

**AMPS-1D PROGRAMI KULLANILARAK
GÜNEŞ GÖZELERİNİN BİLGİSAYAR MODELLEMESİ**

**COMPUTER MODELING OF SOLAR CELLS
BY USING THE AMPS-1D**

TÜLAY OCAK

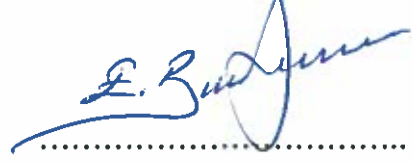
PROF. DR. AYNUR ERAY
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2017

TÜLAY OCAK' in hazırladığı **"AMPS1-D Programı Kullanılarak Güneş Gözelerinin Bilgisayar Modellemesi"** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NANOTEKNOLOJİ VE NANOTIP ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

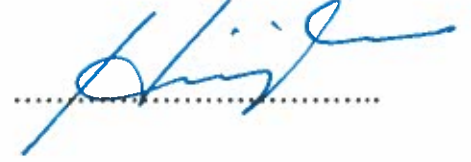
Prof. Dr. Emir Baki DENKBAŞ
Başkan



Prof. Dr. Aynur ERAY
Danışman



Prof. Dr. Hüseyin SARI
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**
(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)
- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**
(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)
- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**
- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

21 / 09 / 2017

TÜLAY OCAK

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

21/09/2017



TÜLAY OCAK

ÖZET

AMPS-1D PROGRAMI KULLANILARAK GÜNEŞ GÖZELERİNİN BİLGİSAYAR MODELLEMESİ

Tülay OCAK

Yüksek Lisans, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aynur ERAY

Eylül 2017, 80 Sayfa

Bu tez çalışmasında, Pennsylvania State Üniversitesi'nden sağlanan AMPS-1D programı kullanılarak, pin yapıdaki tek eklemli hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) güneş gözelerinin bilgisayarla modellenmesi yapılmıştır. Modellemeler yapılırken, Portici-İtalya ENEA araştırma merkezinde hazırlanan göze yapısı göz önüne alınmış, bu merkezde elde edilen deneysel sonuçlarla uyumlu parametrelerle modellemeler yapılması yoluna gidilmiştir. Farklı özelliklere sahip tabakalarla güneş gözelerinin elektriksel ve optik özellikleri incelenmiş, güneş göze dış parametrelerinin (Kısa devre akım yoğunluğu, açık devre voltajı, dolum çarpanı, verim), deneysel olarak ölçülemeyen bant diyagramı, elektrik alan profili, yeniden birleşme oranı gibi iç parametrelerle ilişkisi test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, tampon tabaka eklenmesi ile güneş gözesi verimliliğinin artırılacağı, ancak bant aralığı, tabaka kalınlığı, kusur yoğunluğu katkılama yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak bunun değişkenlik göstereceği görülmüştür. İntrinsik tabaka kalınlığının, güneş göze verimi üzerinde büyük etkiye sahip olduğu, kalınlık düşüşü ile daha kararlı yapılar elde edilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: a-Si:H güneş gözesi, pin yapı, AMPS-1D, modelleme, ışık eşlikli bozulma

ABSTRACT

COMPUTER MODELLING OF SOLAR CELLS BY USING THE AMPS-1D

Tülay OCAK

Master of Science, Nanotechnology and Nanomedicine

Supervisor: Prof. Dr. Aynur ERAY

September 2017, 80 Pages

In this study, hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) single junction solar cell computer modeling has been performed by using AMPS-1D software which provided by Pennsylvania State University. In this thesis, the structure of solar cells have been considered as the same structure of the experimental ones prepared at ENEA-Portici/Italy research center. Electrical and optical properties of solar cells which have different layers have been investigated, relation between external parameters (short circuit current density, open circuit voltage, fill factor, efficiency) and internal parameters which can not be measured by experiments such as band diagram, electrical field profile and recombination rate have been tested. Our findings show that in order to realize further efficiency improvement, graded buffer layer at p+/i interface of single cells is an option, but band gap, thickness and doping concentration and gap states are critical parameters. Thickness of intrinsic layer affects efficiency, by reducing thickness, more stable cells can be achieved.

Key Words: a-Si:H Solar cell, pin structure, AMPS-1D, modeling, light induced degradation

TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca desteğini benden bir an bile esirgemeyen, bilgi ve deneyimini hiç tereddütsüz ve sabırla paylaşan, sadece bu çalışmada değil birçok konuda yol göstericiliğine başvurduğum saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Aynur ERAY'a, keyifli sohbeti ve motive edici tavırlarıyla hep destek olan kıymetli hocam Öğretim Görevlisi Sermet ERAY'a,

sadece tez yazım sürecinde değil, yaşamımın her anında bana destek olan, güç aldığım sevgili kardeşim Nuray KESER'e, sevgili annem İpek OCAK'a ve sevgili babam Kanber OCAK'a,

çalışma hayatının yanısıra, bu süreçte de hep yanımda hissettiğim, dikkatine her zaman güvendiğim, düzeltmeler konusunda bana yardımcı olan genç çalışma arkadaşım Gaye YILDIRIM'a,

çalışmam boyunca beni her zaman cesaretlendiren sevgili dostlarım Başak Beyhan GÜDÜLLÜOĞLU, Can ÖZTÜRK, Berna ALAYLI, Handan ARSLANTAŞ, Songül CAMGÖZ, Alper GERÇEK, Muazzez POLAT, Ebru Halime ÜNAL'a

ders dönemi ve tez yazım süreci boyunca çalışma saatlerim konusunda esneklik sağlayan ve desteklerini esirgemeyen değerli yöneticilerim Mehmet BULUT, Ulvi KOYUNCU ve Okan USLU'ya

bu çalışmanın yapılabilmesi için ihtiyaç duyduğum yazılımı ücretsiz olarak sağlayan Pennsylvania State Üniversitesi'nden Prof. Stephen Fonash ve ekibine, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER.....	v
ÇİZELGELER.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL KESİM	10
2.1. Güneş Gözelerinin Çalışma İlkesi ve Göze Parametreleri	10
2.2. Pin Yapılı a-Si:H Güneş Gözeleri.....	13
3. AMPS-1D YAZILIMI	22
4. MODELLEME ÇALIŞMALARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	33
4.1. pin Yapıdaki Amorf Silikon Güneş Göze Katmanları İçin En İyi Değerlerin Elde Edilmesi.....	38
4.1.1. P Katkılı a-SiC:H Yayıcı Tabakanın İncelenmesi	39
4.1.2. p ⁺ /i Arayüzeyindeki Tampon Tabakanın İncelenmesi	50
4.1.2.1. Dereceli Tampon Tabakanın Optimizasyonunda Bant Ofsetlerin Etkisi	51
4.1.2.2. Dereceli Tampon Tabakanın Optimizasyonunda Tampon Tabaka Kusur Yoğunluğunun Etkisi.....	54
4.1.3. ENEA Tarafından Yapılan Degredasyon Kinetiği Çalışmalarının Modellenmesi	57
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	66
KAYNAKLAR.....	69
EK-1 DOPING-FREE SILICON THIN FILM SOLAR CELLS USING A VANADIUM PENTOXIDE WINDOW LAYER AND A-LiF/Al BACK ELECTROD.....	75
ÖZGEÇMİŞ	80

