre gerili uygulandığında ölçülen EL görüntüsü Şekil 4.16'da verilmiştir. Görüntüden güneş pilinin çok daha geniş bir bölgesinin akıma katkıda bulunduğu görülmektedir. Karanlık bölgelerin, homojenliği azalan, 10-20 A kalınlığında katkısız tabakanın yüzeyi etkin bir şekilde teskin (pasive) edememesinden kaynaklandığına inanılmaktadır.



Şekil 4.16 Optimizasyon sürecinden sonra elde edilen güneş pilinin karanlıkta açık devre gerilimi uygulandığında elde edilen EL görüntüsü.

4.1.6 n-tipi katkılı ve katkısız filmlerin 225 °C'den düşük sıcaklıklarda ve hidrojen seyreltmesi ile katkılı filmlerin hazırlanması

Daha önce yapılan çalışmalar katkılı ya da katkısız a-Si:H filmler yüzey pasivasyonu için kullanıldığında en iyi sonuçların 200 °C civarındaki dar bir bölgedeki biriktirme sıcaklıklarında alındığını göstermiştir [72]. Biriktirme sıcaklığı ile ilgili yaptığımız çalışma sonucunda ortaya çıkan 225 °C sıcaklık değeri bu bulguyla uyumludur.

Ancak HRTEM ve SE ölçümlerinin sonuçları 225 °C'de büyütülen katkısız a-Si:H tabakalarının başlangıçta kısmen epitaksiyel olarak büyüdüğünü göstermiştir. Bu nedenle c-Si yüzeyinin pasivasyonu olumsuz etkilenmektedir.

En uygun biriktirme sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda hidrojen zengin filmler büyütülüp 130 °C-150 °C sıcaklıklarda başlayan hidrojen difüzyonu [75] ile hacimsel ve arayüzey kusurları pasive edilebilir ve epitaksiyel büyüme engellenebilir [73]. Bunlara ek olarak biriktirme sonrası filmlerin tavlama a-Si:H tabakanın iyileşmesini sağlar [76].

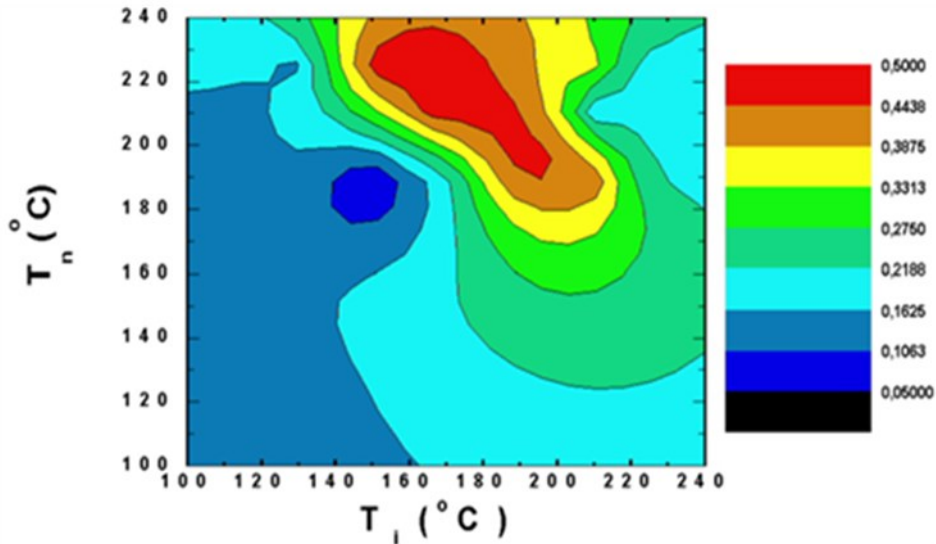
Bu amaçla en uygun alttaban sıcaklığımızdan daha düşük sıcaklıklarda ve hidrojen seyreltmesi yaparak bir seri güneş pili büyüttük. Hidrojen seyreltme oranı

$R_H=[H_2]/[SiH_4]=10$ olarak seçtik. Proses gazlarının plazmalarını ateşleyebilmek amacıyla basıncı 0.8 Torr değerine arttırdık. Katkısız tabakaların biriktirme süreleri 60 s, katkı tabakaların biriktirme süreleri ise 120 s olmak üzere üretilen filmler ile ilgili PECVD parametreleri aşağıdaki Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Düşük sıcaklıklarda büyütülen güneş pillerinin biriktirme parametreleri

Set	i Tabaka T_i (°C)	n Tabaka T_n (°C)	R_H [H ₂]/[SiH ₄]	Basıncı (Torr)	Güç yoğunluğu (mW/cm ²)
I	100 ... 225	100 ... 225 ($T_i=T_n$)	0	0.8	12
II	100 ... 225	100 ... 225 ($T_i=T_n$)	10		
III	100 ... 225	190 and 225			

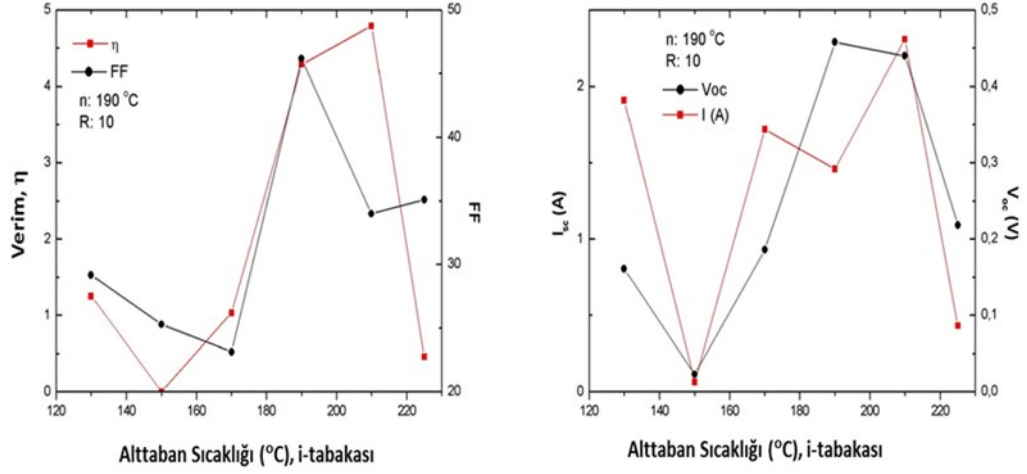
Bu şekilde hazırlanan güneş pillerinin katkısız tabaka ve katkı tabaka sıcaklıklarına göre açık devre gerilimlerinin değişimi şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17 (i) ve (n) alttaban sıcaklıkları ile V_{OC} değişimi [60]

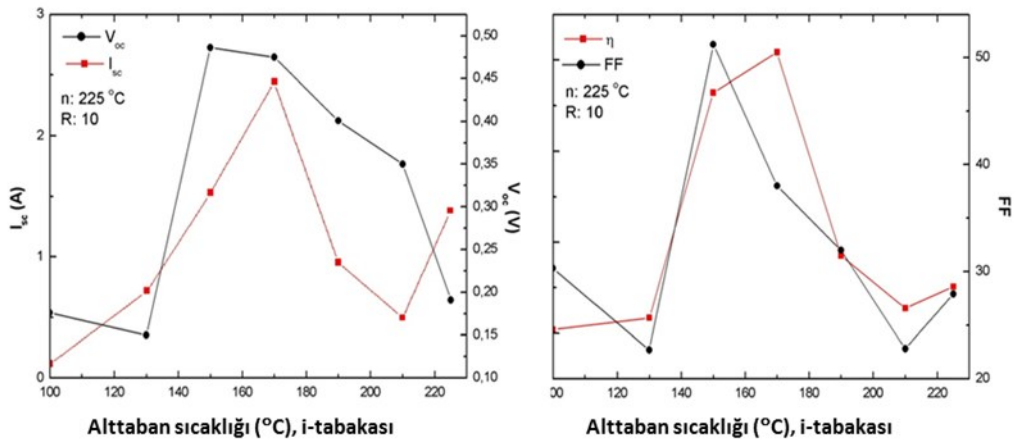
Elde edilen sonuçları iki ayrı grupta toplanabilmektedir. Birinci grup 190 °C ve daha yüksek alttaban sıcaklıklarında büyütülen filmler olup, en yüksek verim alttaban

sıcaklığı hem katkısız hem de katkılı tabaka için 190 °C olduğu durumda gözlenmiştir (şekil 4.18). Sıcaklık daha da arttırıldığında verimin düştüğü görülmüştür.



Şekil 4.18 Katkısız tabaka sıcaklığına göre Verim, FF, V_{oc} ve I_{sc} değişimi

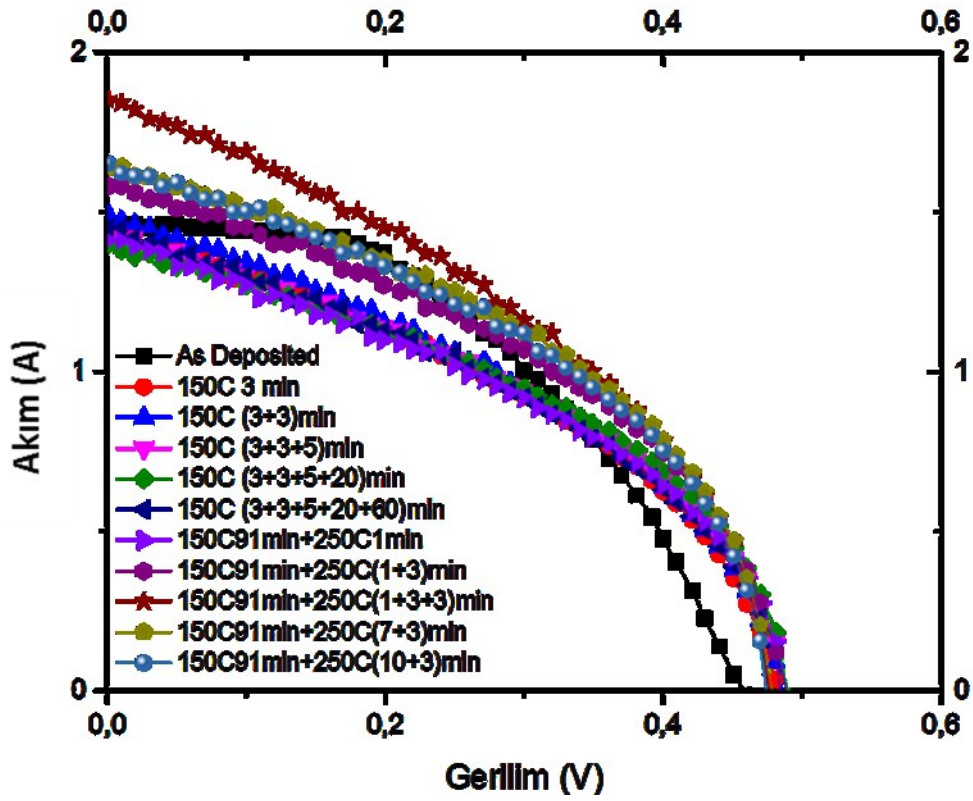
İkinci gruptaki güneş pilleri ise, 190 °C'den daha düşük sıcaklıklarda büyütülmüştür. Bu filmler için katkısız tabaka 150 °C-170 °C aralığında büyütüldüğünde verim daha yüksektir (şekil 4.19).



Şekil 4.19 Katkısız tabaka sıcaklığına göre Verim, FF, V_{oc} ve I_{sc} değişimi

Bu piller yüksek sıcaklık homojenliğe sahip sıcak bir tabla üzerinde tavlansmıştır. Tavlama sıcaklığı olarak güneş pilinin gösterdiği tepki referans alınarak 150 °C ve 200

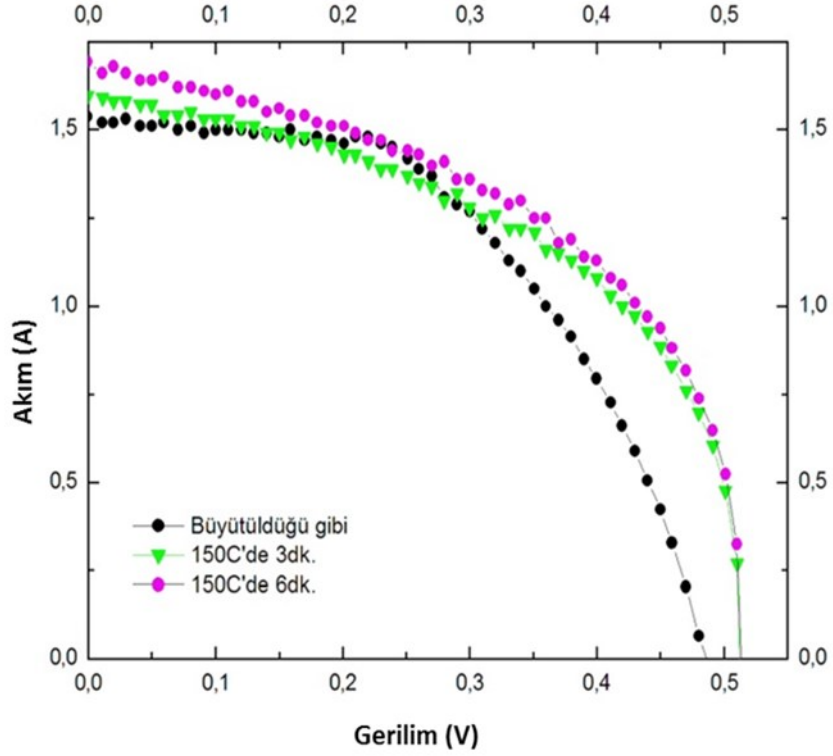
$^{\circ}\text{C}$ 'de farklı süreler denenmiştir. Katkısız ve n-türü katkılı a-Si:H tabakaları 190°C 'de büyütülen H073 olarak adlandırdığımız güneş pilinin I-V karakteristiği ve tavlama ile değişimi Şekil 4.20'de verilmiştir Tavlama sonucunda açık devre gerilimi ve kısa devre akımının iyileştiği gözlenmektedir. Bu değişim, 250°C 'de 7dk. Süreyle tavlamaya kadar devam etmekte ve daha uzun süreli tavlamalarda kısa devre akımı ve dolayısı ile pil verimliliği azalmaya başlamaktadır. Tavlamanın tüm aşamaları için doluluk faktörü düşük olduğu görülmüştür. 250°C 'de 7dk. tavllanmış pilin verimi %4.97 ve doluluk faktörü %40.63'tür.



Şekil 4.20 a-Si:H tabakaları 190°C 'de büyütülen güneş pilinin farklı sıcaklıklarda tavlama ile I/V eğrisinin değişimi

Katkısız tabakası 150°C ve n-türü katkılı a-Si:H tabakası 225°C 'de büyütülen güneş pilinin I/V karakteristiği ve tavlama ile değişimi Şekil 4.21'de verilmiştir. Güneş pilinin tavlama sonucunda açık devre gerilimi ve kısa devre akımının iyileştiği gözlenmektedir. Bu şekilde, açık devre gerilimi 0.5 V 'un üzerine çıkmıştır. Doluluk faktörü bir önceki pile göre iyileşmiştir. 150°C 'de 6dk. tavllanmış pilin verimi %6.28, doluluk oranı %52, kısa devre akımı 1.69 A ve açık devre gerilimi 523 mV 'tur. Bu pillerin

daha yüksek sıcaklıkta büyütülenlere göre ısıl açıdan daha kararlı olduğu gözlenmiştir [77].



Şekil 4.21 Katkısız a-Si:H tabakası 150°C'de ve n-türü tabakası 225°C'de büyütülen güneş pilinin 150°C'de farklı süreler tavlanması ile I/V eğrisinin değişimi.

4.2 Silisyum alt oksitlerin tampon ve yağgıç olarak hazırlanması ile elde edilen sonuçlar

4.2.1 Silisyum alt oksitlerde optik bant aralığının kontrolü

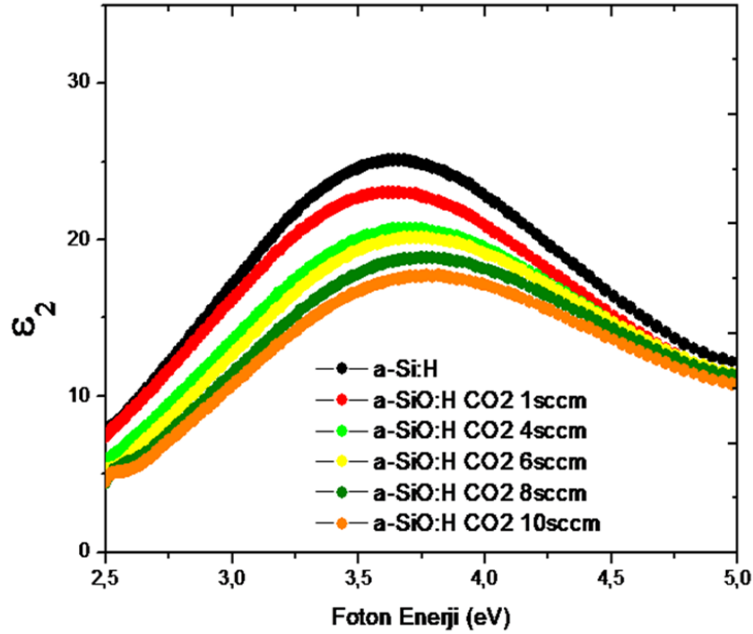
Heteroeklem güneş pillerinde, yüzey pasivasyonu için kullanılan (i) a-Si:H tabakasının yüksek sıcaklıkta (>130°C) oluşturulması c-Si üzerinde güneş pilinin kısa devre akımının ve dolayısıyla performansının ciddi biçimde düşmesine neden olan bir epitaksiyel olarak büyümüş tabaka oluşturduğu bilinmektedir [78]. Epitaksiyel büyüme a-Si:H i tabakası büyümesinin kontrolünü güçleştirir. a-Si:H katkısız tabakalarının optimum biriktirme şartlarının

a-Si:H/epi-Si faz sınırlarında bulunması nedeniyle güneş pili üretiminde tekrarlanabilirlik elde edilmesini zorlaştırır.

c-Si alttabanlar üzerindeki epi-Si büyümesi (i) a-Si:H tabakasının yerine a-SiO:H tabakası kullanılması sayesinde bastırılabilir. a-SiO:H i tabakası epi-Si tabakaları oluşturmadan deposition koşullarını özgürce değiştirmemize imkân verir Ayrıca geniş optik bant aralığına sahip a-SiOx:H tabaka kullanıldığında güneş pilinin mavi ışığa cevabını geliştirmektedir [79].

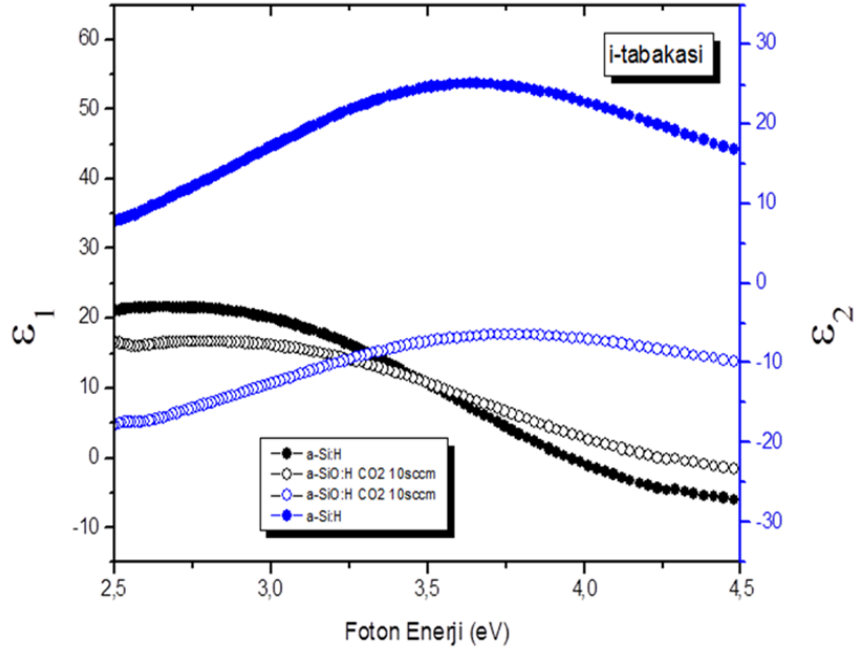
Optik bant aralığının a-SiOx:H filmlerindeki oksijen oranıyla değişimini belirlemek amacıyla kuartz camların üzerine farklı oksijen oranlarında a-SiOx:H filmler büyüttük.