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1.1 Güneş gözelerinin gelişim teknolojilerine göre sınıflandırılması.....	2
Şekil 1.2 a) pin yapılı güneş gözesi b) nip yapılı güneş gözesi	4
Şekil 2.1 Tek eklemlili bir güneş gözesinin yapısı.....	10
Şekil 2.2 Güneş Gözesinin Aydınlıkta Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim Eğrisi	11
Şekil 2.3 İdeal ve Gerçek Bir Göze İçin Kuantum Verim Eğrisi	13
Şekil 2.4 Tek kristal silikon ve amorf silikonun atomik yapısı	14
Şekil 2.5 pin yapıda tek eklemlili a-Si:H bir güneş gözesinin yapısı	15
Şekil 2.6 pin yapıda tek eklemlili a-Si:H bir güneş gözesinin bant yapısı	16
Şekil 3.1 Ana veri giriş ekranı ekran görüntüsü.....	23
Şekil 3.2 Sıcaklık giriş ekranı ekran görüntüsü	24
Şekil 3.3 Gerilim değerleri giriş ekranı ekran görüntüsü	24
Şekil 3.4 Spektrum giriş ekranı ekran görüntüsü	25
Şekil 3.5 Soğurma katsayıları giriş ekranı ekran görüntüsü.....	26
Şekil 3.6 Ön ve arka kontak parametre giriş ekranı ekran görüntüsü	27
Şekil 3.7 Malzemede kullanılan tabaka parametrelerinin giriş ekran görüntüsü ..	28
Şekil 3.8 AMPS-1D'de göz önüne alınan bant uzantı durumları	29
Şekil 3.9 Bant uzantı parametre ekranı.....	30
Şekil 3.10 Kusur yoğunluğu tanımlama ekranı.....	30
Şekil 3.11 AMPS-1D'deki bant aralığındaki kusur durumları	31
Şekil 3.12 Grafik ekranı ekran görüntüsü.....	32
Şekil 3.13 Grafik izleme ekranı ekran görüntüsü	32
Şekil 4.1 Güneş gözesi katman yapısı	33
Şekil 4.2 Bant Ofsetler a) İletkenlik bandında ofset verilmesi b) Değerlik bandında ofset verilmesi c) İletkenlik ve değerlik bantlarının arasında ofset verilmesi.....	38
Şekil 4.3 p-katkılı a-SiC:H yayıcı tabakadaki farklı kusur yoğunluğu için göze parametrelerinin tampon tabaka kusur yoğunluğu ile değişimi.....	40
Şekil 4.4 p-katkılı a-SiC:H yayıcı tabakadaki farklı kusur yoğunlukları için yeniden birleşme oranının, tampon tabaka kusur yoğunluğu ile değişimi (Termodinamik dengede)	41
Şekil 4.5 p-katkılı a-SiC:H yayıcı tabakadaki farklı kusur yoğunlukları için elektrik alanın konum ile değişimi	42

Şekil 4.6 p-katkılı a-SiC:H yayıcı tabakadaki farklı kusur yoğunlukları için elektrik alanın konum ile değişimi	42
Şekil 4.7 p-katkılı tabaka katkılama değişimine göre kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi ve verim değişimi	44
Şekil 4.8 p-katkılı tabaka katkılama değişimine göre yeniden birleşme oranının değişimi	45
Şekil 4.9 P Katkılı tabaka katkılama değişimine göre elektrik alan değişimi	46
Şekil 4.10 p-katkılı tabaka kalınlığının kısa devre akım yoğunluğu değerleri üzerinde etkisi	47
Şekil 4.11 p-katkılı tabaka kalınlığının gerilim değerleri üzerinde etkisi	49
Şekil 4.12 Tampon tabaka olmadığı durumda p-katkılı tabaka kalınlığına karşılık spektral tepki değişimi	49
Şekil 4.13 p-katkılı tabaka ve tampon katkılı tabaka kalınlığına karşılık spektral tepki değişimi	50
Şekil 4.14 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örneğe ait tampon tabakaların bant ofset değişikliğinin, kısa devre akım değerlerine etkisi	52
Şekil 4.15 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örneğe ait tampon tabakaların bant ofset değişikliğinin gerilim değerlerine etkisi	53
Şekil 4.16 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örneğe ait tampon tabakanın üç farklı ofset verilmesi durumu için yeniden birleşme değerleri	53
Şekil 4.17 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örnekte yer alan tampon tabakalara ait kusur yoğunluklarının açık devre gerilimi üzerindeki etkisi ($p_{\text{katki}}:3.10^{19} \text{ cm}^{-3}$) .	55
Şekil 4.18 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örnekte yer alan tampon tabakalara ait kusur yoğunluklarının açık devre gerilimi üzerindeki etkisi ($p_{\text{katki}}:1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$) .	56
Şekil 4.19 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örnekte yer alan tampon tabakalara ait kusur yoğunluklarının yeniden birleşme oranı üzerindeki etkisi	57
Şekil 4.20 İntrinsik tabaka kusur yoğunluğu için kısa devre akım yoğunluğun intrinsik tabaka kalınlığı ile değişimi	59
Şekil 4.21 İ tabaka kalınlık ve kusur yoğunluğu değişimi için dolum çarpanı	60
Şekil 4.22 300 ve 500 nm kalınlığındaki intrinsik tabakalarda, termodinamik dengede elektrik alanın konum ile değişimi	61
Şekil 4.23 800 nm – 1000 nm kalınlığındaki intrinsik tabakalarda, termodinamik dengede elektrik alanın konum ile değişimi	62

Şekil 4.24 300 nm ve 500 nm kalınlığındaki intrinsik tabakalar için yeniden birleşmelerin konuma göre değişimi	63
Şekil 4.25 800 nm ve 1000 nm kalınlığındaki intrinsik tabakalar için yeniden birleşmelerin konuma göre değişimi.....	64
Şekil 4.26 a) 300 nm b) 1000 nm kalınlığında intrinsik tabakalar için kusur yoğunluğuna bağlı spektral tepki değişimi.....	65

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 4.1 Pin yapılı gözelerde kullanılan parametre seti	35
Çizelge 4.2 Dereceli tampon tabaklar için kullanılan parametreler seti.....	36
Çizelge 4.3 Toplam yayıcı tabaka içinde tampon tabaka kalınlığının etkisi	48
Çizelge 4.4 ENEA araştırma merkezi laboratuvarında elde edilen ışık eşlikli bozulma deney sonuçları	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

α	Soğurma Katsayısı
ϵ	Dielektrik Sabiti
η	Verim
Φ	İş Fonksiyonu
χ	Elektron Duygunluğu
N_d	Verici Tipi Katkılama Yoğunluğu
N_a	Alıcı Tipi Katkılama Yoğunluğu
E_A	Aktivasyon Enerjisi
E_C	İletim Bantı Kenarı
E_V	Değerlik Bantı Kenarı
E_F	Fermi Düzeyi
E_g	Bant Aralığı
J_{ad}	Kısa Devre Akımı
V_{ad}	Açık Devre Gerilimi
ΔE_v	Değerlik Bantı Ofseti
ΔE_c	İletkenlik Bantı Ofseti
N_C	İletim Bantı Etkin Durum Yoğunluğu
N_V	Değerlik Bantı Etkin Durum Yoğunluğu

Kısaltmalar

DÇ	Dolum Çarpanı
DTT	Dereceli Tampon Tabaka
$d_{p\text{-tabaka}}$	p-Katkılı Tabaka Kalınlığı
$d_{i\text{-tabaka}}$	İntrinsik Tabaka Kalınlığı
$d_{n\text{-tabaka}}$	n-Katkılı Tabaka Kalınlığı
d_{DTT}	Dereceli Tampon Tabaka Kalınlığı

d_{ty}	Toplam Yayıcı Kalınlığı
DTT_{kusur}	Tampon Tabaka Kusur Yoğunluğu
p_{katki}	p-Katkılı Tabaka Katkı Yoğunluğu
p_{kusur}	p-Katkılı Tabaka Kusur Yoğunluğu

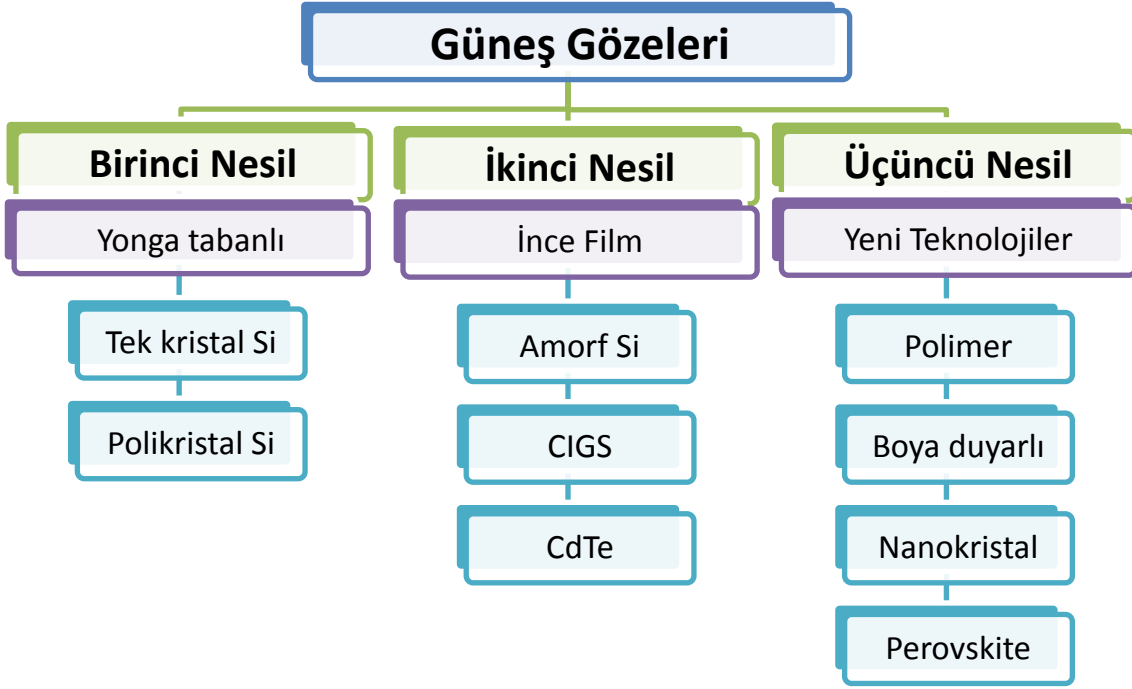
1. GİRİŞ

Fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri ve yakıt kaynaklarının gittikçe azalması nedeniyle, özellikle son yıllarda temiz tükenmez enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır [1][2][3]. Bu kapsamda Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemler ve bu sistemlerde kullanılan güneş gözeleri üzerine yapılan çalışmalar da, dünya ölçeğinde hız kazanmıştır [2][4][5].

Fotovoltaik etkinin tarihi, 1839 yılında A.E.Becquerel tarafından fotovoltaik etkinin keşfine uzanmaktadır [6]. %6 dönüşüm verimliliğine sahip silikon bazlı ilk güneş gözesi, 1954 yılında D.M.Chapin ve arkadaşları, tarafından üretilmiştir [7]. Güneş gözelerinin maliyetlerini azaltmak ve verimlerini artırmak, halen üzerinde yoğun çalışmaların yapıldığı güncel konulardır. Kırk yıla uzanan literatür incelendiğinde, güneş gözelerinin gelişimi için farklı teknolojilerin kullanıldığı göze çarpmaktadır [4][5][8]. **Şekil 1.1**'de özetlenen bu teknolojiler üç ana başlık altında toplanmaktadır:

- İlk nesil, yonga (wafer) tabanlı kristal silikon güneş gözelerinde ulaşılan en iyi verim, laboratuvar araştırmalarında %25, ticari olarak %15-18' dir [8].
- İkinci nesil gözeler, amorf silikon, bakır indiyum galyum selenid (CIGS), kadmiyum tellür (CdTe) ince filmlerden oluşmaktadır.
- Üçüncü nesil gözeler, polimer, boya duyarlı, nanokristal [9] ve perovskite güneş gözelerinin yer aldığı yüksek verimlerin elde edildiği yeni teknolojiler grubudur. Almanya Fraunhofer Enstitüsü tarafından nanoteknoloji kullanılarak %44.7 verime ulaşılmıştır [4]. Perovskite/c-Si tandem yapı ile %31 verim elde edilmiştir [10]. Kararlı yapıda ticari ürün elde etme çalışmaları halen devam etmektedir.

İnce film güneş gözeleri, ilk nesil kristal silikon güneş gözelerine oranla daha düşük verime sahip olmalarına karşın, daha az malzeme gereksinimi, daha düşük maliyetle çelik, cam, plastik gibi alt tabanlar üzerine hazırlanabilmeleri gibi avantajları nedeniyle üzerinde çok çalışılan konulardan birisi olmuştur [11][12].