Kuartz camlar izo propil alkol ve de iyonize su ile temizlendi. Alttaban sıcaklığı 190 °C, 3W 13,56 MHz RF güçte, 1 saatlik biriktirme süresinde, 0,8 Torr gaz basıncında $[H_2]/[SiH_4]=10$ oranında olacak şekilde 0 sccm-10 sccm arasında değişen CO_2 akışlarındaki gaz karışımında PECVD yöntemi kullanılarak cam üzerine film örnekleri hazırladık. Elde edilen örneklerin spektroskopik elipsometre ile reflektans ölçümlerini yaptık. İmajiner dielektrik sabitinin foton enerjisine bağımlılığı şekil 4.22'de görülmektedir.



Şekil 4.22 katkısız a-SiOx:H filmlerde CO_2 oranının artışı ile ϵ_2 ve foton enerjisinin değişimi

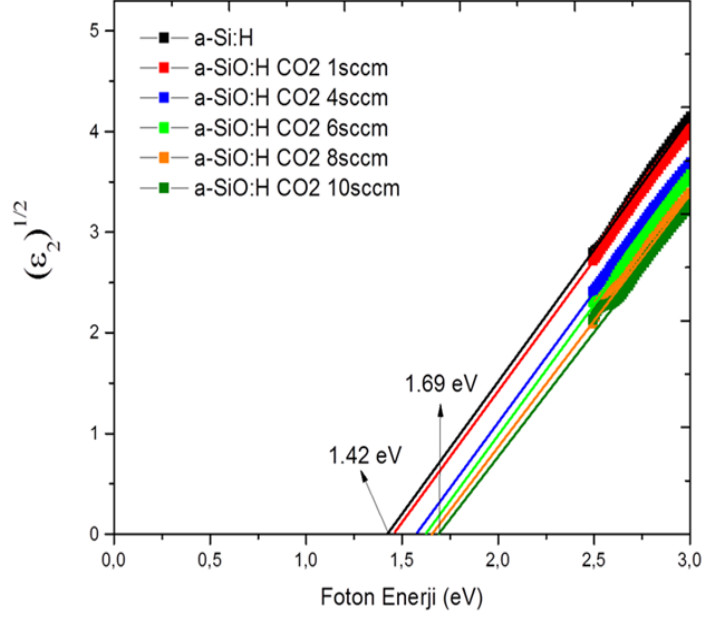
Kuartz alttaban üzerine hazırlanmış olduğumuz a-SiO_x:H örneklerin dielektrik sabitinin a-Si:H'a göre azalma gösterdiğini gözlemledik. Bu duruma örnek olarak [SiH₄]/[CO₂]=10/10 sccm katkı oranlı örnek için dielektrik sabiti-foton enerji değişim grafiği şekil 4.23'te görülmektedir.



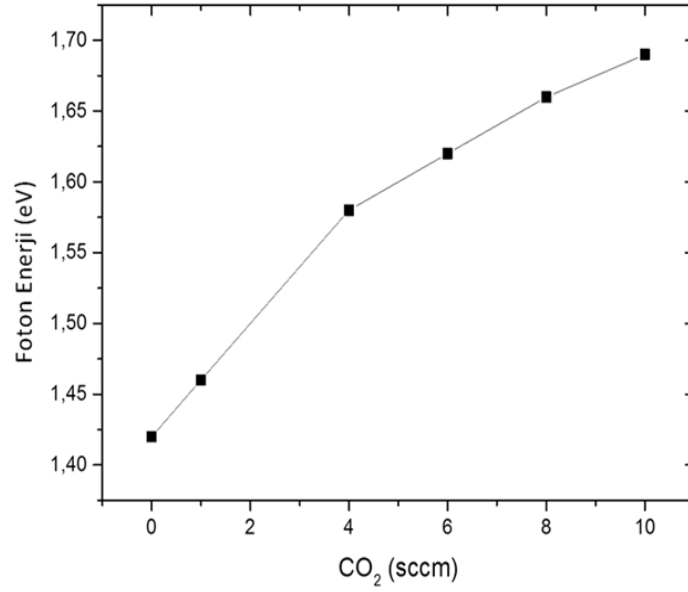
Şekil 4.23 a-SiO_x:H örneklerin dielektrik sabitinin a-Si:H'a göre azalması

a-SiO_x:H'nin dielektrik fonksiyonunun azalması, a-SiO_x:H kırılma indisinin a-Si:H'tan düşük olmasını gösterir. Bunun nedeni ise a-SiO_x:H tabakasının oldukça gözenekli yapıda olmasıdır [80].

Örneklerin $(\epsilon_2)^{1/2}=0$ nin enerji konumundan tahmin edilmiş optiksel bant aralıklarının (Cody gap) - (ϵ_2) ve CO₂ akışı ile değişimleri sırasıyla şekil 4.24 ve şekil 4.25'te verilmiştir. Bu grafiklerden CO₂ oranının artması ile foton enerjisinin daha büyük değerlere doğru kaydığı görülmektedir.



Şekil 4.24 a-SiO_x:H örneklerin optiksel bant aralığının (ϵ_2) ile değişimi



Şekil 4.25 a-SiO_x:H örneklerin optiksel bant aralığının CO₂ akışı ile değişimi

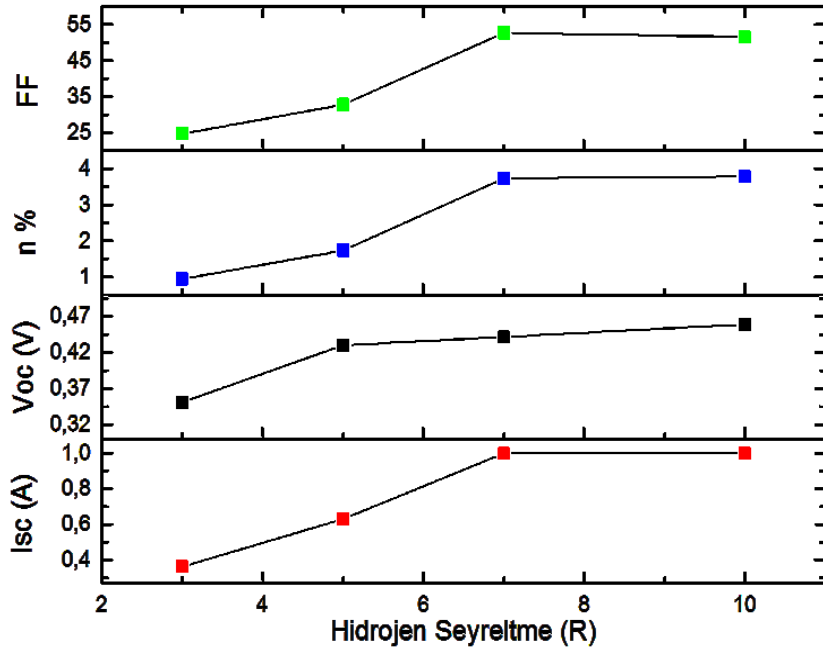
4.2.2 Tampon tabakası olarak a-SiO_x:H (i) için H₂ seyreltmesinin incelenmesi

Hidrojen seyreltme oranı arttıkça a-Si:H filmlerin kristalliliğini arttırdığı bilinmektedir [81]. Tampon tabaka olarak a-SiO_x:H kullanılması durumunda güneş pilinin performansının H₂ seyreltmesi ile nasıl değiştiğini incelemek amacıyla bir seri güneş pili üretilmiştir. K2 yöntemi ile temizlenmiş p-tipi (Boron) katkılı, <100> yönelimli 1-20 Ω c-Si alttabanlar kullanarak bir Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si_{0.96}O_{0.04}:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri ürettik. Bu pillerin PECVD parametreleri aşağıdaki Çizelge 4.2’de verilmiştir.

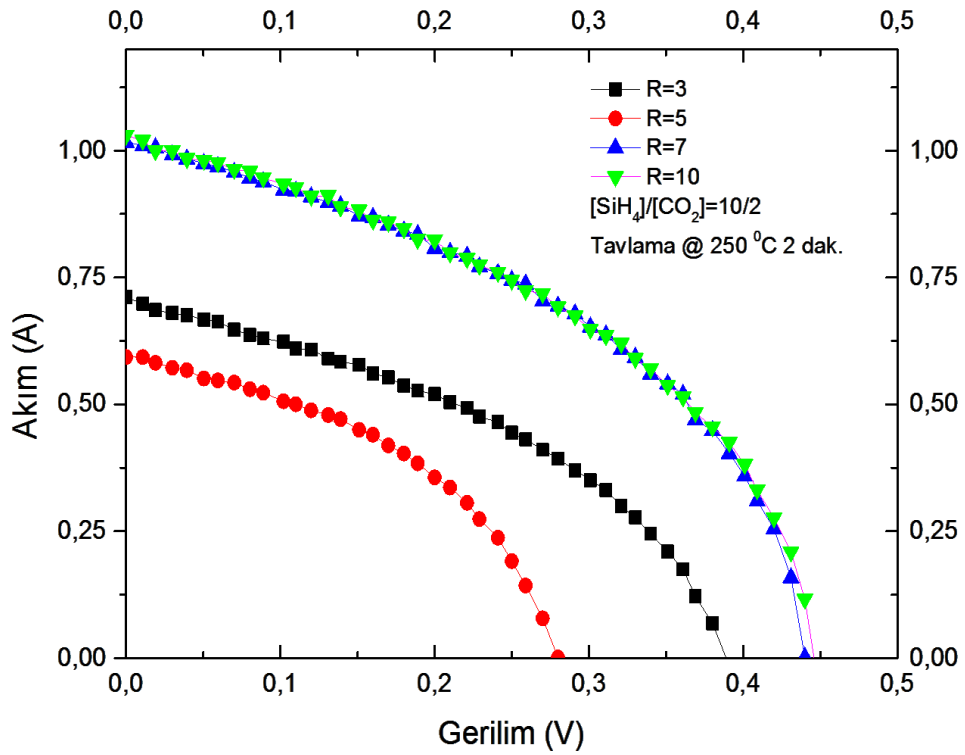
Çizelge 4.2 Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si_{0.96}O_{0.04}:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri için PECVD parametreleri

Tabaka	T _S	t _{Birikirme}	R _H	P _{RF}	Gaz Basıncı	SiH ₄ Akışı	PH ₃ Akışı	CO ₂ Akışı
a-SiO _x :H (i)	190°C	45 sn	10-3	3W	0,8 Torr	10 sccm	-	2 sccm
a-Si:H (n)	190°C	20 sn	-	3W	0,8 Torr	40 sccm	20 sccm	-

Hidrojen seyreltme oranı arttıkça üretilen güneş pillerinin büyütüldükleri gibi ölçülen I_{SC}, V_{OC}, verim ve doluluk faktörlerinin arttığı şekil 4.26’da görülmektedir. Bu piller yüksek sıcaklık homojenliğe sahip sıcak bir tabla üzerinde 250°C’de farklı sürelerde tavlama yapılmış ve şekil 4.26’da verilen I-V karakteristikleri ölçülmüştür. Tavlama süresi 2 dakikaya kadar en yüksek açık devre gerilimi ve kısa devre akımı değerleri R=7 ve R=10 hidrojen seyreltme oranlarında büyütülmüş pillerde elde edilmiştir. Tavlama süresi 2 dakikayı aştığında R=3 ve R=5 hidrojen seyreltme oranlarında büyütülmüş güneş pillerinin açık devre gerilimi ve kısa devre akımlarının ciddi biçimde düştüğü görülmüş, R=7 ve R=10 hidrojen seyreltme oranlarında büyütülmüş güneş pillerinde ise bir değişiklik gözlenmemiştir.

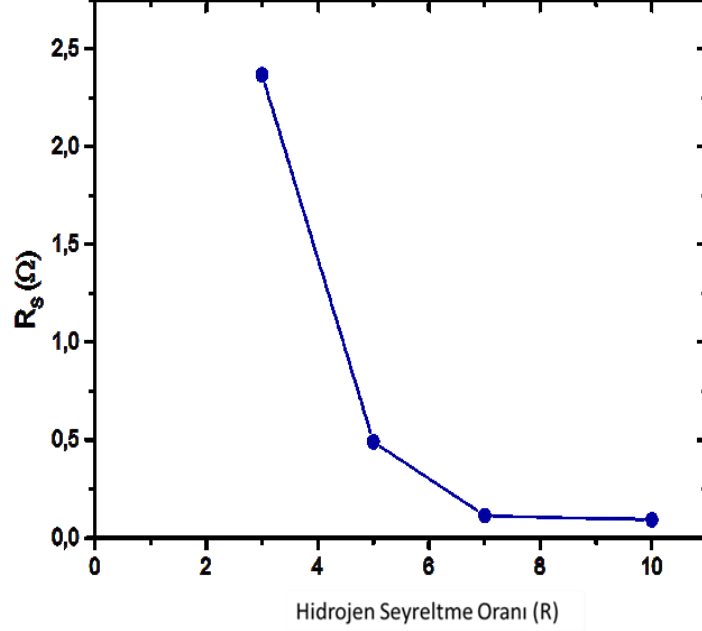


Şekil 4.26 Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si_{0.96}O_{0.04}:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri için Hidrojen seyreltme oranı ile güneş pili karakteristiklerinin değişimi



Şekil 4.27 Hidrojen seyreltme oranlarına göre 250 °C de 2 dakika tavlama ile I-V karakteristikleri değişimi

Hidrojen seyreltme oranı arttıkça tavlanmamış pillerin seri dirençlerinde arayüzey pasivasyonun iyileşmesinden kaynaklanan düşüş şekil 4.28’de görülmektedir.



Şekil 4.28 Hidrojen seyreltme oranı ile seri direnç değişimi

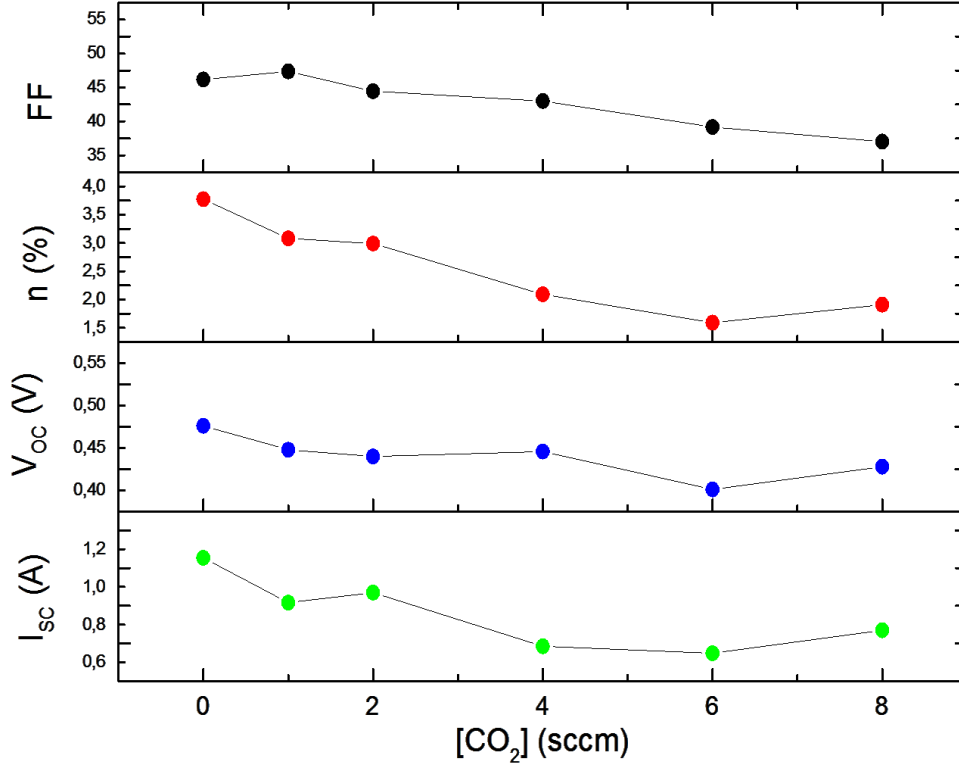
4.2.3 Tampon tabakası olarak a-SiO_x:H (i) için [SiH₄]/[CO₂] oranının belirlenmesi

Tampon tabakası olarak a-SiO_x:H kullanıldığında, en uygun [SiH₄]/[CO₂] oranını belirlemek için K2 yöntemi ile temizlenmiş p-tipi (Boron) katkı, <100> yönelimli 1-20 Ω c-Si alttabanlar kullanarak Al grid/a-Si:H (n)/a-SiO_x:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri ürettik. Bu pillerin PECVD parametreleri Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Al grid/a-Si:H (n)/a-SiO_x:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri için PECVD parametreleri

	T_s	$t_{\text{Biriktirme}}$	R_H	P_{RF}	Gaz Basıncı	SiH ₄ Akışı	PH ₃ Akışı	CO ₂ Akışı
a-SiO _x :H (i)	190°C	60 sn	10	3W	0,8 Torr	10 sccm	-	0-8 sccm
a-Si:H (n)	190°C	120 sn	-	3W	0,8 Torr	40 sccm	20 sccm	-

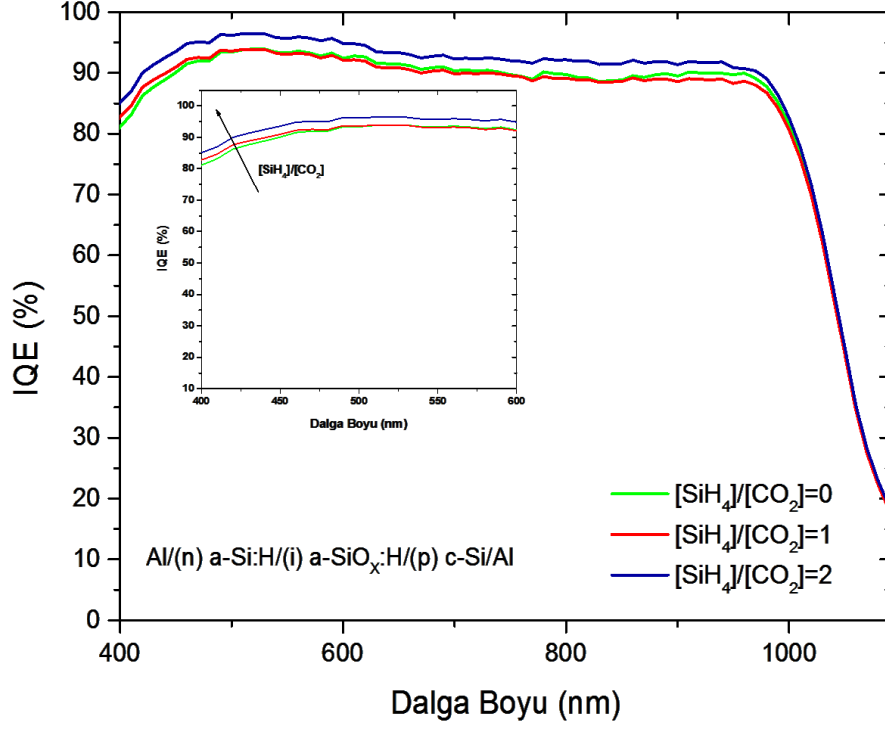
Bu piller yüksek sıcaklık homojenliğe sahip sıcak bir tabla üzerinde tavlama yapılmıştır. Tavlama sıcaklığı olarak güneş pilinin gösterdiği tepki referans alınarak 150 °C ve 250 °C’de farklı süreler denenmiştir. Üretilen güneş pillerinin AM1.5G aydınlatma altında ölçülen karakteristik parametreleri şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29 Al grid/a-Si:H (n)/a-SiOx:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri için I_{sc}, V_{oc}, FF ve η değerlerinin CO₂ akışıyla değişimi

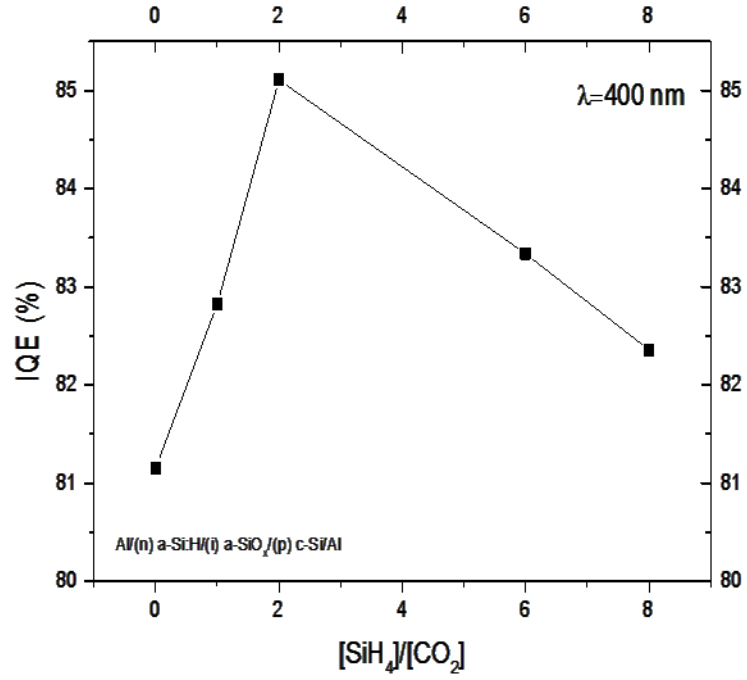
Tavlama sonrasında [SiH₄]/[CO₂] oranı 10/0 dan 10/2 'ye kadar olan örneklerden en yüksek verimin gözlenmiştir. Güneş pilinin elektriksel karakteristiklerinin SiH₄/CO₂ akış oranı artması ile olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir. [SiH₄]/[CO₂] oranı 0'dan - 2'ye kadar artarken güneş pilinin en yüksek elektriksel karakteristiklere sahip olması pasivasyon kalitesini iyileştirdiğini göstermektedir. [SiH₄]/[CO₂] oranı 2'den daha büyük olduğu değerlerde üretilen pillerde I_{sc}, V_{oc}, FF ve η parametrelerinde gözlenen düşüşün a-SiOx:H (i) tampon tabakasındaki oksijen miktarı artması ile beraber artan karbon miktarının neden olduğu yüksek kusur yoğunluğu ile açıklanabilir [82].