Şekil 1.1 Güneş gözelerinin gelişim teknolojilerine göre sınıflandırılması

İnce film teknolojisinde en yüksek verime, bant aralığı 1.7 eV olan ve güneş ışığını kristal silikona oranla daha fazla soğuran, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) ile ulaşılmıştır. a-Si:H güneş gözelerinde, güneş ışığına açıldığında gözlenen **ışık eşlikli bozulma (Light Induced Degradation)** diğer bir deyişle **Staebler-Wronski** etkisi, bu malzemeler için bir dezavantaj gibi görünse de bu bozulmanın etkisinin az olduğu ince ve kaliteli a-Si:H gözelerin hazırlanması üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır [5][12][13]

Pin yapılı a-Si:H ince film güneş gözeleri;

Cam/ geçirgen iletken oksit / (p) a-Si:H / intrinsik a-Si:H / (n) a-Si:H/ metal

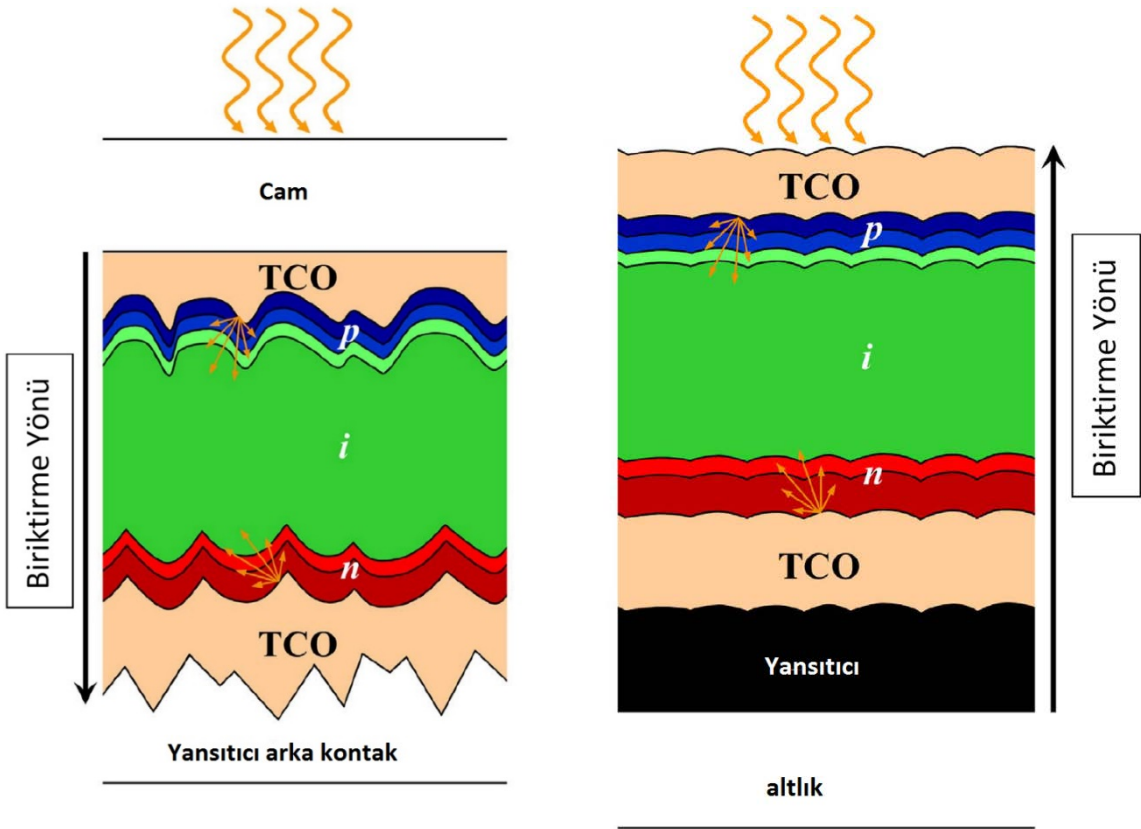
yapıda hazırlanmaktadır. Gözede ışık, p-katkılı a-Si:H tarafından gelmekte ve bu tabaka pencere görevi üstlenmektedir. Gelen fotonların saf intrinsik tabakada soğrulmasıyla oluşan elektron-deşik çiftleri, p-katkılı ve n-katkılı a-Si:H tabakaları arasındaki saf intrinsik tabakada oluşan yapısal elektrik alan yardımıyla ayrılmakta, yüklü taşıyıcılar ön ve arka metal kontaklarda toplanarak güneş gözünün güç üretmesine katkı sağlamaktadır. Pin yapılı a-Si:H gözelerde;

- Işığın geldiği yüzeyde yansıtmasız kaplama (antireflection coating-ARC) olarak kullanılan geçirgen iletken oksit malzemesi için, kalay katkılı indiyum oksit ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$, kısa adıyla ITO) [14], flor katkılı kalay dioksit ($\text{SnO}_2:\text{F}$, kısa adıyla FTO) [15], alüminyum katkılı çinko oksit ($\text{ZnO}:\text{Al}$) [12]
- p-tabaka olarak, karbon (C) ilave edilerek bant genişliği arttırılmış 10-30 nm kalınlıkta p-katkılı a-SiC:H [12][3]
- Arka kontak olarak yüksek yansıtma özelliği olan çinko oksit (ZnO), alüminyum (Al), gümüş (Ag) [16].

kullanılmaktadır. Katkılı a-Si:H tabakaların difüzyon uzunluğunun kısa olması nedeniyle, p-n eklemindeki elektrik alanda serbest yüklü taşıyıcıların ayrılması için yaşam süresi çok kısa olduğundan, n ve p tipi katkılı malzemeler arasına katkılanmamış intrinsik a-Si:H tabaka yerleştirilerek, gözeler pin yapıda hazırlanmaktadır.

İnce film güneş gözelerinde, homoeklemler, heteroeklemler, pin, nip [17] yapılı gibi farklı yapılarda eklemler oluşturulabilmektedir. pin ve nip yapılı güneş gözelerinin kesiti **Şekil 1.2**'de verilmiştir.

Pin yapıda, alttaş/altlık olarak kullanılan malzemenin geçirgen ve yüksek sıcaklık işlemlerine karşılık dayanıklı olması gerektiğinden, Corning cam altlıklar üzerine biriktirme yapılır. Nip yapı için ise opak, saydam olmayan altlıklar gerektiğinden, polimer, paslanmaz çelik gibi birçok malzeme kullanımı açısından esneklik vardır [18].