Bu sonuçlar IQE ölçümleri de desteklemektedir. $[\text{SiH}_4]/[\text{CO}_2]$ oranı 0'dan -2'ye kadar artarken güneş pilinin iç kuantum verimi kızıl ötesi bölge hariç tüm dalga boylarında %5 civarında artış gösterdiği şekil 4.30'da görülmektedir.



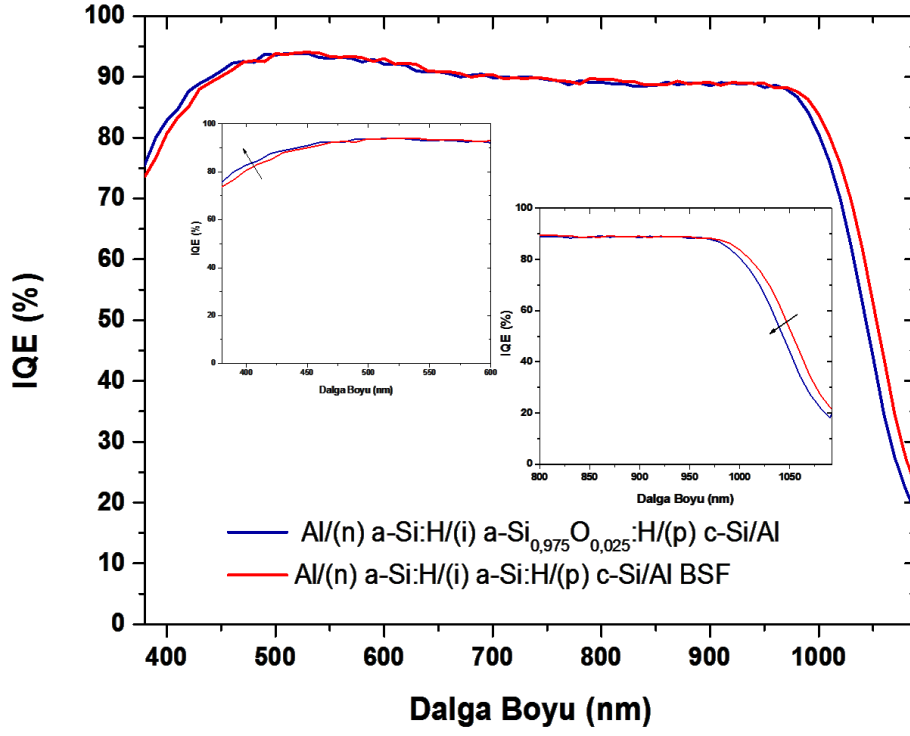
Şekil 4.30 (i) a-SiO_x:H tabakasının $[\text{SiH}_4]/[\text{CO}_2]$ oranı ile IQE artışı

$[\text{SiH}_4]/[\text{CO}_2]$ oranı 2'den daha büyük değerlerde ise IQE düşüş göstermeye başlamaktadır. Şekil 4.31'de mavi ışık bölgesinde $[\text{SiH}_4]/[\text{CO}_2]$ oranı ile IQE'nin değişimi görülmektedir.



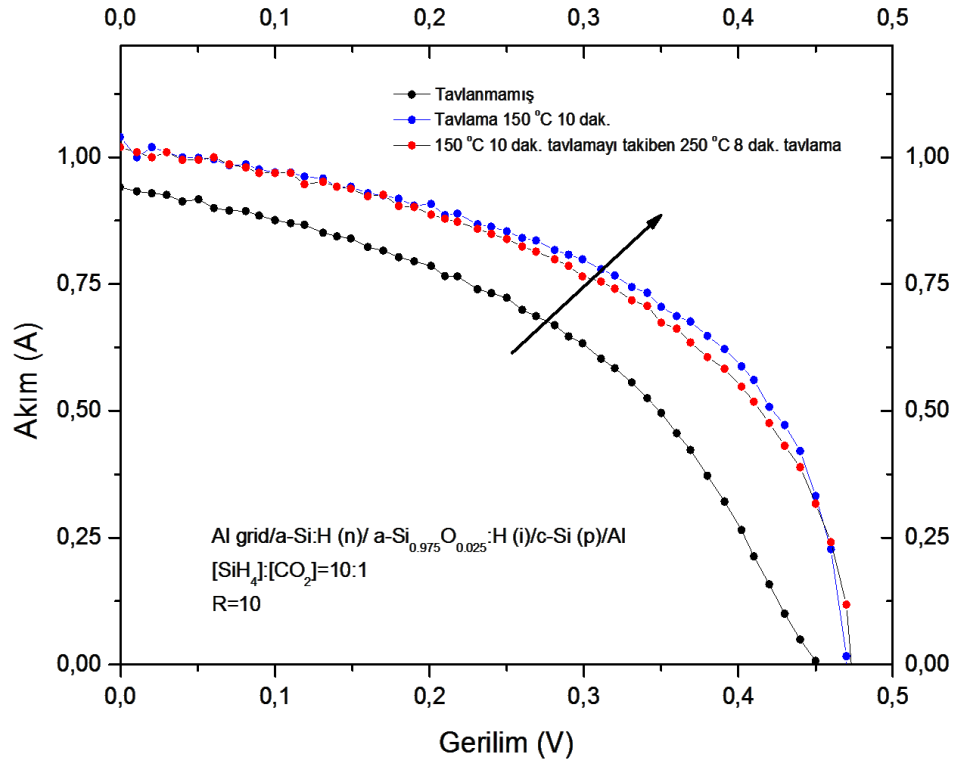
Şekil 4.31 (i) a-SiO_x:H tabakasının [SiH₄]/[CO₂] oranı ile mavi ışık bölgesinde IQE değişimi

Standart Al/(n)a-Si:H/(i)a-Si:H/(p)c-Si/Al BSF yapısındaki güneş pili ile Al/(n)a-Si:H/(i)a-Si_{0,975}O_{0,025}:H/(p)c-Si/Al yapısındaki güneş pillerini kıyasladığımızda şekil 4.32’de IQE’nin mavi ışık bölgesinde arttığını görmekteyiz. Diğer taraftan kırmızı ışık bölgesinde Al/(n)a-Si:H/(i)a-Si:H/(p)c-Si/Al BSF yapısındaki güneş pilinde IQE’nin %5 civarında daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni Al BSF’in etkisi ile arka tarafta toplama veriminin artışı ile açıklanabilir.



Şekil 4.32 Standart Al/(n)a-Si:H/(i)a-Si:H/(p)c-Si/Al BSF yapısındaki güneş pili ile Al/(n)a-Si:H/(i)a-Si_{0.975}O_{0.025}:H/(p)c-Si/Al yapısındaki güneş pillerinin mavi ışık ve kırmızı ışık bölgesinde IQE değişimleri

Tavlama sonrası en yüksek verim elde edilen a-SiO_x:H (i) tampon tabakalı güneş pili, 1 sccm [CO₂] katkılı, (a-Si_{0.975}O_{0.025}:H) i tabakalı olup, I-V karakteristiği ve tavlama ile değişimi Şekil 4.33'de verilmiştir.



Şekil 4.33 Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si_{0.975}O_{0.025}:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pili için tavlama ile I-V karakteristiği değişimi

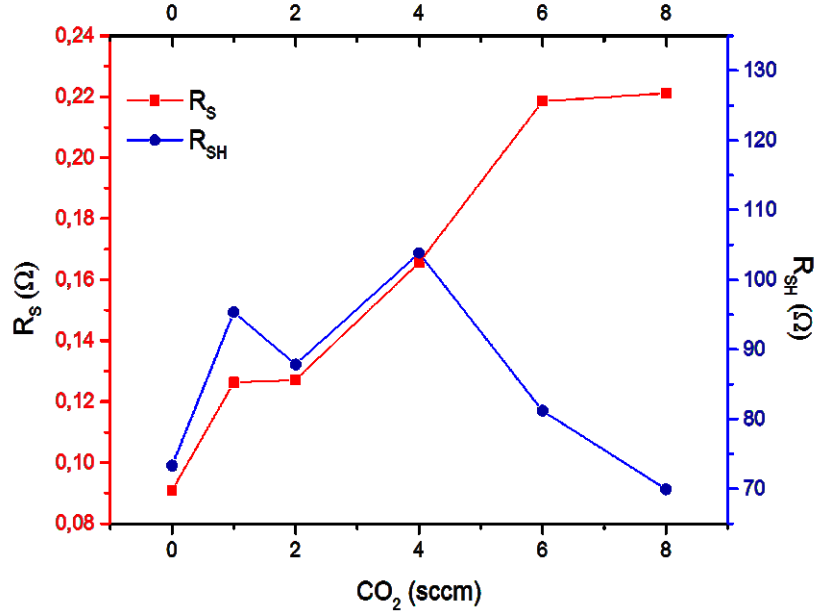
Ürettiğimiz tüm güneş pilleri düşük sıcaklıklarda (150°C-250°C) tavlendiğinde elektriksel karakteristikleri iyileşmiştir. Bu artış, 250 °C’de 4dk. süreyle tavlamaya kadar devam etmekte ve daha uzun süreli tavlamalarda kısa devre akımı ve dolayısı ile pil verimliliği değişmemektedir. Tavlamanın tüm aşamaları için doluluk faktörü düşük olduğu görülmüştür. 250°C’de 4dk. tavllanmış pilin verimi %3.33 ve doluluk faktörü %49.86’dır. Literatürde [82], n-tipi Si-FZ alttabanlar için 3 saat 250 °C tavlama sonucu a-SiOx:H filmlerin pasivasyon kalitesinin arttığı belirtilmekte ve bunun olası sebepleri:(i) a-SiOx:H yüzeyindeki kopuk Si bağlarının Hidrojen ile doyurulması ya da (ii) amorf örgünün mikroskobik yapısında oluşan Si-(OH)_x ve Si-O-Si bağları olarak açıklanmaktadır [82].

Daha önce gördüğümüz tampon tabaka olarak a-Si:H kullanılan H073 numaralı pil ile bu güneş pilinin tavlama sonrası ölçülen en yüksek değerli I_{SC}, V_{OC}, FF, η, R_S ve R_{SH} parametrelerinin karşılaştırıldığı Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si_{0.975}O_{0.025}:H (i)/c-Si (p)/Al ile Al grid/a-Si:H (n)/a-Si:H (i)/c-Si (p)/Al BSF karşılaştırma tablosu

	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)	η (%)	FF (%)
Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si _{0.975} O _{0.025} :H (i)/c-Si (p)/Al	1.02	0.473	100	0.101	3.33	49.86
Al grid/a-Si:H (n)/a-Si:H (i)/c-Si (p)/Al BSF	1.83	0.476	31	0.115	4.97	40.63

Seri direncin CO₂ akışı arttıkça arttığını 150 °C ve 250 °C’de farklı sürelerde tavlama sonrası I/V grafiklerinden belirlenen şekil 4.34’te verilen seri ve şönt dirençlerin değişim grafiğinde görmekteyiz.



Şekil 4.34 Al grid/a-Si:H (n)/a-SiOx:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pillerinin seri ve şönt dirençlerinin CO₂ akışı ile değişimi

Düşük seri direnç ve yüksek şönt direnci. Seri ve şönt direnci değerleri AM 1.5 aydınlatma altında 25 °C sıcaklıkta ölçülen I/V karakteristiğinden doğrusal fit ile elde edilmiştir.

Bir güneş pilinde tüm tabakalara ve ara yüzeylere bağımlılık gösterdiği için Doluluk Faktörü (FF) analizi en zor olan parametredir. Özellikle çok sayıda tabaka ve arayüzey bulunan heteroeklem güneş pillerinde bu analiz daha da güçleşmektedir. Aşağıdaki

Çizelge 4.5'te I_{sc} , V_{oc} ve FF'ün etkilendiği parametrelerin özet bir tablosu görülmektedir.

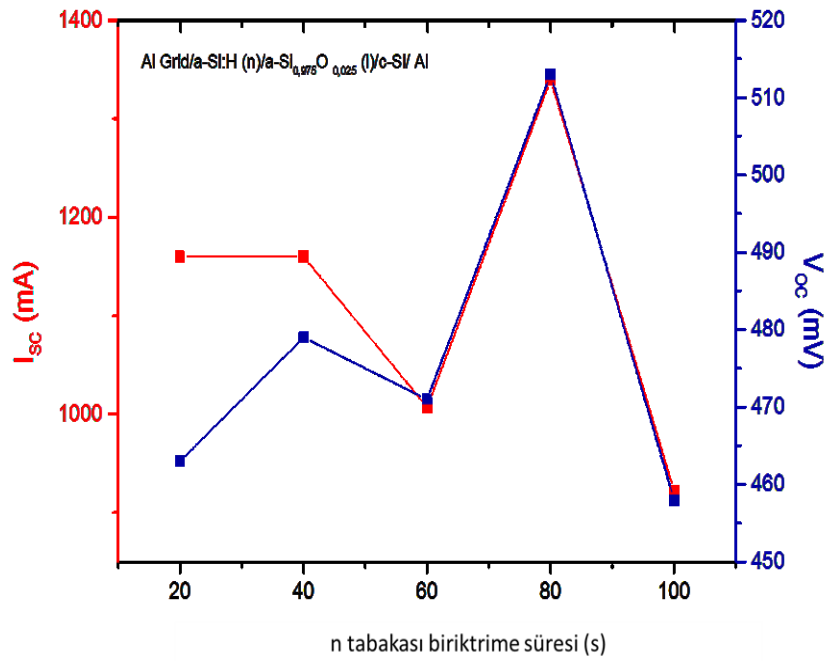
Çizelge 4.5 Heteroeklem güneş pilinde farklı tabaka ve ara yüzeylerin verimi belirleyen karakteristik parametrelere olan etkisi

Tabaka	V_{oc}	I_{sc}	FF
ön-metal grid	-	xxx	xxx
arayüzey 1 metal/TCO	-	x	xx
ön-TCO	x	xxx	xxx
arayüzey 2 TCO/a-Si:H	x	x	xx
ön a-Si:H	xx	xxx	xxx
arayüzey 3 a-Si:H /c-Si	xxx	-	xx
c-Si	xx	xxx	x
arayüzey 4 c-Si/a-Si:H	xxx	-	x
arka a-Si:H	xx	-	x
arayüzey 5 a-Si:H/TCO	x	x	x
arka TCO	x	x	x
arayüzey 6 TCO/metal	-	x	xx
arka metal	-	x	xx

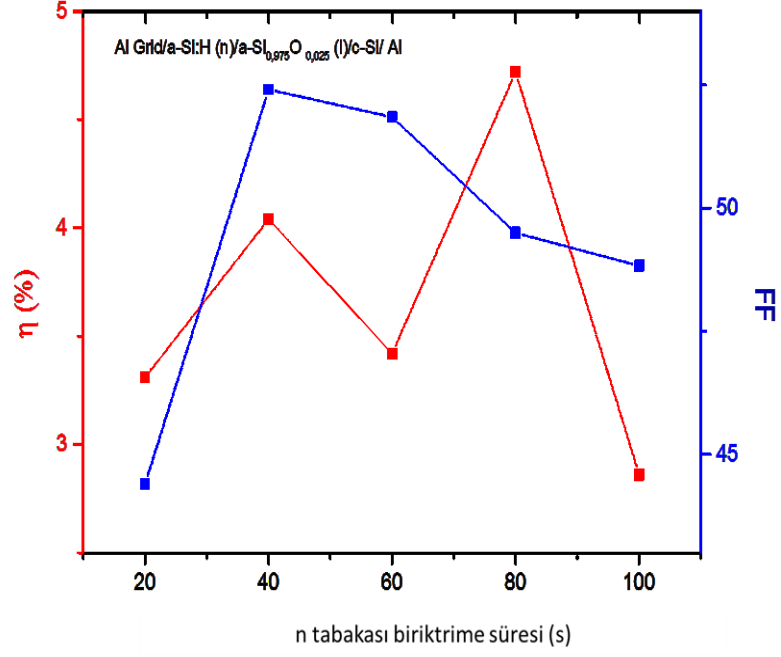
Tabloda tüm tabaka ve ara yüzeylerin FF'ü etkilediği görülmektedir. Özellikle ise seri direnç doğrudan FF'ü etkileyen bir parametredir. Seri direnç daha az iletken olan tabakalar (tampon), a-Si:H/c-Si arayüzey ve metal kontaklar ile değişir. Bu nedenle a-Si_{0.975}O_{0.025}:H (i) tabakalı pilin FF değerindeki gelişmenin nedeni daha düşük seri dirence sahip olmasından kaynaklandığı düşünülebilir.

Tampon tabaka olarak a-SiO_x:H kullanıldığında epi tabakanın bastırılması nedeniyle daha önce de gördüğümüz gibi c-Si üzerinde büyütülen filmin daha az pürüzlü olması beklenir. Bunun bir sonucu olarak n-tipi takanın büyüme hızının nasıl etkilendiğini görmek ve optimum (n) a-Si:H tabaka kalınlığını belirlemek için bir çalışma yaptık. Bu amaçla bir seri güneş pili ürettik. K2 yöntemi ile temizlenmiş p-tipi (Boron) katkılı, <100> yönelimli 1-20Ω 525 μm kalınlıklı c-Si alttabanlar kullanarak üretilen Al üst elektrot/a-Si:H (n)/ a-Si_{0.975}O_{0.025}:H (i)/c-Si (p)/Al arka elektrot yapısındaki bu güneş

pillerde (i) tabakasının biriktirme süresini 60 saniye’de sabit tuttuk. $[\text{SiH}_4]:[\text{PH}_3]=40:20$ oranında n-tipi katkılanmış a-Si:H tabakalarının biriktirme süreleri 20-100 s aralığında değiştirilerek 72 cm^2 yüzey alanlı güneş pilleri ürettik. Bu pilleri I-V karakteristiklerinin tavlama sıcaklığına ve süresine cevabı referans alınarak yüksek sıcaklık homojenliğe sahip sıcak bir tabla üzerinde önce $150 \text{ }^\circ\text{C}$ sonra $250 \text{ }^\circ\text{C}$ de tavladık. Bu pillerin AM1.5G aydınlatma altında ölçülen I_{SC} , V_{OC} ve FF, verim parametrelerinin biriktirme süresiyle değişimi sırasıyla şekil 4.35 ve şekil 4.36’da görülmektedir.



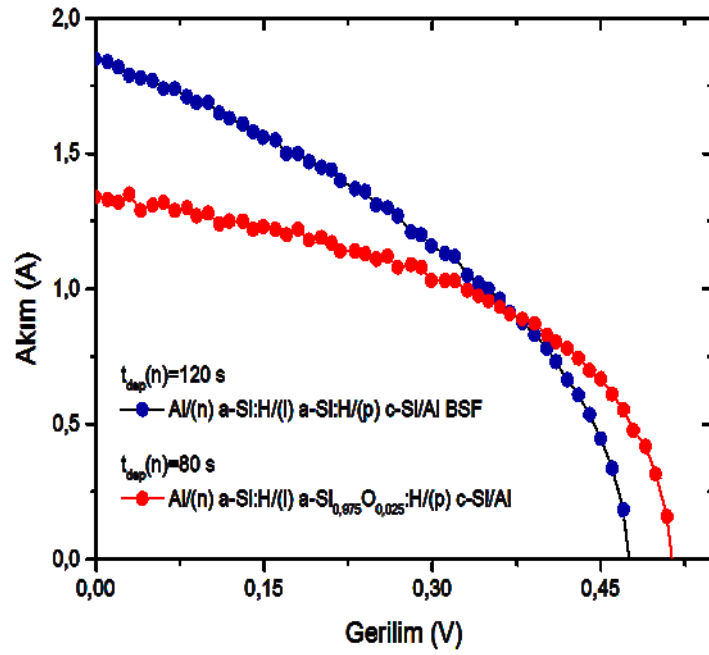
Şekil 4.35 n-tipi katkı tabaka biriktirme süresi ile I_{SC} ve V_{OC} değişimi



Şekil 4.36 n-tipi katkılı tabaka biriktirme süresi ile FF ve verim değişimi

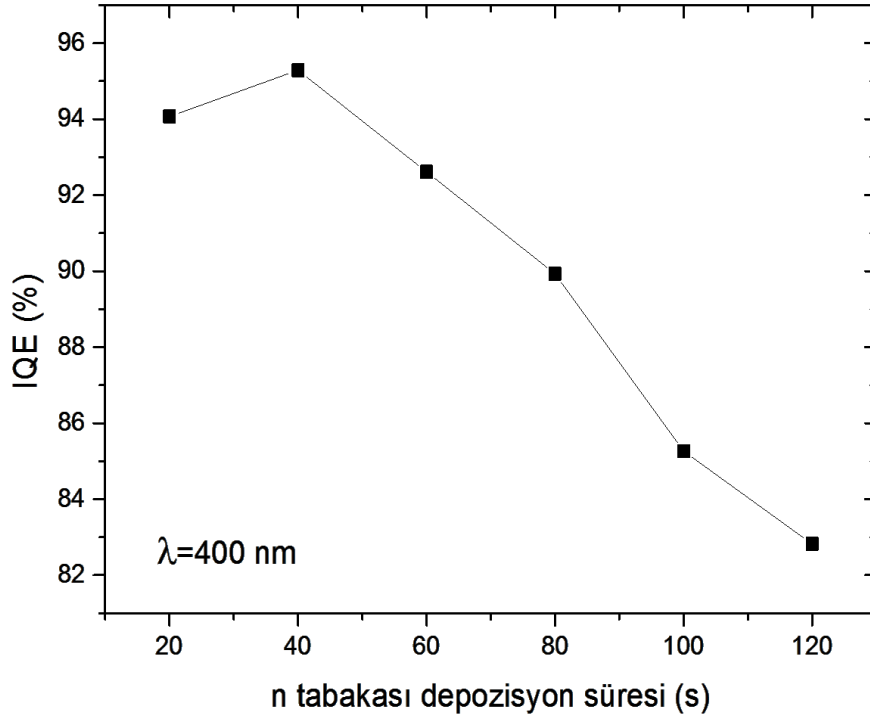
En yüksek I_{SC} , V_{OC} ve verim, değerleri 80 saniyelik biriktirme süresi için elde ettik. Bu pil için I_{SC} , V_{OC} , η değerleri sırası ile 1.34 A, 0.513 V ve 4.72% dir. Doluluk oranının ise 20 s'lik sürede en düşük değerde, 40 saniyede en yüksek değere yükseldiği ve sonrasında kademeli olarak azaldığı görülmektedir.

Bu güneş pilinin V_{OC} ve FF değerlerinin n-tipi tabakanın büyütme süresi 120 s olan H073 olarak adlandırdığımız standart güneş piline göre daha iyi olduğu, verimin ve I_{SC} 'nin ise gerilediği görülmektedir (şekil 4.37).



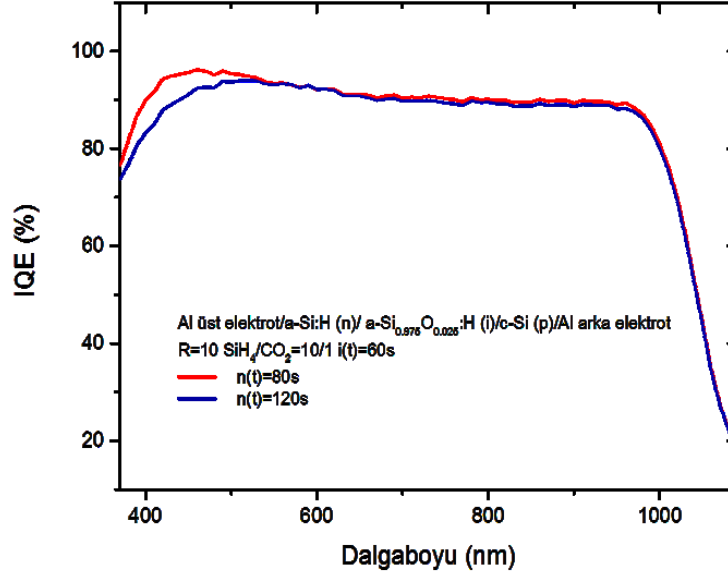
Şekil 4.37 n-tipi 80 sn a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) ve n-tipi 120 sn a-Si:H (n)/a-Si:H (i) I/V karakteristikleri karşılaştırma

Katkısız (n) tabaka kalınlığının özellikle mavi ışık bölgesinde iç kuantum verimliliğine olan etkisi incelendiğinde şekil 4.38'den de görüldüğü gibi artan (n)-tipi kalınlıkla IQE'nin 400 nm dalga boyunda düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.38 Al/(n)a-Si:H/(i)a-SiO:H/(p)c-Si/Al yapısındaki güneş pilinin IQE'nin 400 nm dalga boyunda (n)-tipi tabaka kalınlığı ile değişimi.

Kusur yoğunlukları (n)-tipi tabaka kalınlığı arttıkça artmakta ve bu da güneş pilinin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. 600 nm'den daha büyük dalga boylarında a-Si:H tabaka saydam olduğundan kuantum verim sadece alttaban ve arka kontak özellikleri ile belirlenmektedir bu nedenle şekil 4.39'dan görüleceği gibi uzun dalga boylarında iç kuantum veriminde bir değişim görülmemektedir.



Şekil 4.39 n-tipi 80 sn a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) ve n-tipi 120 sn a-Si:H (n)/a-Si:H (i) IQE değişimi

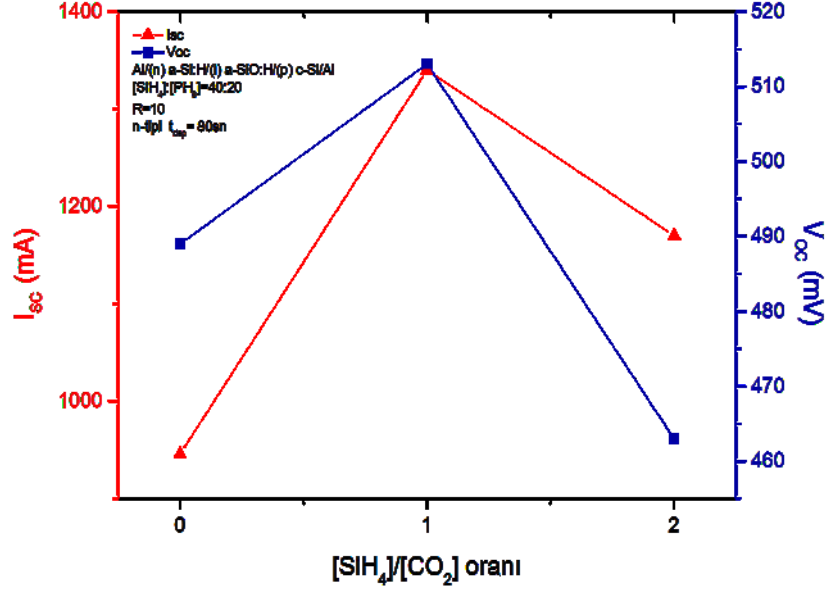
Aşağıdaki Çizelge 4.6'da bu iki güneş pilinin karşılaştırması verilmiştir. V_{oc} ve FF faktördeki artışın a-SiO:H/c-Si arayüzey pasivasyonunun iyileşmesi nedeniyle seri direncin azalmasından, kısa devre akımındaki düşüşün ise daha yüksek şönt direnci nedeniyle taşıyıcı toplamasının azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ancak bu etkilerin teyidi için daha detaylı bir analiz gerekmektedir.

Çizelge 4.6 n-tipi 80 s a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) ve n-tipi 120 s a-Si:H (n)/a-Si:H (i) karakteristik parametreler karşılaştırma tablosu

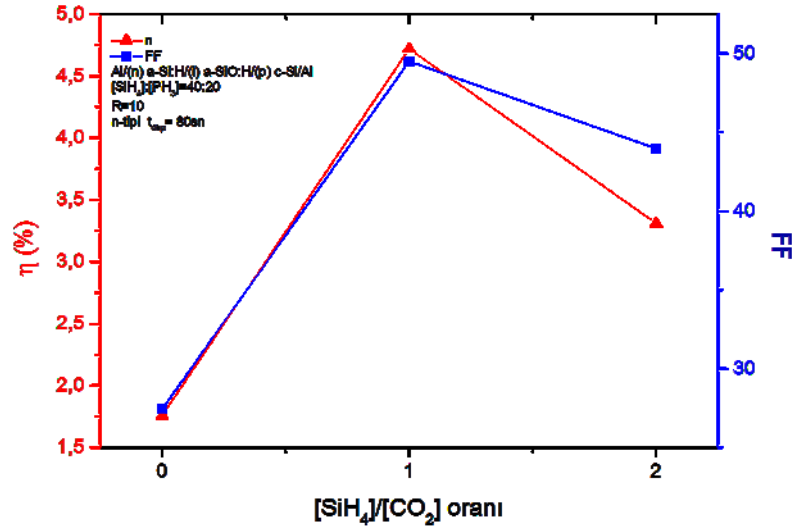
n/i tabaka Yapısı	n/i tabakaları proses sıcaklığı (°C)	Verim (%)	V_{oc} (mV)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)
a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i)	190/190	4,72	513	49,40	19
a-Si:H (n)/a-Si:H (i)	190/190	4,97	476	40,63	26

Biriktirme süresi 80 saniye olacak şekilde uyguladığımız n-tipi tabaka için en uygun CO₂ akış miktarının değişmiş olabileceğini düşünerek kontrol etmek için, CO₂ akış oranları dışında diğer biriktirme şartları aynı olan güneş pillerinin I-V parametrelerinin farklı CO₂ akış oranlarına göre değişimi inceledik. Bu güneş pillerinin CO₂ akış oranları ile I_{sc} , V_{oc}

ve FF, verim parametrelerinin değişimi aşağıdaki Şekil 4.40 ve Şekil 4.41 grafiklerinde sırasıyla görülmektedir.

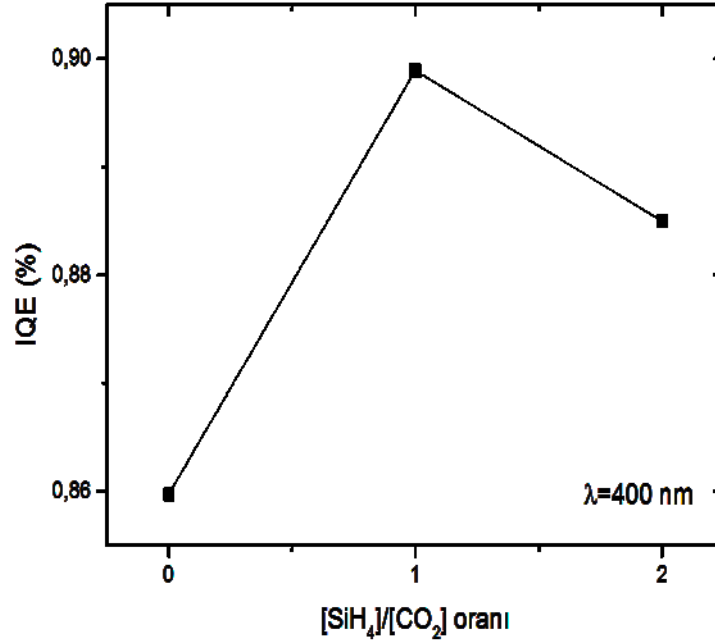


Şekil 4.40 n-tipi 80 sn a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) pillerinin CO₂ akış oranları ile I_{sc} ve V_{oc} değişimi



Şekil 4.41 n-tipi 80 sn a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) pillerinin CO₂ akış oranları ile FF ve η değişimi

Şekil 4.42'den görüldüğü gibi mavi ışık bölgesi için i kuantum verimliliği ölçmeleri sonuçları da bu bulguları desteklemektedir.



Şekil 4.42 n-tipi 80 sn a-Si:H (n)/ a-SiO:H (i) pillerinin CO₂ akış oranları ile 400nm de IQE değişimi.

Bu sonuçlara göre a-SiO_x:H (i) tabakası için [SiH₄]:[CO₂]=10:1 katkılama oranı sabit biriktirme parametresi olarak uygun gördük ve çalışmanın bundan sonraki kısmında bu şekilde uyguladık.

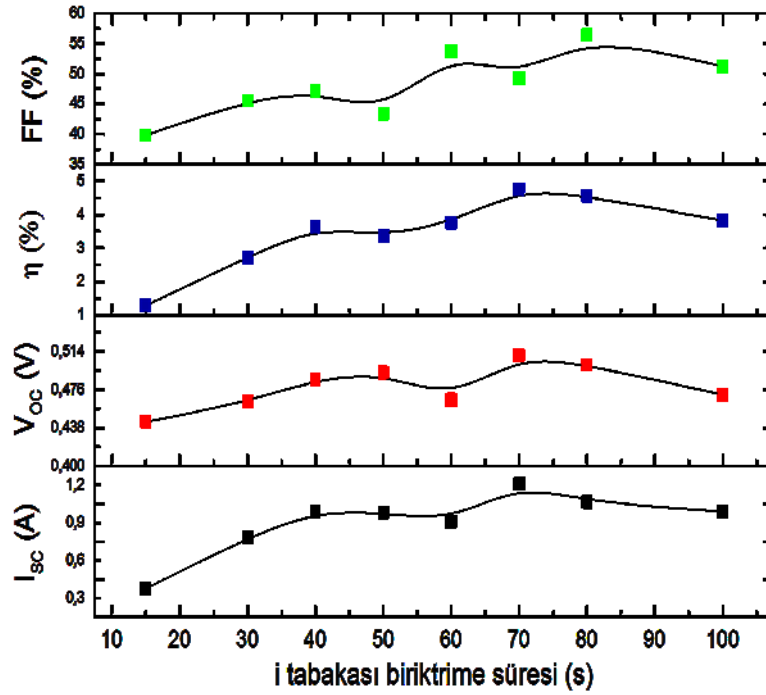
4.2.4 Tampon tabakası olarak a-SiO_x:H (i) için tabaka kalınlığının belirlenmesi

Heteroeklem a-Si:H/c-Si güneş pillerinde c-Si ile a-Si:H film arasındaki ara yüzeyin pasivasyonunun kalitesinin kullanılan a-SiO_x:H tampon tabakanın kalınlığına bağlı olduğu bilinmektedir [83]. Tampon tabaka olarak kullanılan a-SiO_x:H tabakasının kalınlığının güneş pilinin performansı üzerindeki etkisini inceleyerek en uygun tabaka kalınlığının belirlemek için, K2 yöntemi ile temizlenmiş p-tipi (Boron) katkı, <100> yönelimli 1-20Ω c-Si alttabanlar kullanarak bir Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si_{0.975}O_{0.025}:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri ürettik. Biriktirme şartları aşağıdaki Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 a-Si_{0,975}O_{0,025}:H (i) tabakası kalınlık taraması için biriktirme şartları

	T _S	t _{Biriktilme}	R _H	P _{RF}	Gaz Basıncı (Torr)	SiH ₄ Akışı (sccm)	PH ₃ Akışı (sccm)	CO ₂ Akışı (sccm)	Biriktilme hızı (Å/s)
a-SiO _x :H (i)	190°C	15-100 s	10	3W	0,8	10	-	1	1
a-Si:H (n)	190°C	80 s	-	3W	0,8	40	20	-	3

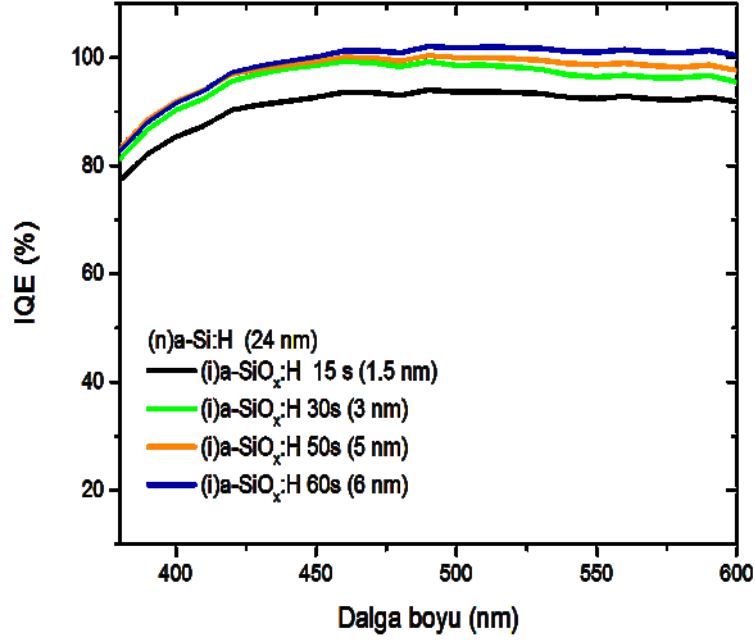
Elde edilen güneş pilleri 150 °C ve 250 °C sıcaklıklarda değişik sürelerde hava ortamında sıcak tabla üzerinde tavlandıktan sonra AM1.5G aydınlatma altında ölçüldü. olan güneş pili parametreleri ile ilgili sonuçlar şekil 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.43 a-Si_{0,975}O_{0,025}:H (i) tabakası kalınlık taraması

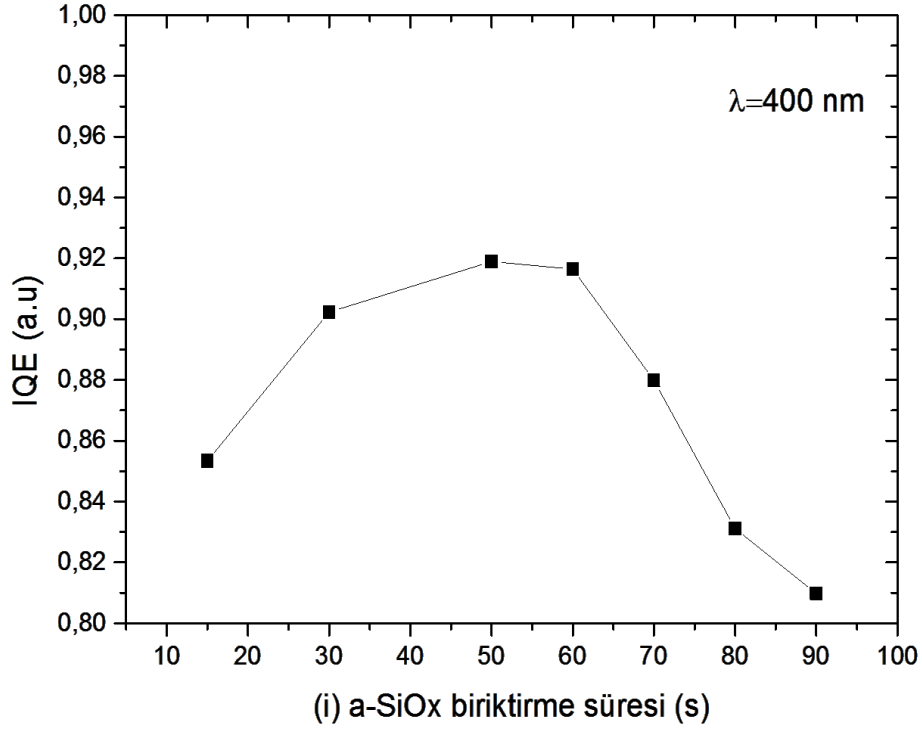
Pasivasyon kalitesinin uygulanan a-SiO_x:H tabakasının kalınlığına son derece bağımlılık gösterdiği ve tabaka kalınlığı arttıkça pasivasyon tabakasındaki soğurmanın azalması nedeniyle c-Si alttabana ulaşan ışık miktarının artması sonucu daha iyi bir pasivasyon kalitesi elde edildiği bilinmektedir [84].