Şekil 1.2 a) pin yapılı güneş gözesi b) nip yapılı güneş gözesi

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H), yaklaşık 1.7-1.8 eV'lik bir optik aralığa sahiptir ve bu enerjinin altında enerjiye sahip fotonları soğurmaz. Göze içinde foton soğurulmasını arttırmak için, farklı bant aralıklarına sahip malzemelerin bir araya getirildiği çoklu eklemler kullanmak gerekmektedir [3]. Günümüzde a-Si:H gözeler kullanılarak ikili ve üçlü eklem yapıları ile laboratuvar ölçeğinde %15, ticari olarak %11 verimli fotovoltaik modüller elde edilmiştir [4].

Amorf silikon fotovoltaik güneş gözelerinin ortaya çıkışı, 1965 yılında Sterling ve arkadaşlarının silan gazı kullanarak alttaş üzerine silikon biriktirmesine uzanmaktadır. Kısa bir süre sonra 1969 yılında Chittick ve arkadaşları plazma eşikli kimyasal buhar biriktirme tekniği (Plasma enhanced chemical vapor deposition-PECVD) ile ilk intrinsik amorf silikon filmleri üretmişlerdir. Spear ve LeComber 1975 yılında n tipi (bor ile katkılama) ve p tipi (fosfor ile katkılama) katkılamanın olası olduğunu göstermiş [19], Carlson ve Wronski ise 1979 yılında ilk deneysel a-Si:H

güneş gözesini RCA Laboratuvarlarında geliştirdiğini duyurmuşlardır [20]. Bu, geçirgen iletken oksit kaplı cam üzerinde biriktirilmiş, alüminyum arka kontaklı, tek eklemlili pin yapıda a-Si:H güneş gözesi %2.4 verimliliğe sahiptir.

1983 yılında A.Matsuda [22], p ve n tipi mikro kristal silikon geliştirerek ince film güneş gözeleri teknolojisi gelişiminde yeni bir kilometre taşı oluşturmuşlardır [21]. Bu yeni malzeme 1987 yılında Y.Hattori ve arkadaşları [23] tarafından ilk mikrokristal silikon yayıcıya sahip ince film güneş gözesi yapımında kullanılmıştır.

1990'lı yıllarda daha kaliteli ve daha kararlı soğurucu malzeme yapımına duyulan ihtiyaç nedeniyle, intrinsik mikro kristal silikon malzemeye duyulan ilgi giderek artmıştır. 1992 yılında Faraji ve arkadaşları çok yüksek frekanslı plazma eşlikli kimyasal buhar biriktirme (VHF-PECVD) kullanmış, Rath ve arkadaşları ise sıcak tel kimyasal buhar biriktirme (hot wire CVD) yöntemini kullanarak önemli gelişmelere neden olmuşlardır [21].

X.Xu ve arkadaşları, optimize edilmiş koşullarda hidrojenle seyreltme (Hydrogen dilution) yapılmasıyla hem hidrojenlenmiş amorf silikon (a-Si:H) hem de hidrojenlenmiş amorf silikon germanyum (a-SiGe:H) gözelerde verim artışının sağlandığını belirtmişlerdir [24].

C.Longeaud ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, amorf matrisinin içerisine eklenmiş nano partiküllerden kaynaklı olarak elektronik iletimin geliştiği bildirilmiş, ancak bu çalışmanın henüz araştırma aşamasında olduğu da eklenmiştir [25].

S.Tchakarov ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [26], pin yapı içerisindeki intrinsik tabaka için polimorf silikon (pm-Si) film biriktirme esnasında toplam basınçtaki artışın, güneş gözesi parametreleri ve toplam verimlilik üzerinde güçlü bir etki yarattığını belirtmişlerdir. Bu durum, basınçla birlikte iyon enerjisinin azalmasıyla açıklanmakta, dahası Helyum seyreltme uygulanması ile desteklenmektedir. Hidrojen yerine Helyum kullanılmasının,

- düşük RF gücünde biriktirme oranının artması nedeniyle p-tabakaya bombardımanın azalmasıyla, Hidrojenin kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında, Helyum ile hazırlanan örneklerin dolum çarpanının daha iyi olduğu,
- polimorf silikon üretiminde kullanılan Silan-Helyum karışımında çok küçük oranda Hidrojen olması nedeniyle, B-H komplekslerinin oluşmasının önüne

geçildiği, bu nedenle Helyum kullanılarak hazırlanan gözelerin daha yüksek açık devre gerilimine sebep olduğu,

- Helyum seyreltme ile üretilen düşük bant aralığına sahip pm-Si:H filmlerin gözenin kısa devre akımını arttırdığı

gibi birçok avantajının olduğunu eklemişlerdir. N. Souffi ve arkadaşları da, 2002 yılında yaptıkları çalışmada, Helyumla seyreltilmiş filmlerin, ışığa maruz bırakma ve tavlama karşısında gösterdikleri tepki açısından, optimize edilmiş standart filmler kadar kararlı olması nedeniyle iyi bir alternatif oldukları belirtilmiştir [27].

H.N.Wanka ve arkadaşları, kısa devre akımında büyük etkisi olan, geçirgen iletken oksit tabaka (TCO) / p arayüzünü optimize etmek için, SnO₂, ZnO, ITO gibi farklı malzemeler kullanarak etkilerini çalışmışlar, TCO'ların yüzeyinde meydana gelen kimyasal ve yapısal değişiklikleri analiz etmişlerdir [14].

Amorf silikon güneş gözesinde ışık eşlikli bozulmanın önüne geçmek için, M.Ito ve arkadaşları 2004 yılında yaptıkları bir çalışmayla, özgün bir malzeme geliştirdiklerini duyurmuşlardır. Amorf silikon malzemenin içerisine homojen bir biçimde ölçü ve dağılımlarını tabaka tabaka kontrol ederek biriktirme yöntemiyle nano kristaller eklenmiş ve yapıya nanoyapılı silikon adını vermişlerdir. Işık eşlikli bozulma oranı %19 olan standart bir a-Si:H gözenin bozulma oranını %5'in altına indirmeyi başarmışlardır. Nanoyapılı bu gözelerin başlangıç verimleri standart göze verimi ile aynı olmamasına rağmen, standart gözelerin verimi ışık eşlikli bozulma süresinin ardından %6,8 olurken, nanoyapılı güneş gözelerinin verimi %7,3 olmuş, standart gözelerin verimini geçmiştir [28].

Amorf silikon, ticari olarak en yaygın olarak kullanılan amorf yarı iletkenlerden birisi olmakla birlikte, a-Si cihazların spektrum değişikliğine karşı duyarlılığı da hala tam olarak anlaşılamamıştır. Güneş gözesi dizilerinin mevsimsel olarak farklı performans sergilediği, tipik olarak da yazın, kışın elde edilen değerlerden daha yüksek verimlilik elde edildiği düşünülmektedir. Bu geleneksel yaklaşımda, genel olarak bu değişimde Staebler-Wronski etkisinin olduğu, spektrumdaki varyasyonlardan küçük oranda bir etkilenme olduğu varsayılmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar, spektral değişimlerin etkisinin (günün saati, mevsim ve atmosferik koşulların etkisiyle) sanıldığından daha büyük olduğunu göstermektedir. R. Gottschalg ve arkadaşları, 2004 yılında yaptıkları çalışmada, tek ve çok eklemler

amorf silisyum güneş gözelerinin, deniz ikliminde, spektral değişimlerin etkisinin performans parametrelerinin üzerindeki etkisini ölçmek üzere bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir [29].