Tabaka kalınlığı 6 nm'ye kadar artarken pasivasyon kalitesinin iyileştiği seri direncin azalmasıyla ortaya çıkan V_{OC} ve FF değerlerinden (şekil 4.43) görülmektedir. İç kuantum verimliliği ölçümleri bu bulguyu destekler yöndedir.



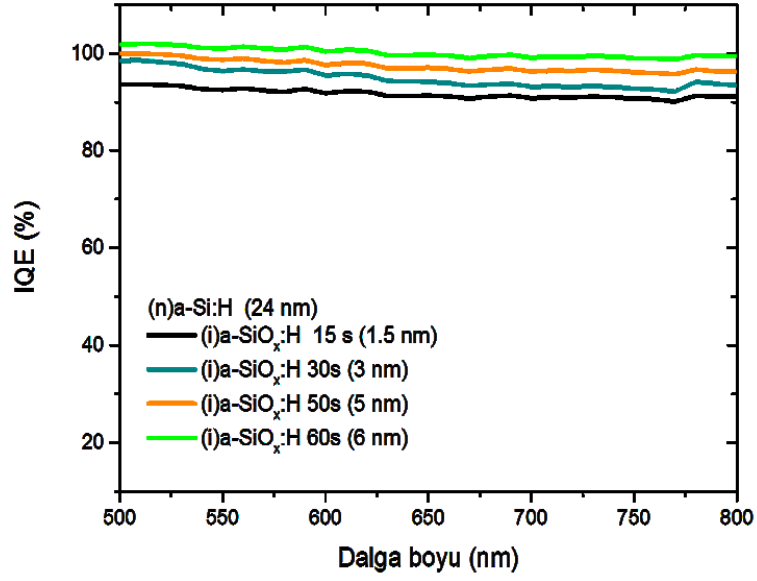
Şekil 4.44 a-Si_{0,975}O_{0,025}:H (i) tabakası kalınlığı ile UV bölgede IQE değişimi

Ön yüzeyin pasivasyonu yüzeye yakın yük taşıyıcıların üretimini etkilediğinden ve mavi ışık yüzeye çok yakın bir bölgede soğurulduğundan yüksek yeniden birleşmeler IQE'nin mavi kısmını etkiler. Yukarıdaki şekil 4.44'te görüldüğü gibi kalınlığın artması ile pilin ön yüzeyindeki yeniden birleşmelerin pasivasyon tabakasının etkisiyle azalması sonucu mavi ışığa olan cevabın iyileştiği görülmektedir. Silisyum güneş pilinin ön tarafındaki (n)a-Si:H ve (i) a-SiO_x:H tabakalarındaki soğurma nedeniyle oluşan akım kaybı, tampon tabakasının kalınlığındaki artışa bağlı olarak mavi ışık bölgesindeki IQE'nin değişimi özetle aşağıdaki şekil 4.45 grafiğinde görülmektedir.

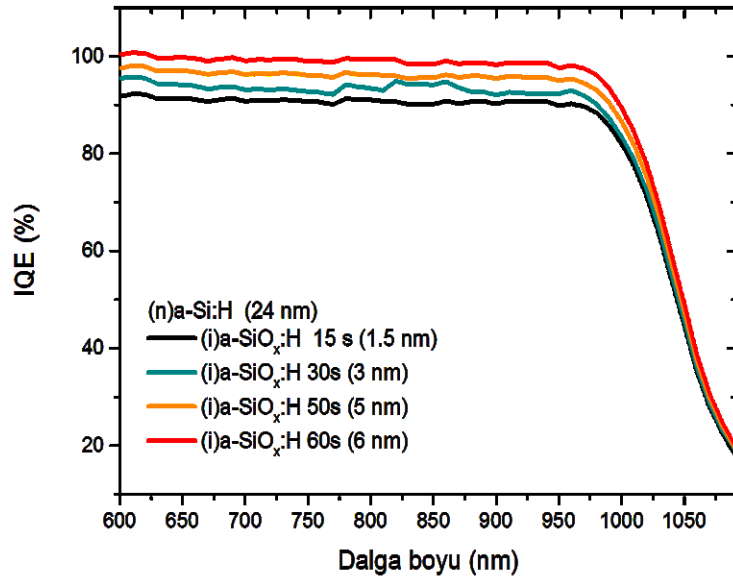


Şekil 4.45 a-Si_{0,975}O_{0,025}:H (i) tabakası kalınlığı ile 400 nm’de IQE değişimi

Benzer şekilde kalınlık arttıkça yeniden birleşme hızıyla ilişkili olan parametrelerden biri olan difüzyon uzunluğu pilin esas hacminde (bulk) soğurulan yeşil ışık bölgesinde artmaktadır. Bu nedenle güneş pilinin esas hacmindeki toplama olasılığı arttığından şekil 4.46’da verilen IQE’nin tayfın yeşil bölgesindeki kısmında artma gözlenmektedir.



Şekil 4.46 a-Si_{0,975}O_{0,025}:H (i) tabakası kalınlığı ile görünür bölgede IQE değişimi
c-Si'un bant aralığından daha büyük dalga boylarındaki etkileşim zayıf olduğundan şekil 4.47'de görüldüğü gibi güneş pilinin kırmızı ışığa cevabı da değişmemiştir.

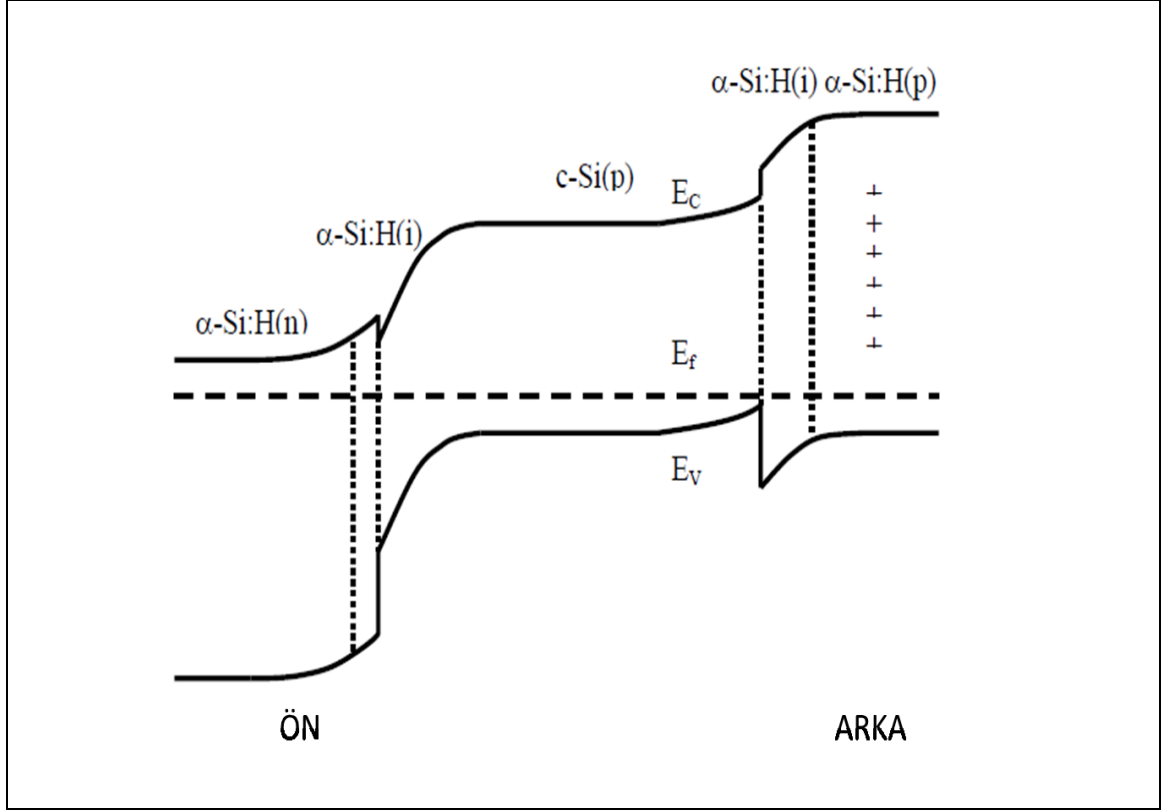


Şekil 4.47 a-Si_{0,975}O_{0,025}:H (i) tabakası kalınlığı ile IR bölgede IQE değişimi
Yük taşıyıcıların toplanması daha çok pilin ön yüzey bölgesinden etkilendiğini söyleyebiliriz. Bunun iki nedeni olabileceğini düşünüyoruz:

(1) Arka yüzey kontağının etkisi: İyi bir arka kontakın sahip olması gereken özellikleri elektronik ve optik olarak sınıflandırabiliriz. Elektronik özellikler (i) azınlık taşıyıcılarının yansıması için bir BSF, (ii) eşit dağılmış düşük dirençli bir ohmik kontak ve (iii) yumuşak pürüzsüz bir Al yüzeyi. Optik olarak ise arka kontak ışığı etkin tuzaklanmasına katkı sağlayabilmesi için soğurması çok az bir yansıtıcı olmalıdır. Bunlara ek olarak arka kontak oluşturma kusurlardan etkin biçimde kurtulmaya uygun bir şekilde uygulanmalıdır [85]. Silisyum Heteroeklem (SHJ) güneş pillerinde arka yüzey de “Arka yüzey alanı” (BSF) olarak ifade edilen bir pasivasyon tabakasını kullanılmasının pil verimliliklerini önemli ölçüde arttırdığı bilinmektedir [86], [87], [88]. Aşağıdaki şekil 4.48’de verilen bant diyagramı şeması üzerinden (şekil 4.48) çalıştığımız tür silisyum heteroeklem güneş pillerinde BSF’nin etkisini şu şekilde açıklayabiliriz: Azınlık taşıyıcı elektronların toplanması sadece iletim bandı kenarlarındaki küçük bant ofsetleri tarafından yaratılan küçük bir bariyer ile engellenir. Pilin arka yüzünde ise küçük iletim bandı ofseti azınlık taşıyıcısı elektronları yansıtan bir ayna görevi görür. Değerlik bandı kenarındaki geniş bariyer yüzünden çoğunluk taşıyıcısı deşikler arka kontakta tuzak destekli tünelleme ile geçebilirler. Ancak bu tünellemenin gerçekleşebilmesi için i-tabakasının oldukça ince olması ya da hiç kullanılmaması gerekir ki bu da arka yüzeyin pasivasyonunun kötüleşmesi sonucunu doğurur.

Bu tez çalışmasında tüm pillere, arka yüzeyleri %1 HF ile temizlenerek N₂ ile kurutulduktan sonra metal buharlaştırma sisteminde Al ya da Al-Ag alaşımı ile kaplanarak Al-BSF uygulanmıştır. Ancak Al’un ve Si’un eriyerek Si-Al alaşımının oluşması için ötektik sıcaklıkta (577°C) fırınlama işlemi uygulanmamıştır. Diğer yandan c-Si ile Al arka kontak arasına arka yüzey pasivasyonu için bir tampon tabaka ve

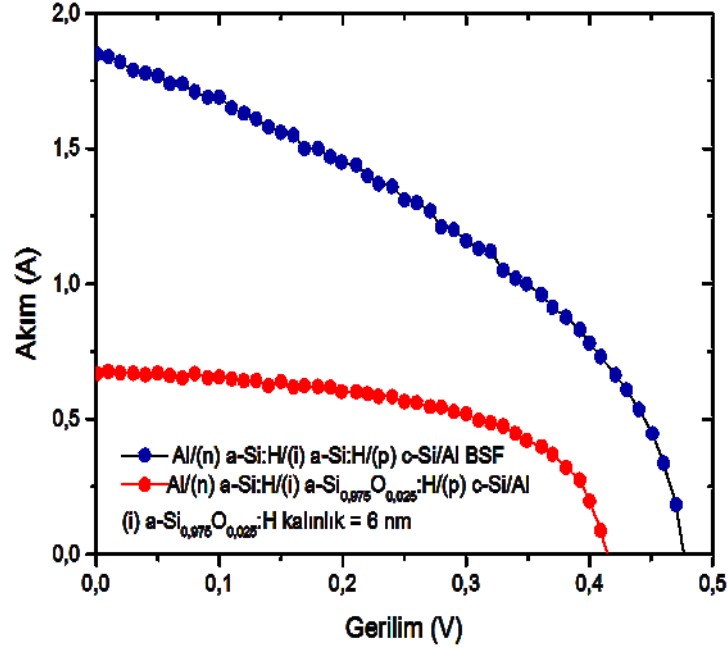
(p) a-Si:H tabakasından oluşan BSF kullanmamış olmamızın sonucu olarak arka yüzeyin pasivasyonunun vasat bir düzeyde olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.48 (n) a-Si:H/(i) a-Si:H/(p) c-Si/BSF bant şeması

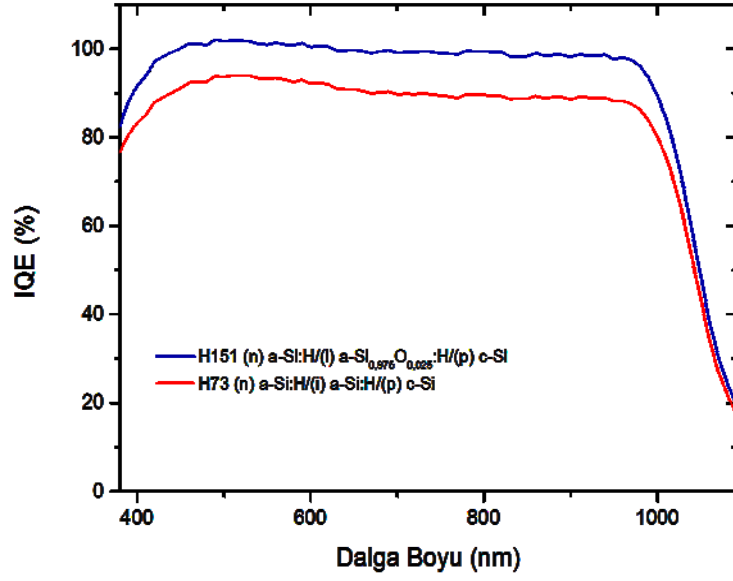
(2) Yüksek güneş pili verimleri elde edilebilmesi için difüzyon uzunluğunun alttaban kalınlığından fazla olması gereklidir [89]. Kullandığımız p-tipi c-Si alttabanların kalınlıkları 525 μm olduğundan difüzyon uzunlukları yetersiz kalarak verim düşmektedir.

Standart Al/(n) a-Si:H/(i) a-Si:H/(p) c-Si/Al BSF ile (i) tabaka kalınlığı 6 nm olan Al/(n) a-SiH/(i) a-SiO_x:H/(p) c-Si/Al yapısındaki pilin I-V grafikleri şekil 4.49'da görülmektedir.



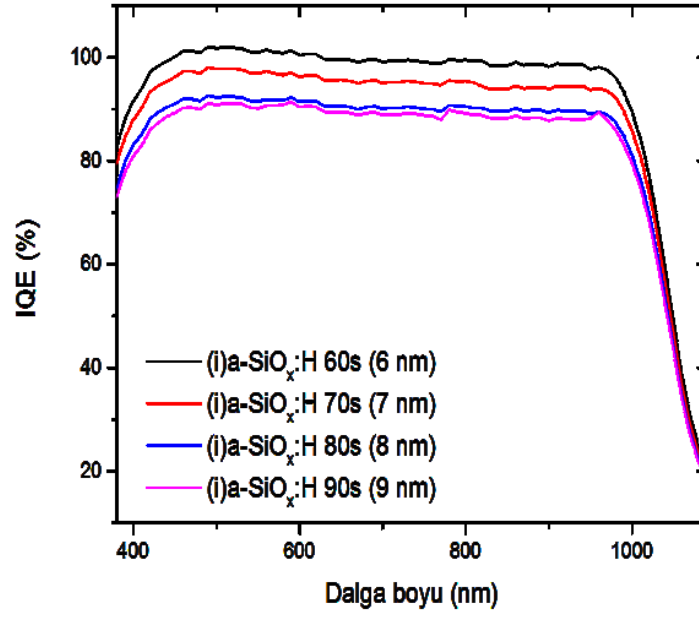
Şekil 4.49 Al/(n) a-Si:H/(i) a-Si:H/(p) c-Si/Al BSF ve (i) a-Si_{0,975}O_{0,025}:H tampon tabakalı güneş pil I-V grafiği

Buradan da görüldüğü gibi V_{OC} ve I_{SC} oldukça gerilemiş ancak FF iyileşmiştir. Açık devre gerimi ara yüzeylerden daha çok etkilendiğinden kullanılan (i) a-SiO_x:H pasivasyon tabakasının yeteri kadar iyi olmadığı söylenebilir. Kısa devre akımının düşük olması ise ön kontaklardan yeteri kadar iyi toplama yapılamadığını göstermektedir. Belirtmek gerekir ki bu tez çalışmasında ön ve arka metal kontaktarı oluşturmak için kullandığımız vakum metal buharlaştırma yöntemi tekrarlanabilirliğini sağlanmasını güçleştirmiştir. Özellikle kenarlarda ön kontaktar ile arka kontakın kısa devre olma ihtimali yüksektir. Pilin bu kısımlarının kesilerek alınmaya çalışılması alttaban ve filmlerde kılcal kırıklara neden olduğundan uygulanmamıştır. Bu nedenle pilin kenarlarındaki kayıplardan dolayı kısa devre akımındaki gerilemenin verimin azalmasındaki etkisi açık devre geriliminin etkisinden göreceli olarak daha fazladır. Doluluk oranı (FF) ise şönt direncinin artması ile iyileşmiş olduğu görülmektedir. Bununla beraber şekil 4.50'de pilin orta kısmından alınan IQE ölçümlerinde iç kuantum veriminin mavi bölgede %5 tüm spektral bölgede %10 oranında arttığını söyleyebiliriz.



Şekil 4.50 Al/(n) a-Si:H/(i) a-Si:H/(p) c-Si/Al BSF ve (i) a-Si_{0,975}O_{0,025}:H tampon tabakalı güneş pil IQE karşılaştırması

Tampon tabaka kalınlığının etkisinin incelendiği örnek grubu için, 6 nm'den daha kalın tampon tabakalarda güneş pilinin elektriksel özelliklerin kötüleştiği görülmektedir. Bu durum kalınlık arttıkça a-SiO_x:H' nin iletkenliğinin azalması ve kalınlığının artması ile tabaka içindeki artan kusur yoğunluğunun sonucu tabaka içi kayıpların artması ile açıklanabilir [89]. Bu durum şekil 4.51'de verilen QE ölçümleri ile de desteklenmektedir.



Şekil 4.51 Al/(n) a-Si:H/(i) a-Si_{0,975}O_{0,025}:H/(p) c-Si/Al BSF güneş pili (i)-tabaka kalınlığı ile IQE değışimi

Örneklerin düşük V_{OC} değerlerine rağmen kuantum verimlerindeki gelişime dayanarak a-SiO_x:H tabakasının büyüme süresinin daha önce a-Si:H (i) tabakası çalışmasında belirlenen yüzey pürüzlülüğünün doyuma ulaşma süresi olan 60 sn olarak belirledik. Literatürde de optimum a-SiO_x:H kalınlığının 3,5 nm ile 5 nm aralığında olduğu gösterilmiş olması [90], bu sonucu destekler yöndedir.

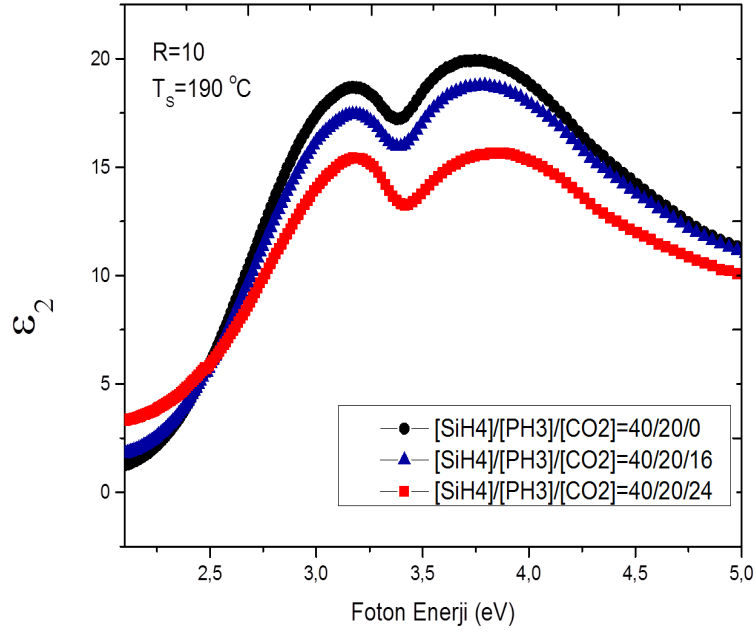
4.2.5 a-SiO_x:H (n) pencere tabakası için [SiH₄]/[CO₂] oranının belirlenmesi

Çalışmanın bu kısmında daha önce n tipi a-Si:H emiter tabakası için belirlenmiş olan depozisyon parametrelerini güneş pilinde pencere tabakası olarak kullanılacak olan n-tipi a-SiO_x:H tabakasına adapte etmeyi amaçladık. p-türü (Boron) katkılı, (100) yönelimli 10-20 Ohm cm dirençli, 525 µm kalınlıklı CZ c-Si alttabanlar kutudan çıktıkları şekilde sadece %1 HF ve DI su ile temizlenerek doğrudan PECVD sistemine yerleştirildi ve aşağıda Çizelge 4.8'de verilen PECVD parametreleri ile farklı CO₂ gaz akışlarında filmler büyüttük.

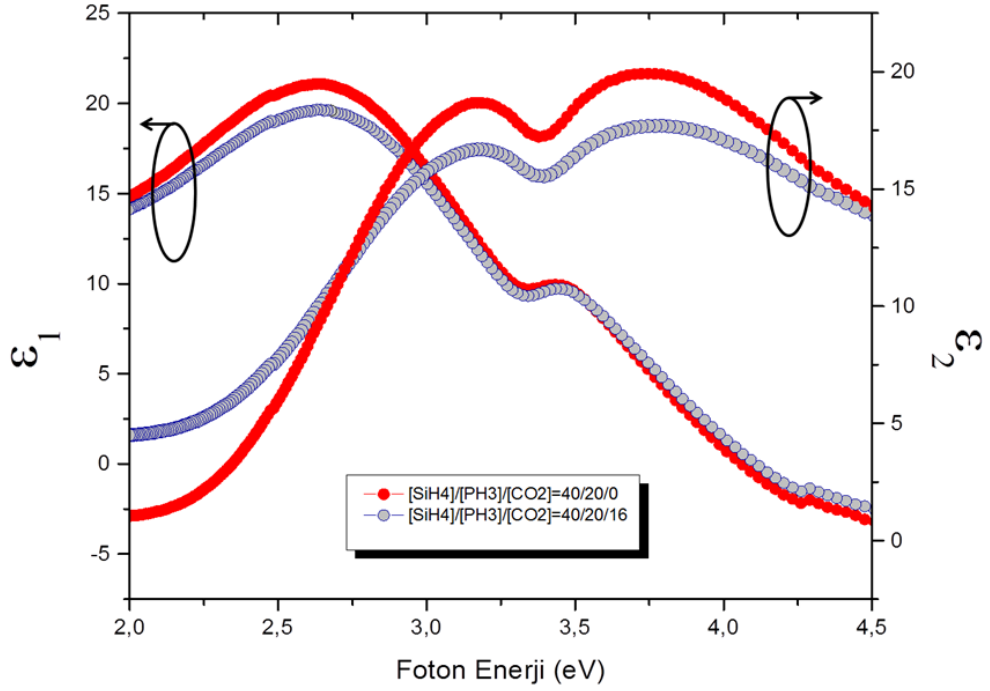
Çizelge 4.8 .n-tipi a-SiO_x:H tabakanın PECVD parametreleri

	T _s	Birikirme süresi	R _H	P _{RF}	Gaz Basıncı (Torr)	SiH ₄ Akışı (sccm)	PH ₃ Akışı (sccm)	CO ₂ Akışı (sccm)
a-SiO:H (n)	190°C	80 s	-	3W	0,8	40	20	0-24

Büyütülen filmlerin spektroskopik elipsometre ile ölçülen dielektrik sabitleri ile ilgili grafikler şekil.4.52 ve şekil 4.53'te görülmektedir.



Şekil 4.52 n-tipi a-SiO_x:H tabakanın sanal dielektrik sabiti-foton enerjinin CO₂ gaz akış oranı ile değişimi



Şekil 4.53 $[\text{SiH}_4]:[\text{PH}_3]=40:20$, $[\text{SiH}_4]:[\text{CO}_2]=40:16$ katkılı n-tipi a-SiO:H tabakanın sanal ve reel dielektrik sabitinin-foton enerji grafiği.

Tayfsal elipsometre ölçümlerinden filmin kırılma indisinin CO_2 gaz akışı arttıkça a-Si:H tabakaya göre hafifçe düşüş gösterdiği görüldü. En fazla düşüş $[\text{SiH}_4]:[\text{CO}_2]=40:24$ katkılama oranında ölçülmesine rağmen bant aralığının bu oranda azalmış olması nedeniyle n-türü pencere tabakası olarak $[\text{SiH}_4]:[\text{CO}_2]=40:16$ katkılama oranında çalışmaya karar verdik.

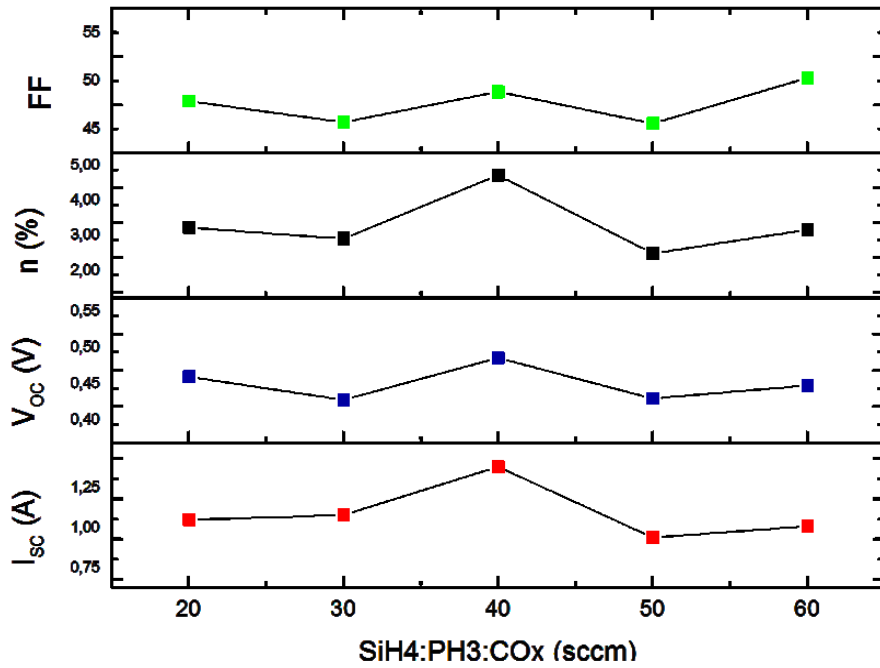
4.2.6 Pencere tabakası için n-tipi katkılama oranının belirlenmesi

Çalışmamızın bu kısmında hem tampon hem de pencere tabakasında a-SiO:H kullanarak, n-tipi katkının güneş pilinin performansına etkisini inceleyerek en n-tipi tabaka için en uygun katkı miktarını bulmayı amaçladık. K2 yöntemi ile temizlediğimiz p-türü (Boron) katkı, (100) yönelimli 10-20 Ohm.cm dirençli, 525 μm kalınlıklı CZ c-Si alttabanlar üzerine şekil Çizelge 4.9'da verilen PECVD şartlarında güneş pilleri üretilmiştir.

Çizelge 4.9 .Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin PECVD koşulları

	T_S	$t_{\text{Biriktirme}}$	R_H	P_{RF}	Gaz Basıncı (Torr)	SiH ₄ Akışı (sccm)	PH ₃ Akışı (sccm)	CO ₂ Akışı (sccm)
a-SiO:H (i)	190°C	60 s	10	3W	0,8	10	-	1
a-SiO:H (n)	190°C	80 s	-	3W	0,8	40	20-60	16

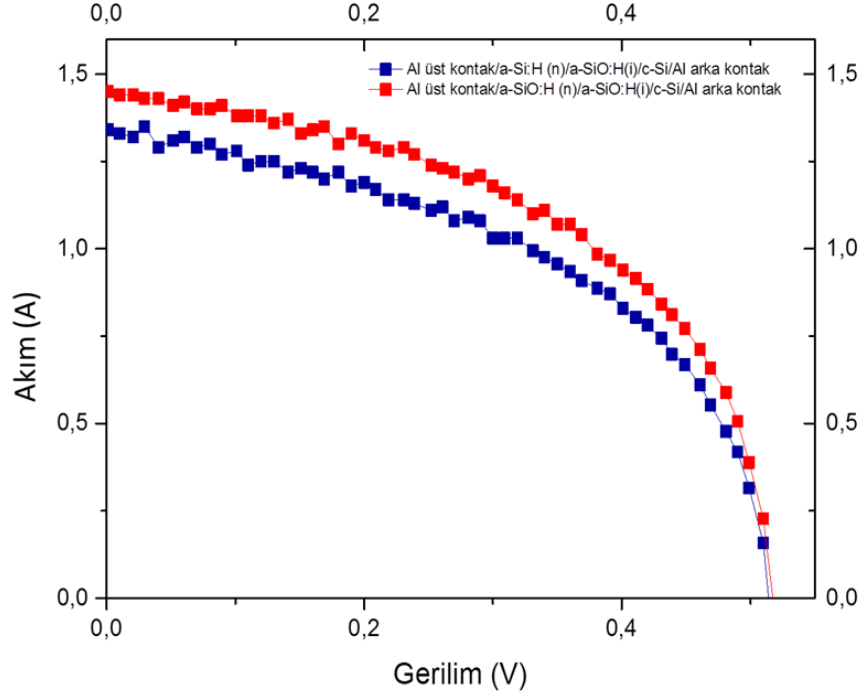
Daha sonra bu güneş pilleri, pillerin tavlama sıcaklığına ve süresine cevabı referans alınarak yüksek sıcaklık homojenliğe sahip sıcak bir tabla üzerinde sırasıyla 150 °C, 250 °C ve 300 °C de tavlansmıştır. AM1.5G aydınlatma altında ölçülen I_{SC} , V_{OC} ve FF, verim parametrelerinin PH₃ akış oranı ile değişimi sırasıyla şekil 4.54'te verilmiştir. En yüksek I_{SC} , V_{OC} , verim ve doluk oranı elde edilmiş olan [SiH₄]:[PH₃]:[CO₂]=40:40:16 katkılama oranı olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.54 Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin I_{SC} , V_{OC} , verim ve FF değerlerinin PH₃ akışı ile değişimi.

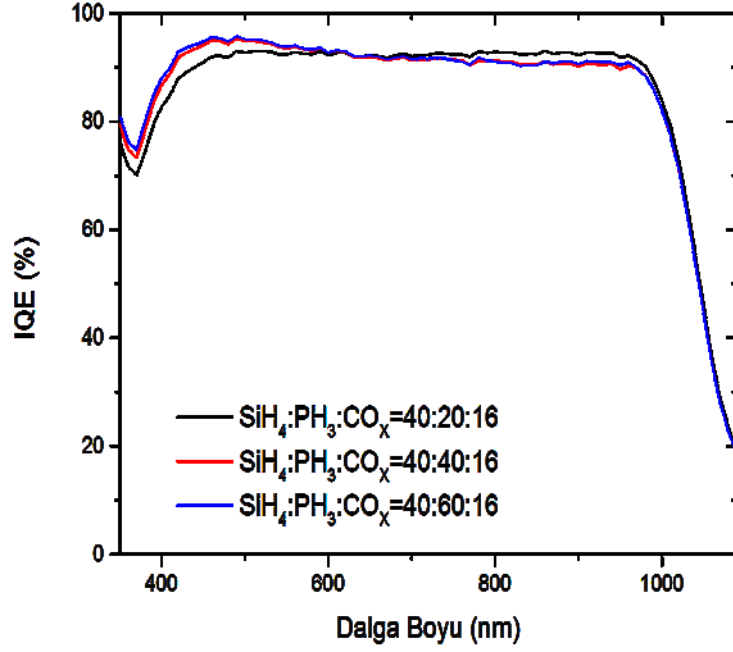
n-tipi katkılı tabaka koşulları hariç diğer büyütme koşulları aynı olan Al ön kontak/a-Si:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak ve Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al

arka kontak yapısındaki iki güneş pilinin I-V karakteristiklerinin bir karşılaştırması yapıldığında I_{SC} 1.34 A'den 1.45 A'e artarken, V_{OC} 'nin çok az geliştiği, verimin 4.72%'den 5.35%'e geliştiği ve FF'in ise 49.40'tan 51.37'ye geliştiği görülmüştür. (n) a-SiOx:H tabakasının kalitesi PH_3 katkısı arttıkça kötüleşmekte ve bunun sonucu I_{SC} , FF ve V_{OC} dolayısıyla η azalmaktadır. Bu iki güneş pilinin I-V karakteristiği grafiği şekil 4.55'te verilmiştir.



Şekil 4.55 Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak ve Al ön kontak/a-Si:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin I/V karşılaştırması.

Aşağıdaki şekil 4.56'da verilen iç kuantum verimliliği ölçümleri de bu sonuçları destekler yöndedir.



Şekil 4.56 Al/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al yapısında güneş pillerinin PH₃ katkılama ile IQE değişimi

Artan PH₃ oranı ile kusur yoğunluğunun artması ve bunun sonucu güneş pilinin performansı kötüleşmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak (n) tabakası için uygun katkılama oranını SiH₄:PH₃:CO_x=40:40:16 olarak belirledik.

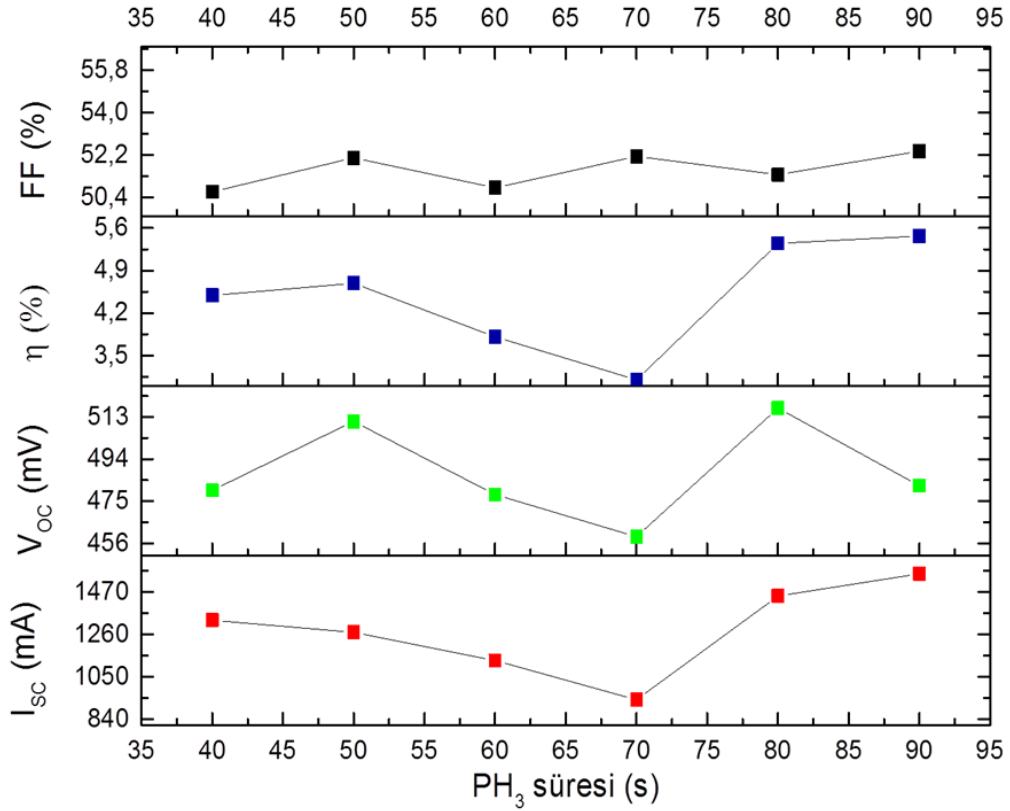
4.2.7 Pencere tabakası için n-tipi a-SiO:H tabaka kalınlığının belirlenmesi

Önceki bölümde katkı miktarını belirlediğimiz pencere tabakasında kullandığımız n-tipi a-SiO_x:H filmin kalınlığını belirlemeye çalıştık. Bu amaçla K2 yöntemi ile temizlediğimiz p-türü (Boron) katkılı, (100) yönelimli 10-20 Ohm.cm dirençli, 525 µm kalınlıklı CZ c-Si alttabanlar üzerine çizelge 4.10'da verilen PECVD şartlarında güneş pilleri ürettik.