Güneş gözeleri tasarımı için çok iyi birer araç olmaları nedeniyle, deneysel çalışmaların yanı sıra, bilgisayar modellemelerinin de yapılması son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Modelleme çalışmaları ile bant yapısının yanı sıra, deneysel olarak elde edilemeyen, yapı içindeki elektrik alan dağılımı, üretim hızı (generation rate), yeniden birleşme hızı (recombination rate), serbest ve tuzaklanmış taşıyıcı yoğunluğu dağılımı da elde edildiğinden, göze fiziğinin anlaşılması ve göze hazırlanması için en uygun deneysel koşulların öngörülmesinde yardımcı olmaktadır [30][31][32][33][34][35][36]. Literatürde, ince film güneş gözelerinin modellenmesi için birçok program yer almaktadır. Bu programlardan en yaygın olarak kullanılanlar; Pennsylvania State Üniversitesi tarafından geliştirilen AMPS-1D [37], Ljubljana Üniversitesi tarafından oluşturulan ASPIN, Hahn-Meitner Enstitüsü tarafından oluşturulan AFORS-HET [38], IBM'e ait PC1D, Delft Üniversitesi tarafından geliştirilen ASA [30], Gent Üniversitesi tarafından geliştirilen SCAPS [32] ve FCT-UNL/Uninova'ya ait bir program olan ASCA'dır [39]. ASCA dışındaki adı geçen bütün bu programlar tek boyutludur. $\mu\text{-Si:H}$, nanokristal içeren a-Si gibi uzamsal olarak homojen olmayan soğurucu malzemelerin ve yüzey dokulu alttaşların kullandığı ve optimizasyon amaçlayan modelleme çalışmalarında, yatay boyutlarda uzamsal değişimler içeren, iki ya da üç boyutlu modellemelere gerek duyulmaktadır [40]. Sentaurus TCAD [41] ve Silvaco [42] ise üç boyutlu modelleme olanağı sağlayan son yıllarda kullanılmaya başlanmış programlardandır.

Modelleme sonuçlarının kullanılabilirliği, doğrudan nümerik modellerin çalışması için gerekli girdi parametrelerinin güvenilirliğine bağlıdır. Modelleme programlarıyla deneysel olarak sonuca varılması mümkün olmayan model parametrelerinin etkilerinin incelenmesi mümkündür. Parametreler birbirinden bağımsız olarak değiştirilebilirken, değişikliklerin göze konfigürasyonu üzerindeki sonuçları da hızla görülebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, ince film güneş göze üretimi için en yaygın malzeme türlerinden olan pin yapıları amorf silisyum ince film güneş gözelerinin çalışma prensibi incelenmiş ve en iyi göze parametrelerinin elde edilebilmesi amacıyla modellemeler yapılmıştır. a-Si:H güneş gözelerinin fiziğini anlamak ve en iyi göze

değerlerinin bulunabilmesi maksadıyla, AMPS-1D programının Windows 95/NT için geliştirilmiş BETA 1.0 versiyonu kullanılarak modellemeler yapılmıştır.

Pin yapıda a-Si:H güneş gözeleri modellenirken, Portici - İtalya ENEA araştırma merkezinde hazırlanan göze yapısı göz önüne alınmış, bu merkezde elde edilen deneysel sonuçlarla uyumlu parametrelerle modellemeler yapılması yoluna gidilmiştir. Modellemelerde kullanılan pin göze yapısı;

Cam/Ag/ SnO₂/(p) a-SCi:H / (tampon) a-SiC:H / (i) a-Si:H / (n) a-Si:H/ ZnO/Ag

şeklinde. ENEA araştırma merkezinde, pin yapı hazırlanması sırasında, (p) katkılı a-SCi:H ve intrinsik a-Si:H tabakaların bant aralıklarındaki büyük fark nedeniyle, oluşacak bant ofsetleri sonucu yaratılan serbest elektronların p-tabakaya geri difüzyonunu önlemek amacıyla, bu iki tabaka arasına ince katkısız a-SiC:H tampon tabaka yerleştirilmiştir.

Modelleme sırasında da p-tabaka ve i-tabaka arasına eklenen a-SiC:H tabakanın p+/i arayüzeyine etkisi incelenmiştir. Tampon tabaka yerleştirilirken bant aralığının kademeli olarak düşürüldüğü, beş tabakanın birleşimi olan dereceli tampon tabaka (DTT) göz önüne alınmıştır.

Pin yapı a-Si:H gözelerin modellemeler sırasında,

- p-tabakasının katkı yoğunluğu, kalınlığı, kusur yoğunlukları,
- p+/i arayüzeyine yerleştirilen a-SiC:H tampon tabakanın kalınlığı, kusur yoğunlukları, bant aralığı
- intrinsik tabakanın kalınlığı, kusur yoğunlukları,
- bant ofsetleri,

değiştirilerek bu parametrelerin, modellenmiş akım-gerilim (I-V) eğrilerine ve modellenmiş kuantum verimi eğrilerine etkileri incelenmiştir. Işık eşikli bozulma kinetiği de incelenerek, ENEA deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tez kapsamında, literatürden alınan deneysel verilerle AMPS-1D kullanılarak CIGS güneş gözelerinin de modellenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, çok sayıda modelleme çalışması denenmiş, ancak literatürde verilen parametrelerin kullanılmasına karşın, bu çalışmalarda belirtilen sonuçlar elde edilememiştir. Gruplarla yapılan yazışmalar da sonuçsuz kaldığından, CIGS güneş gözeleri ile ilgili çalışmalara bu tez kapsamında yer verilmemiştir.