Çizelge 4.10 Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin n-tipi tabaka kalınlık optimizasyonu için PECVD koşulları

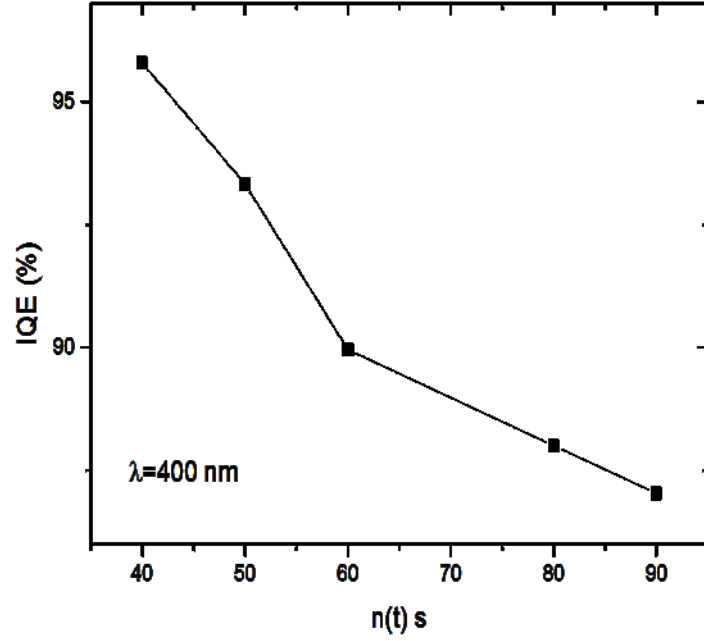
	T_s	$t_{\text{Biriktirme}}$	R_H	P_{RF}	Gaz Basıncı	SiH_4 Akışı	PH_3 Akışı	CO_2 Akışı
a-SiO:H (i)	190°C	60 s	10	3W	0,8 Torr	10 sccm	-	1 sccm
a-SiO:H (n)	190°C	80 s	-	3W	0,8 Torr	40 sccm	40 sccm	16 sccm

Daha sonra bu güneş pilleri, pillerin tavlama sıcaklığına ve süresine cevabı referans alınarak yüksek sıcaklık homojenliğe sahip sıcak bir tabla üzerinde sırasıyla 150 °C, 250 °C ve 300 °C de tavlannmıştır. AM1.5G aydınlatma altında ölçülen I_{SC} , V_{OC} ve FF, verim parametrelerinin a-SiO_x:H (n) biriktirme süresi ile değişimi sırasıyla şekil 4.57'de görülmektedir.



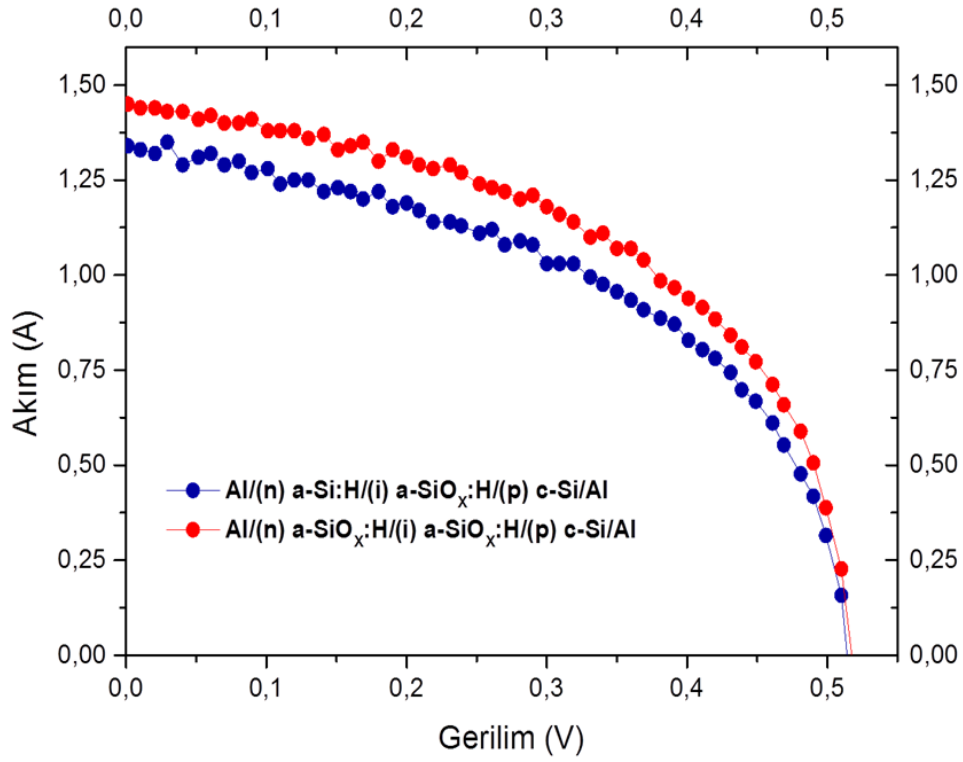
Şekil 4.57 Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin n-tipi tabaka biriktirme süresi ile I_{SC} , V_{OC} , verim ve FF değişimi.

Biriktirme süreleri ile karakteristiklerin gelişimleri referans olarak incelediğimizde 80s - 90s biriktirme süresi aralığında en yüksek verim elde edildiği görülmektedir. Film kalınlığının UV bölgede IQE üzerindeki etkisi aşağıdaki şekil 4.58’de görülmektedir.



Şekil 4.58 Al ön kontak/a-SiO:H (n)/a-SiO:H (i)/c-Si/Al arka kontak yapısında güneş pillerinin n-tipi tabaka biriktirme süresi UV bölgede IQE değişimi

(n) a-Si_{0,975}O_{0,025}:H tabaka kalınlığı arttıkça UV bölgede IQE'nin azalması davranışı (n) a-Si:H tabakasının kullanıldığı durum ile benzerlik göstermektedir ve aynı mekanizmalar ile açıklanabilir. Standart güneş pili ile 80 s sürede büyütülmüş (n) a-Si_{0,975}O_{0,025}:H tabaka kullanılan güneş pillerinin I-V karakteristiklerinin bir karşılaştırması şekil 4.59'da görülmektedir.



Şekil 4.59 Al/a-Si_{0,975}O_{0,025}:H (n)/a-Si_{0,975}O_{0,025}:H (i)/c-Si/Al yapısında ve Al/a-Si:H (n)/a-SiO_x:H (i)/c-Si/Al güneş pillerinin I-V grafiklerinin karşılaştırılması

Aşağıdaki çizelge 4.11’de farklı tabaka uygulamalarının sonucunda elde edilen gelişim özet olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.11 Farklı tabaka özelliklerindeki pillerin karakteristiklerindeki gelişim

n/i tabaka Yapısı	n/i tabakaları proses sıcaklığı	Verim (%)	V _{oc} (mV)	FF (%)	J _{sc} (mA/cm ²)
(n) a-Si:H/(i) a-Si:H	190/190	4,25	501	48,69	17
(n) a-Si:H/(i) a-SiO _x :H	190/190	4,72	513	49,40	19
(n) a-SiO _x :H/(i) a-SiO _x :H	190/190	5,35	517	51,37	20
(n) a-Si:H/(i) a-Si:H+Al BSF	225/150	9,2	428	59,5	36,1

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş pillerinin PECVD tekniği kullanılarak üretilme süreci, yapısal, elektriksel ve optiksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler ve elde edilen pillerin performansını belirlemekte kullanılan karakterizasyon yöntemleri çalıştık.

Kimyasal ve plazma temizlik yöntemleri kullanılarak temizlenen p-tipi katkılı tek tarafı parlatılmış c-Si alttabanlar kullanılarak farklı biriktirme sürelerinde ve katkılama oranlarında:

(n)a-Si:H/(i)a-Si:H/(p)c-Si,

(n)a-Si:H/(i)a-SiO_x:H/(p)c-Si,

(n)a-SiO_x:H/(i)a-SiOX:H/(p)c-Si,

(n)a-SiOX:H/(i)a-SiOX:H/(p)c-Si ve

(n)a-SiOX:H/(i)a-SiOX:H/(p)c-Si/(i)a-SiOX:H/(p)a-Si:H

örnekleri Plazma Destekli Kimyasal Buharlaştırma (PECVD) yöntemi kullanılarak hazırladık. Bu örnekler üzerinde temizlik işleminin etkisi inceledik.

Bazı örneklerin ön taraflarına metal kontaklar atılmadan önce RF kopartma tekniği ile TCO (ITO) kapladık. Örneklerin ön ve arka kontakları ısı buharlaştırma tekniği ile Al ve Ag kullanılarak atıldı ve 150°C-300°C arasında değişen sıcaklıklarda atmosfer ortamında tavlama işlemi uyguladık. Tüm örneklerin iç kuantum verimlilikleri ile tavlama öncesi ve sonrası I-V ölçümlerini yaptık. Bazı örneklerin elektro lüminesans ölçümlerini de yaptık.

- a-Si:H/c-Si (i) ve (n) tabakaları kullanılarak elde edilen güneş pillerinde bir proses penceresinin mevcut olduğu belirledik.
- Buna göre optimize edilen güneş pilinin verimi % 9,2 olarak elde ettik.

Tez çalışması kapsamında hidrojenlendirilmiş amorf silisyum alt oksit oksijenleri (a-SiO_x:H, x<1), silisyum heteroeklem (SHE) güneş pillerinin geliştirilmesi amacıyla

- yaygıç (emitter),
- tampon (buffer)
- arka yüzey etkisi (back surface field-BSF) olarak kullandık.

Bu amaçla farklı film büyütme koşullarında amaca uygun olarak büyütülen a-SiO_x:H filmler ve bu filmlerin kullanıldığı SHE güneş pillerinin bölüm 3’de özetlenen yöntemler kullanılarak elde edilmiş karakterizasyonları yaptık.

- Katkısız tampon tabakası olarak kullanılan a-Si:H filmlerin optiksel özelliklerinin istenilen uygulamalar için optimize ettik.
- Katkısız tabakalar c-Si wafer üzerinde kullanılarak oluşturulan SHE güneş pillerinde en uygun katkı yoğunluğu belirledik.
- Bu çalışmalar sonucunda c-Si alttabanların temizliği için kullanılan plazma ve kimyasal temizlik yöntemlerinin elde edilen güneş pillerinin performansını geliştirdiğini gözledik.

Takiben farklı alttaban sıcaklıklarında büyütülmüş katkısız ve n-tipi katkılı filmler kullanılarak büyütülen SHE’in performansından inceledik.

- Katkısız tabakası 150°C ve n-türü katkılı a-Si:H tabakası 225°C’de büyütülen güneş pilinin tavlama sonucu açık devre gerilimi ve kısa devre akımının iyileştiğini gözledik. Bu şekilde, açık devre gerilimi 0.5 V’un üzerine çıktığını gözledik. Doluluk faktörünün bir önceki pile göre iyileştiğini gözlemledik.
- 150°C’de 6dk. tavlama sonucu pilin verimi %6.28, doluluk oranı %52, kısa devre akımı 1.69 A ve açık devre gerilimi 523 mV’tur. Bu pillerin daha yüksek sıcaklıkta büyütülenlere göre ısı açısından daha kararlı olduğu gözledik.

a-SiO_x:H’in dielektrik fonksiyonunun azalması, a-SiO_x:H kırılma indisinin a-Si:H’tan düşük olmasını gösterir. Bunun nedeni ise a-SiO_x:H tabakasının oldukça gözenekli yapıda olmasıdır

- Örneklerin $(\epsilon_2)^{1/2}=0$ nin enerji konumundan tahmin edilmiş optiksel bant aralıklarının CO₂ oranının artması ile foton enerjisinin daha büyük değerlere doğru kaydığını tespit ettik.

Tampon tabaka olarak a-SiOx:H kullanılması durumunda güneş pilinin performansının H₂ seyreltmesi ile nasıl değiştiğini incelemek amacıyla bir seri güneş pili ürettik. K2 yöntemi ile temizlenmiş p-tipi (Boron) katkılı, <100> yönelimli 1-20Ω c-Si alttabanlar kullanarak bir Al grid/a-Si:H (n)/ a-Si_{0.96}O_{0.04}:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri ürettik.

- Hidrojen seyreltme oranı arttıkça üretilen güneş pillerinin büyütüldükleri gibi ölçülen I_{SC}, V_{OC}, verim ve doluluk faktörlerinin arttığını gördük.
- Bu piller yüksek sıcaklık homojenliğe sahip sıcak bir tabla üzerinde 250°C'de farklı sürelerde tavladık ve tavlama süresi 2 dakikaya kadar en yüksek açık devre gerilimi ve kısa devre akımı değerleri R=7 ve R=10 hidrojen seyreltme oranlarında büyütülmüş pillerde elde ettik. Tavlama süresi 2 dakikayı aştığında R=3 ve R=5 hidrojen seyreltme oranlarında büyüttüğümüz güneş pillerinin açık devre gerilimi ve kısa devre akımlarının ciddi biçimde düştüğünü gözledik, R=7 ve R=10 hidrojen seyreltme oranlarında büyüttüğümüz güneş pillerinde ise bir değişiklik gözlemedik.

Tampon tabakası olarak a-SiOx:H kullanıldığında, en uygun [SiH₄]/[CO₂] oranını belirlemek için K2 yöntemi ile temizlenmiş p-tipi (Boron) katkılı, <100> yönelimli 1-20Ω c-Si alttabanlar kullanarak Al grid/a-Si:H (n)/a-SiOx:H (i)/c-Si (p)/Al yapısında güneş pilleri ürettik.

- Üretilen pillerde I_{SC}, V_{OC}, FF ve η parametrelerinde gözlenen düşüşün, a-SiOx:H (i) tampon tabakasındaki oksijen miktarı artması sonucu kusur yoğunluklarının artması ve ara yüzeyin pasivasyonun kötüleşerek tabaka direncinin artması ile açıklanabilir.

Tüm pillerde verimin beklenenden düşük değerlerde olması mikro yapıların gereğinden fazla olması ile açıklanabilir.

Bununla beraber n/i tabaka yapılarında a-SiOx:H yapısındaki filmlerin kullanılmasının pil performansını geliştirdiği gördük.

Büyütme sonrası tavlama ile performansın arttığı, (n) a-SiOX:H tabakalı güneş pillerinin daha yüksek sıcaklıkta ve daha uzun sürelerde tavlandığını gördük

Deneysel sonuçlara göre , a-SiO_x:H oksijenlerin tampon ve yaygıç kullanıldığı durumda alttaban katkı tipinin ve yüzey pürüzlülüğünün etkisi ile yüksek verimler için arka yüzey alan etkisinin çalışılması yararlı olacağı sonucuna vardık.

-
- [1] Fuhs, W., Niemann, K., ve Stuke, J., (1974). "Heterojunctions of Amorphous Silicon and Silicon Single Crystals", AIP Conference Proceedings, 20:345-350.
- [2] Gudovskikh, A. S., Kleider, J. P., Damon-Lacoste, J., Roca i Cabarrocas, P., Veschetti, Y., Muller, J. C., Ribeyron, P. J., ve Rolland, E., (2006). "Interface properties of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells from admittance spectroscopy", Thin Solid Films, 511-512:385-389.
- [3] Wang, Q., Page, M. R., Iwaniczko, E., Xu, Y., ve Roybal, L., (2010). "Efficient heterojunction solar cells on p-type crystal silicon wafers", Applied Physics Letters, 96:013507-1-3.
- [4] Lachenal, D., Andrault, Y., Bätzner, D., Guerin, C., Kobas, M., Mendes, B., Strahm, B., Tesfai, M., Wahli, G., ve Buechel, A., (2010). "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, 6-10 September 2010, Valencia, Spain.
- [5] Kinoshita, T., Kiyama, M., ve Suzuki, H., (2011). "The Approaches for High Efficiency HITTM Solar Cell with Very Thin (<100 μm) Silicon Wafer over 23%", Proc. 26th EU PVSEC, Hamburg, Germany.
- [6] Tanaka, M., Taguchi, M., Matsuyama, T., Sawada, T., Tsuda, S., Nakano, S., Hanafusa, H., ve Kuwano, Y., (1992). "Development of New a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells: ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction-Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer)", Jpn. J. Appl. Phys., 31:3518-3522.
- [7] Taguchi, M., Sakata, H., Yoshimine, Y., Maruyama, E., Terakawa, A., ve Tanaka, M., (2005). "Obtaining a higher Voc in HIT cells", Prog. Photovolt: Res. Appl. 13:481-488.
- [8] Fujiwara, H., ve Kondo, M., (2007). "Impact of epitaxial growth at the heterointerface of a-Si:H/c-Si solar cells", Appl. Phys. Lett., 90(1):013503.
- [9] Fujiwara H., ve Kondo, M., (2007). "Effects of a-Si:H layer thicknesses on the performance of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells", J. Appl. Phys., 101:054516.

- [10] Aberle, A. G., (2000). "Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review", *Prog. Photovoltaics*, 8(5):473-487.
- [11] Mueller, T., Duengen, W., Ma, Y., Job, R., Scherff, M., ve Fahrner, W. R., (2006). "Investigation of the Emitter Band Gap Widening of Heterojunction Solar Cells by use of Hydrogenated Amorphous Carbon Silicon Alloys", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc., MRS Fall Meeting, Boston, Kasım 2006, MA, USA*.
- [12] Mueller, T., Schwertheim, S., ve Fahrner, W. R., (2010). "Crystalline silicon surface passivation by high-frequency plasma-enhanced chemical-vapour-deposited nanocomposite silicon suboxides for solar cell applications", *J. App. Phys.*, 107:014504.
- [13] Mueller, T., Scherff, M., Schwertheim, S., ve Fahrner, W. R., (2008). "High quality passivation for heterojunction solar cells by hydrogenated amorphous silicon suboxide films", *Appl. Phys. Lett.*, 92:033504.
- [14] Yablonovitch, E., Gmitter, T., Swanson, R. M., ve Kwark, Y. H., (1985). "A 720 mV open circuit voltage SiO_x:c-Si:SiO_x double heterostructure solar cell", *Appl. Phys. Lett.*, 47(11):1211-1213.
- [15] Yacobi, B. G., Collins, R. W., Moddel, G., Viktorovitch, P., ve Paul, W., (1981). "Effect of oxygen on the optoelectronic properties of amorphous hydrogenated silicon", *Phys. Rev. B.*, 24:5907-5912.
- [16] Das, D., Iftiqar, S. M., ve Barua, A. K., (1997). " Wide optical gap a-SiO:H films prepared by rf glow discharge", *J. Non-Cryst. Solids*, 210:148-154.
- [17] Beyer, W., (2000). "Comparative study of hydrogen stability in hydrogenated amorphous and crystalline silicon", *J. Non- Cryst. Solids*, 84:266-269
- [18] Haga, K., Yamamoto, K., Kumano, M., ve Watanabe, H., (1986). "Wide Optical-Gap a-Si:O:H Films Prepared from SiH₄-CO₂ Gas Mixture", *Jpn. J. Appl.Phys.*, 25:39-41.
- [19] Janotta, A., Janssen, R., Schmidt, M., Graf, T., Stutzmann, M., Görgens, L., Bergmaier, A., Dollinger, G., Hammerl, C., Schreiber, S., ve Stritzker, B., (2004). "Doping and its efficiency in a-SiO_x:H", *Phys. Rev. B*, 69:115206-1-16.
- [20] Street, R. A., (2005), *Hydrogenated Amorphous Silicon*, 1., Cambridge University Press, Cambridge.
- [21] Sterling, H. F., ve Swann, R. C. G., (1965). " Chemical vapour deposition promoted by r.f. discharge", *Solid-State Electronics*, 8(8):653-654.
- [22] Chittick, R. C., Alexander, J. H., ve Sterling, H. F., (1969). "The Preparation and Properties of Amorphous Silicon", *J. Electrochem. Soc.*, 116(1):77-81.
- [23] Spear, W., ve Le Comber, P. G., (1975). "Substitutional doping of amorphous silicon", *Solid State Comm.*, 17(3):1193-1196.
- [24] Bruno G., Capezzuto, P., Madan, A., (1995). *Plasma Deposition of Amorphous Silicon-Based Material*, ACADEMIC PRESS, California.