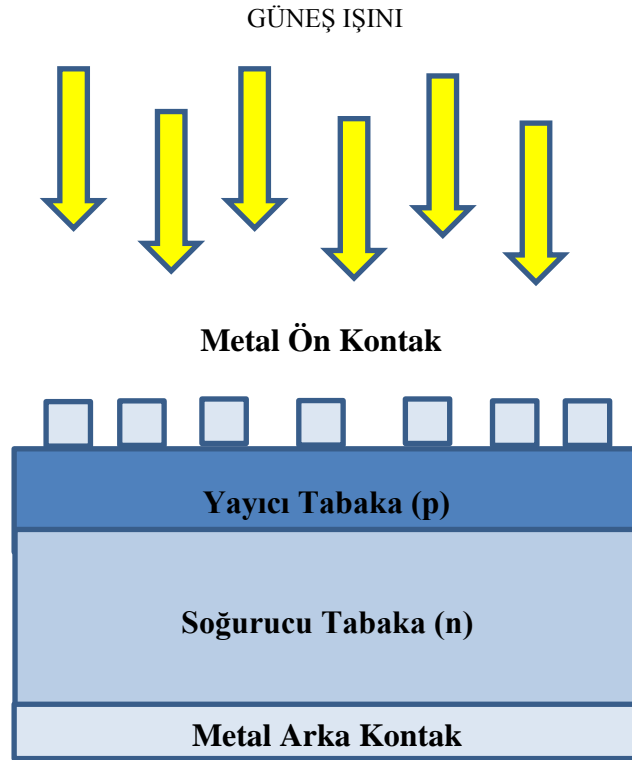
Tez çalışması devam ederken, Güney Kore'de yer alan Kore Malzeme Bilimleri Enstitüsü'nde araştırma yapan bir gruptan gelen istek üzerine, grubun deneysel çalışmalarının modellenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmış ve bu çalışma sonucu üretilen makale EK 1'de sunulmuştur.

Tezin Giriş bölümünde, son yıllarda yapılan çalışmalar da dahil olmak üzere literatür çalışmaları özetlenmiş, ikinci bölümünde güneş gözelerinin fiziği ile ilgili kuramsal açıklamalar yapılmış, üçüncü bölümde AMPS-1D programı ve temel çalışma prensibi anlatılmıştır. Dördüncü bölümde modellemelerin nasıl yapıldığı ve elde edilen sonuçlar detaylarıyla verilmiştir. Sonuç bölümünde ise bu çalışmadan ulaşılan sonuçlara dayalı elde edilen bulgular ve değerlendirmeler verilmiştir.

2. KURAMSAL KESİM

2.1. Güneş Gözelerinin Çalışma İlkesi ve Göze Parametreleri

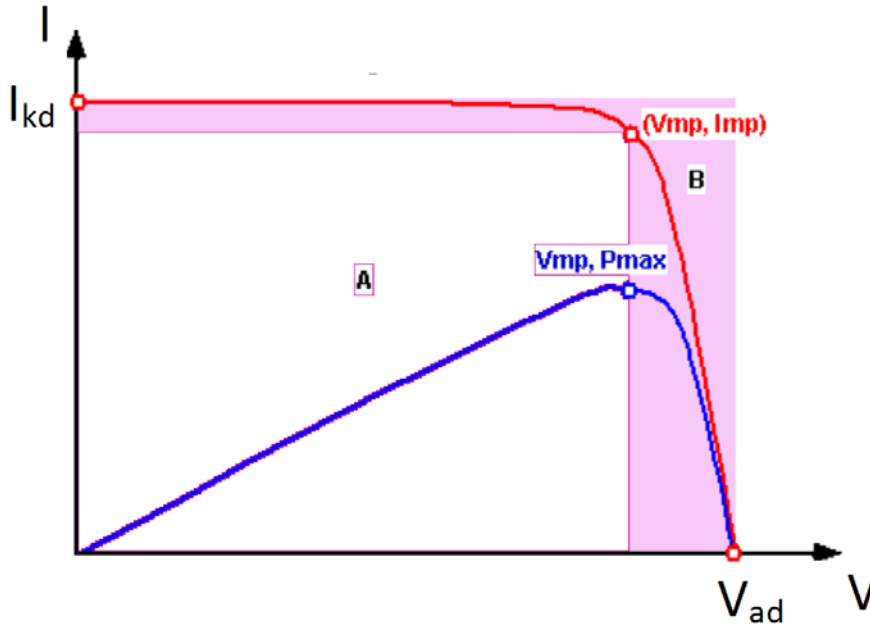
Güneş gözeleri, üzerine düşen güneş ışığını soğurarak elektrik enerjisine çeviren aygıtlardır ve genelde p-n eklemleri ile oluşturulmaktadır [1]. Tek eklemlili basit p-n güneş gözesinin yapısı, **Şekil 2.1**'de verilmiştir. P türü katkılanmış yayıcı tabaka, gelen ışının bu tabakada soğrulmadan geçmesini sağlayacak şekilde, pencere özelliği taşımaktadır. Gelen ışının, soğurucu tabakada soğrulmasıyla oluşan serbest elektronlar ve deşikler, p-n eklem bölgesinde oluşan yapısal alanla birbirinden ayrılır. Deşikler p- katkılı tabakaya, elektronlar n- katkılı tabakaya doğru ilerler ve sırasıyla ön elektrot ve arka elektrotta toplanarak, dış devrede akım oluştururlar [43].



Şekil 2.1 Tek eklemlili bir güneş gözesinin yapısı

Güneş gözelerinin aydınlık akım-gerilim eğrisi

Güneş gözesinin aydınlıkta akım-gerilim eğrisi **Şekil 2.2**'de verilmiştir. Aydınlık eğrisinden yararlanılarak, dört temel güneş göze parametresi olan **açık devre gerilimi**, **kısa devre akımı**, **dolum çarpanı** ve **verim** elde edilmektedir: Açık-devre gerilimi (V_{ad}), gözenin uçları arasındaki direnç sonsuz iken, yani devre açık iken ölçülen gerilimdir. Kısa devre akımı (I_{kd}) ise gözenin iki ucu arasındaki direnç sıfır iken, yani kısa devre yapılmışken ölçülen akımdır. İdeal koşullarda bu değer, ışınım ile oluşturulan akım değerine eşittir.



Şekil 2.2 Güneş Gözesinin Aydınlıkta Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim Eğrisi

Dolum Çarpanı (DÇ), akım-gerilim grafiğinin kareselliğinin bir ölçüsüdür. $V_{mp} \cdot I_{mp}$ çarpımı ile tanımlanan A alanının, $V_{ad} \cdot I_{kd}$ çarpımı ile tanımlanan B alanına oranı ile tanımlanır;

$$DÇ = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{ad} I_{kd}} \quad (2.1)$$

Burada V_{mp} ve I_{mp} , sırasıyla maksimum güç noktasındaki gerilim ve akımdır.

Bir güneş gözesinin **verimi** (η), gözeye gelen güneş enerjisinin ne oranda elektrik enerjisine çevrildiği ile belirlenir. P_{gelen} , gözeye gelen toplam ışınım olmak üzere, göze verimi

$$\eta = \frac{D\zeta \cdot V_{ad} \cdot I_{kd}}{P_{gelen}} \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilmektedir.