- [25] Markvart, T., Castafier, L., (2003). Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Elsevier Science Inc., New York.
- [26] Werner, J. H., ve Bergmann, R. B., (2001). "Crystalline Silicon Thin Film Solar Cells. Tech. Digest Int.", PVSEC-12, Jeju:69-72.
- [27] Fuhs, W., Niemann, K., ve Stuke, J., (1974). "Heterojunctions of Amorphous Silicon and Silicon Single Crystals", AIP Conference Proceedings, 20:345-350.
- [28] Gudovskikh, A. S., Kleider, J. P., Damon-Lacoste, J., Roca i Cabarrocas, P., Veschetti, Y., Muller, J. C., Ribeyron, P. J., ve Rolland, E., (2006). "Interface properties of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells from admittance spectroscopy", Thin Solid Films, 511-512:385-389.
- [29] Wang, Q., Page, M. R., Iwaniczko, E., Xu, Y., ve Roybal, L., (2010). "Efficient heterojunction solar cells on p-type crystal silicon wafers", Applied Physics Letters, 96:013507-1-3.
- [30] Lachenal, D., Andraut, Y., Bätzner, D., Guerin, C., Kobas, M., Mendes, B., Strahm, B., Tesfai, M., Wahli, G., ve Buechel, A., (2010). "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, 6-10 September 2010, Valencia, Spain.
- [31] Kinoshita, T., Kiyama, M. ve Suzuki, H., (2011). "The Approaches for High Efficiency HITM Solar Cell with Very Thin (<100 μm) Silicon Wafer over 23%", Proc. 26th EU PVSEC, Hamburg, Germany.
- [32] Fantoni, A., Vigranenko, Y., Fernandes, M., Schwarza, R., ve Vieira, M., (2001). "Influence of the band offset on the performance of photodevices based on the c-Si/a-Si:H heterostructure", Thin Solid Films, 383:314-317
- [33] Gudovskikh, A. S., Kleider, J. P., Froitzheim, A., Fuhs, W., ve Terukov, E. I., (2004). "Investigation of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells interface properties", Thin Solid Films, 451-452:345-349.
- [34] Fahrner, W., R., Goesse, R., Scherff, M., Mueller, T., Ferrara, M., ve Neitzert, H. C., (2005). "Admittance Measurements on a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells", Journal of The Electrochemical Society, 152(11):G819-G823.
- [35] van Cleef, M. W. M., Rubinelli, F. A., Rath, J. K., Schropp, R. E. I., van der Weg, W. F., Rizzoli, R., Summonte, C., Pinghini, R., Centurioni, E., ve Galloni, R., (1998). "Photocarrier collection in a-SiC:H/c-Si heterojunction solar cells", J. of Non-Crys. Solids, 227-230:1291-1294.
- [36] Korevaar, B., A., Smit, C., van Swaaij, R. A. C. M. M., Schram, D. C., ve van de Sanden, M. C. M., (2001). "Importance of Defect Density near the p-i Interface for a-Si:H Solar Cell Performance", MRS Proceedings, 664:A24-4.
- [37] Balagurov, L., A., Bayliss, S. C., Kasatochkin, V. S., Petrova, E. A., ve Unal, B., (2001). "Transport of carriers in metal/porous silicon/c-Si device structures based on oxidized porous silicon", Journal Of Applied Physics, 90(9):4543-4548.

- [38] Matsuura, H., Okuno, T., Okushi, H., ve Tanaka, K., (1984). "Electrical Properties of n-Amorphous/p-Crystalline Silicon Heterojunctions", *J. Appl. Phys.*, 55:1012-1019.
- [39] Descoedres, A., Holman, Z. C., Barraud, L., Morel, S., De Wolf, S., ve Ballif, C., (2013). ">21% Efficient Silicon Heterojunction Solar Cells on n- and p-Type Wafers Compared", *IEEE Journal Of Photovoltaics*, 3(1):83-89.
- [40] Ferlauto, A. S., Ferreira, G. M., Pearce, J. M., Wronski, C. R., Collins, R. W., Deng, X., ve Ganguly, G., (2002). "Analytical Model for the Optical Functions of Amorphous Semiconductors from the Near-Infrared to Ultraviolet: Applications in Thin Film Photovoltaics", *Journal of Applied Physics*, 92(5):2424.
- [41] Teplin, C.W., Levi, D. H., Iwaniczko, E., Jones, K. M., ve Perkins, J. D., (2005). "Monitoring and Modeling Silicon Homoepitaxy Breakdown with Real-Time Spectroscopic Ellipsometry", *Journal of Applied Physics*, 97:103536.
- [42] Würfel, P., (2005). *Physics of Solar Cells*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [43] Labrune, M., (2011). *Silicon surface passivation and epitaxial growth on c-Si by low temperature plasma processes for high efficiency solar cells*, Doktorra tezi, Ecolé Polytechnique, Paris
- [44] Primig, R. ve Rosan, K., (1986). "Plasma cleaning in an a-Si:H deposition chamber", *Vacuum*, 36(1-3):75-80.
- [45] Page, M. R., Iwaniczko, E., Xu, Y., Qi, W., Yan, Y., Roybal, L., Branz, H., ve Wang, T., (2006). "Well Passivated a-Si:H Back Contacts for Double-Heterojunction Silicon Solar Cells", *IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-4)*, 7-12 May 2006, Waikoloa, Hawaii.
- [46] Angermann H., (2008). "Passivation of Structured p-type Silicon Interfaces: Effect of Morphology and Wet-Chemical Pre-Treatment", *Applied Surface Science*, 254:8067-8074.
- [47] Munoz, D., Carreras, P., Escarré, J., Ibarz, D., Martín de Nicolás, S., Voz, C., Asensi, J. M., ve Bertomeu, J., (2009). "Optimization of KOH Etching Process to Obtain Textured Substrates Suitable for Heterojunction Solar Cells Fabricated by HWCVD", *Thin Solid Films*, 517:3578-3580.
- [48] Taguchi M., Sakata, H., Yoshimine, Y., Maruyama, E., Terakawa, A., ve Tanaka, M., (2004). "An Approach for the Higher Efficiency in the HIT Cells", *Technology R&D Headquarters, Sanyo Electric Co., Ltd.*
- [49] Park J.B., Oh, J. S., Gil, E., Kyoung, S., Kim, J., ve Yeom, G. Y., (2009). "Plasma Texturing of Multicrystalline Silicon for Solar Cell using Remote-Type Pin-to-Plate Dielectric Barrier Discharge", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42:215201.
- [50] Henrion W., Rebiena, R., Angermann, H., ve Röseler, A., (2002). "Spectroscopic Investigations of Hydrogen Termination, Oxide Coverage,

- Roughness and Surface State Density of Silicon During Native Oxidation in Air", *Applied Surface Science*, 202:199-205.
- [51] Tucci M., De Rosa, R., ve Roca, F., (2001). "CF₄/O₂ Dry Etching of Textured Crystalline Silicon Surface in a-Si:H/c-Si Heterojunction for Photovoltaic Applications", *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 69:175-185.
- [52] Tucci M., Salurso, E., Roca, F., ve Palma, F., (2002). "Dry Cleaning Process of Crystalline Silicon Surface in a-Si:H/c-Si Heterojunction for Photovoltaic Applications", *Thin Solid Films*, 403-404:307-311.
- [53] Anandan, C., Mukherjee, C., Seth, T., Dixit, P. N., ve Bhattacharyya, R., (1995). "Effect of Pulse Parameters on the Deposition Rate of Hydrogenated Amorphous Silicon in a Modified Pulsed Plasma Discharge", *Applied Physics Letters*, 66:85.
- [54] van Sark, W., G., J., (2011). *Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [55] Angermann, H., (2008). "Passivation of Structured p-type Silicon Interfaces: Effect of Morphology and Wet-Chemical Pre-Treatment", *Applied Surface Science*, 254:8067-8074.
- [56] Kern, W., (1990). "The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology", *J.Electrochem.Soc.*, 137(6):1887-1891.
- [57] Tucci M., Salurso, E., Roca, F., ve Palma, F., (2002). "Dry Cleaning Process of Crystalline Silicon Surface in a-Si:H/c-Si Heterojunction for Photovoltaic Applications", *Thin Solid Films*, 403-404:307-311.
- [58] A., S., Jason, (2008). *Spectroscopic Ellipsometry Analysis of the Component Layers of Hydrogenated Amorphous Silicon Triple Junction Solar Cells*, Mastir tezi, University of Toledo, Toledo.
- [59] Aspnes, D.E., (1982). "Optical Properties of Thin Films", *Thin Solid Films*, 89:249-262.
- [60] Fujiwara, H., Koh, J., Rovira, P. I., ve Collins, R. W., (2000). "Assesment of Effective-Medium Theories in the Aanalysis of Nucleation and Microscopic Surface Roughness Evolution for Semiconductor Thin Films", *Physical Review B*, 61(16):10832.
- [61] Ferlauto, A. S., Ferreira, G. M., Pearce, J. M., Wronski, C. R., Collins, R. W., Deng, X., ve Ganguly, G., (2002). "Analytical Model for the Optical Functions of Amorphous Semiconductors from the Near-Infrared to Ultraviolet: Applications in Thin Film Photovoltaics", *Journal of Applied Physics*, 92(5):2424.
- [62] Teplin, C.W., Levi, D. H., Iwaniczko, E., Jones, K. M., ve Perkins, J. D., (2005). "Monitoring and Modeling Silicon Homoepitaxy Breakdown with Real-Time Spectroscopic Ellipsometry", *Journal of Applied Physics*, 97:103536.

- [63] Morral, A.F., Cabarrocas, P. R., ve Clerc, C., (2004). "Structure and Hydrogen Content of Polymorphous Silicon Thin Films Studied by Spectroscopic Ellipsometry and Nuclear Measurements", *Physical Review B*, 69:125307.
- [64] Abou-Ras, D., Kirchartz, T., Rau, U., (2011). *Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [65] Fujiwara H., Kaneko, T., ve Kondo, M., (2007). "Application of Hydrogenated Amorphous Silicon Oxide Layers to c-Si Heterojunction Solar Cells", *Applied Physics Letters*, 91:133508.
- [66] Pehlivan Ö., (2013), *Effects of a-Si:H Layer Thicknesses on the Performance of a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells*, Doktora Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [67] Fuyuki, T., Kondo, H., Kaji, Y., Ogane, A., ve Takahashi, Y., (2007). "Analytic findings in the electroluminescence characterization of crystalline silicon solar cells", *J. Appl. Phys.* 101:023711-1-5.
- [68] Hekmatshoar, B., Shahrjerdi, D., Hopstaken, M., ve Sadana, D., (2011). "Metastability of Hydrogenated Amorphous Silicon Passivation on Crystalline Silicon and Implication to Photovoltaic Devices", *Reliability Physics Symposium, IEEE International*, 5E.5.1-5E.5.
- [69] Morral, A. F., ve Cabarrocas, P. R., (2002). "Etching and Hydrogen Diffusion Mechanisms During a Hydrogen Plasma Treatment of Silicon Thin Films, *Journal of Non-Crystalline Solids*", 299-302:196-200.
- [70] Schmidt, M., Angermann, H., Conrad, E., Korte, L., Laades, A., Maydell, K., Schubert, C., ve Stangl, R., (2006). "Physical and Technological Aspects of a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells", *IEEE 4th World Conference*, 1433-1438.
- [71] Chabal, Y. J., Higashi, G. S., Raghavachari, K., ve Burrows, V. A., (1988). "Infrared Spectroscopy of Si (111) Surfaces After HF Treatment: Hydrogen Termination and Surface Morphology", *Applied Physics Letters*, 53:998-1000.
- [72] Levi, D. H., Nelson, B. P., Perkins, J. D., ve Moutinho, H. R., (2003). "In situ Studies of the Amorphous to Microcrystalline Transition of Hot-wire Chemical Vapor Deposition Si:H Films Using Real-Time Spectroscopic Ellipsometry", *Journal of Vacuum Science & Technology*, A 21 (4):1545.
- [73] Maydell, K.v., Conrad, E., ve Schmidt, M., (2006). "Efficient Silicon Heterojunction Solar Cells Based on p- and n-type Substrates Processed at Temperatures < 220 °C", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 14:289-295.
- [74] Damon-Lacoste, J. ve Cabarrocas, P. R., (2009). "Toward a better physical understanding of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells ", *Journal of Applied Physics* 105: 063712.
- [75] Fujiwara, H., Kaneko, T. ve Kondo, M., (2007). "Application of hydrogenated amorphous silicon oxide layers to c-Si heterojunction solar cells ", *App. Phys. Lett.*, 90:013503.

- [76] Lee S. Y., Shim, J. H., You, D. J., Ahn, S., ve Lee, H., (2011). "The Novel Usage of Spectroscopic Ellipsometry for the Development of Amorphous Si Solar Cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95:142–145.
- [77] Pereira, L., Aguas, H., Fortunato, E., ve Martins, R., (2006). "Nanostructure Characterization of High k Materials by Spectroscopic Ellipsometry", *Applied Surface Science*, 253:339-343.
- [78] Ferlauto, A. S., Ferreira, G. M., Pearce, J. M., Wronski, C. R., Collins, R. W., Xunming, D., ve Ganguly, G., (2002). "Analytical Model for the Optical Functions of Amorphous Semiconductors from the Near-Infrared to Ultraviolet: Applications in Thin Film Photovoltaics", *Journal of Applied Physics*, 92(5):2424.
- [79] Anandan C., Mukherjee, C., Seth, T., Dixit, P. N., ve Bhattacharyya, R., (1995). "Effect of Pulse Parameters on the Deposition Rate of Hydrogenated Amorphous Silicon in a Modified Pulsed Plasma Discharge", *Applied Physics Letters*, 66:85.
- [80] Feng, G.F., ve Zallen R., (1989). "Optical Properties of Ion-Implanted GaAs: The Observation of Finite-Size Effects in GaAs Microcrystals", *Physical Review B*, 40:1064.
- [81] Peng, W., Zeng, X., Liu, S., Xiao, H., Kong, G., Yu, Y., ve Xianbo, L., (2009). "Study of Microstructure and Defects in Hydrogenated Microcrystalline Silicon Films", *Photovoltaic Specialists Conference*, 34th IEEE, 001029-001033.
- [82] Mueller, T., Schwertheim, S., ve Fahrner, W. R., (2010). "Crystalline silicon surface passivation by high-frequency plasma-enhanced chemical vapor deposited nanocomposite silicon suboxides for solar cell applications", *Journal Of Applied Physics*, 107:014504.
- [83] Jeon M., Yoshiba, S., Kamisako, K., (2010). "Hydrogenated Amorphous Silicon Film as Intrinsic Passivation Layer Deposited at Various Temperatures using RF Remote-PECVD Technique", *Current Applied Physics*, 10:237-240.
- [84] De Wolf, S., ve Kondo, M., (2007). "Abruptness of a-Si:H/c-Si Interface Revealed by Carrier Lifetime Measurements", *Applied Physics Letters*, 90:042111.
- [85] Tian, C., Cui, R., Huang, M., Wang, J., An, J., Wang, J., Huang, J., Li, X., Wu, C., ve Du, J., (2009). "The Investigation of Al-BSF Passivation Quality", *Proceedings of ISES World Congress (Vol. I – Vol. V):1156-1158*.
- [86] Mueller, T., Schwertheiml, S., Mueller, N., Meusinger, K., Wdowiak, B., Grewel, O., ve Fahrner, W., (2010). "High efficiency silicon heterojunction solar cell using novel structure ", *Proceedings of Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 35th IEEE :683-688.
- [87] Wang, T. H., Page, M. R., Iwaniczko, E., Levi, D. H., Yan, Y., Branz, H. M., Wang, Q., Yelundur, V., Rohatgi, A., Bunea, G., ve Terao, A., (2004). "Toward Better Understanding and Improved Performance of Silicon Heterojunction Solar

Cells", 14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules Winter Park, Colorado August 8–11, 2004.

- [88] Nagel, H., Aberle, A. G., ve Hezel, R., (1999). "Optimised antireflection coatings for planar silicon solar cells using remote PECVD silicon nitride and porous silicon dioxide", Prog. Photovolt Res App. 7 (4):245-260.
- [89] Maydell, K., v., Windgassen, H., Nositschka, W. A., Rau, U., Rostan, P. J., Henze, J., Schmidt, J., Scherff, M., Fahrner, W., Borchert, D., Tardon, S., Brüggemann, R., Stiebig, H., ve Schmidt, M., (2005). "Basic Electronic Properties And Technology Of TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p) Heterostructure Solar Cells: A German Network Project", 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain:822-825.
- [90] Mueller, T., Schwertheim, S., ve Fahrner, W. R., (2008). " Application Of Wide-Bandgap Hydrogenated Amorphous Silicon Oxide Layers To Heterojunction Solar Cells For High Quality Passivation" Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	:Okan YILMAZ
Doğum Tarihi ve Yeri	:17.05.1971 - İstanbul
Yabancı Dili	:İngilizce
E-posta	:okan.yilmaz@tubitak.gov.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Fizik	İstanbul Teknik Üniversitesi	1998
Lisans	Fizik Mühendisliği	İstanbul Teknik Üniversitesi	1994
Lise		Kabataş Erkek Lisesi	1988

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
1997 -	TÜBİTAK	Uzman Araştırmacı

YAYINLARI

Makale

- 1 Pehlivan Ö., Yılmaz O., Kodolbaş A. O., Duygulu Ö., Tomak M., Structural characterization of intrinsic a-Si:H thin films for silicon heterojunction solar cells, Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials, Vol. 15, No. 1-2, pp.

22 – 24, (2013)

- 2 Kavasoglu A. S., Birgi O., Kavasoglu N., Oylumoglu G., Kodolbas A. O., Kangi R., Yilmaz O., Electrical characterization of a-Si:H(n)/c-Si(p) structure, Journal of Alloys and Compounds, vol. 509 issue 39, pp.9394– 9398, (2011)
- 3 Selçik S., Lo-Hive J. P., Yılmaz O., Genevès G., Indirect comparison of 10 V Josephson array voltage standards between the UME and the BNM-LCIE, Metrologia, vol. 38, pp 477-480, (2001).
- 4 Marullo-Reedtz G., Cerri R., Waldmann W., Streit J., Immonen P., Blanc I., Raso F., Funck T., Schumacher B., Dierikx E., Nunes M., Vrabček P., Rudohradský D., Gunnarsson O., Rydler K. E., Jeanneret B., Jeckelmann B., Pulfer T., Turhan S. S., Yilmaz O., Williams J., Slinde H., Lind K., Nicolas J., Lindic m., Flouda E., Erdos G., Comparison EUROMET.EM-K8 od DC Voltage Ratio: Results, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 54, No 2, pp 576-579, (2005)

Bildiri

- 1 Coşkun T. Yılmaz O., Selçik S., An Improvement of DC Voltage Ratio Measurements by Characterization of The DC Voltage Divider at UME", XX. IMEKO Metrology Congress 2012, South Korea
- 2 K. Kutlu, O. Özdemir, U. D. Menda, G. Çelikok, P. Gökdemir, A. E. Saatci, P. Aydoğan, A. O. Kodolbaş, R. Kangı, O. Yılmaz, "Characterization of Doped Amorphous and Crystalline Silicon Interface for HIT Solar Cell", SuNEC Sun New Energy Conference, Sicilya, İtalya, (2011)
- 3 Merev A., Yılmaz O., Kalenderli Ö., Selecting resistors for a high voltage divider, XIIIth ISH International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, (2003)
- 4 Yılmaz Ö., Yılmaz O., Selçik S., UME Gerilim Laboratuvarı ve Türkiyede Gerilim biriminin oluşturulması, 8. Ulusal Elektrik , Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Kongresi, Gaziantep, Türkiye, (1999)
- 5 Yılmaz O., Turhan S., Yılmaz Ö UME-BNM/LCIE 10V Josephson Gerilim Standardı Karşılaştırma Ölçümleri, III. Ulusal Ölçümbilim Kongresi, Eskişehir, Türkiye, (1999)

Proje

1. a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Pillerinin Fabrikasyonu ve Arayüzey Kusurlarının İncelenmesi, TÜBİTAK, Proje No:108T016, Proje Koordinatörü: Doç. Dr. Alp Osman KODOLBAŞ (2008-2012).