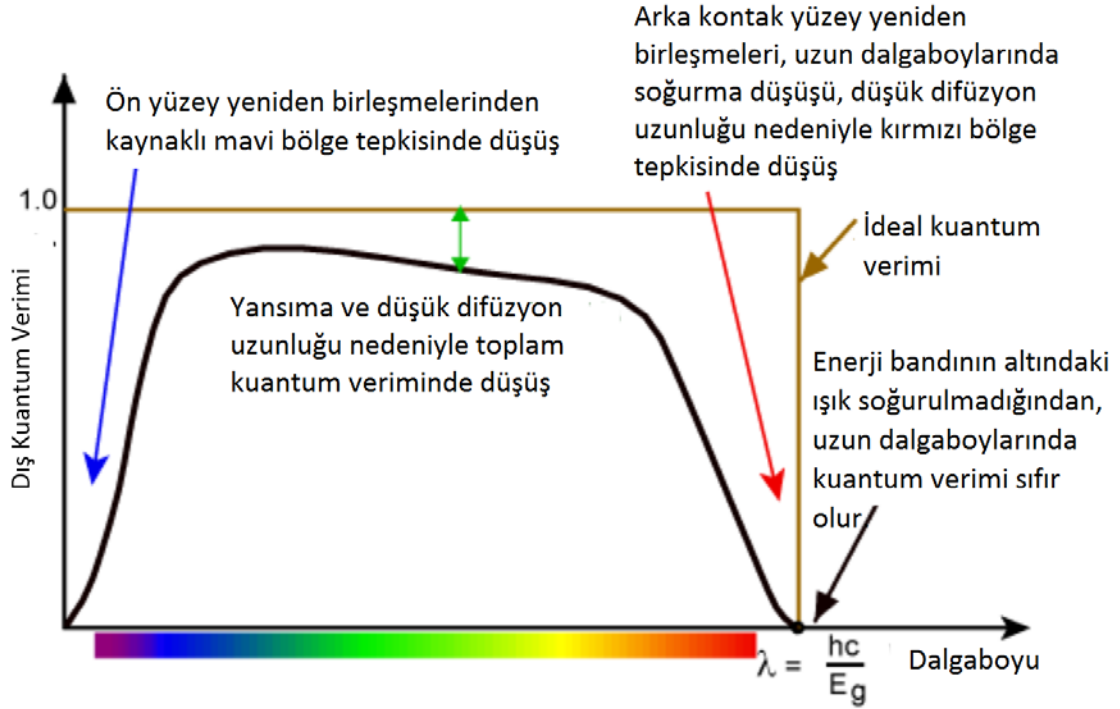
Güneş gözesinin yapısı ve gözeyi oluşturan malzemelerin özellikleri, verimi etkilemektedir. Verilen bir güneş spektrumu için göze verimi, aşağıda tanımlanan kayıp mekanizmalarına bağlı olarak düşmektedir [8][44];

1. **Soğrulma kayıpları:** Kullanılan yarıiletkenin bant aralığından daha düşük enerjili fotonlar soğrulamaz, verimin düşmesine neden olur. Gelen foton enerjisinin tabakanın bant aralığından büyük olması durumunda gözlenen termalizasyon nedeniyle, bu fazla enerji ısı olarak yayılıp gözenin sıcaklığını artmasına ve V_{ad} değerinin düşmesine, dolayısıyla verimin düşmesine neden olur. Çoklu eklem yapıları ile bu kayıplar azaltılmaktadır.
2. **Yansıma kayıpları:** Yansıtmasız kaplamaların (anti reflection coating) ve dokulandırılmış (texturized) yapıların kullanılmadığı Silisyum gözelerde, gelen fotonların önemli bir kesimi, üst yüzeyde yansır [12][45] %35 oranında kayıplara neden olan bu yansımalar, verimi düşürmektedir.
3. **İletim kayıpları:** yayıcı tabakanın kalınlığı ve soğurma katsayısına bağlı olarak, gelen ışığın bu tabakada soğrulması ve aktif soğurucu tabakaya iletilmemesi nedeniyle oluşan kayıptır.
4. **Toplama kayıpları:** yeniden birleşme (rekombinasyon) mekanizmaları nedeniyle serbest taşıyıcı yoğunluğunda gözlenen azalma nedeniyle ön/arka metal elektrotlarda toplanan taşıyıcıların yoğunluğunda da azalma olacak ve verim düşecektir.
5. **Direnç kayıpları:** Güneş gözelerinde ideal durumda $R_{seri}=0$, $R_{paralel}=\infty$ olmalıdır. Seri direncin büyümesi verimi azaltır.

Güneş gözelerinin kuantum verim eğrisi

Kuantum verimi, gözede toplanan toplam yük taşıyıcısının, gözeye gelen foton sayısına oranı ile tanımlanır. İdeal ve gerçek bir göze için kuantum verim eğrisi **Şekil 2.3**'te verilmiştir. İdeal durumda, bant aralığından büyük enerjiye sahip olan fotonlar için, sabit değerde kuantum verimi beklenmektedir. Gerçek durumda ise, ön yüzeyde gerçekleşen yeniden birleşmeler nedeniyle, mavi bölge tepkisinde düşüş

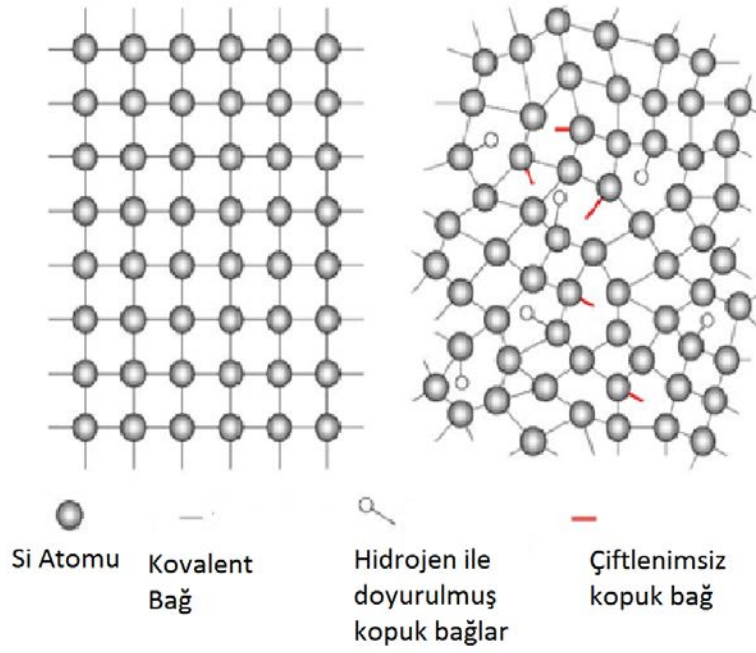
görülmektedir. Kırmızı bölgedeki düşüşün temel sebepleri ise arka yüzeyde oluşan yeniden birleşmeler, uzun dalga boylarında soğurma düşüşünün olması, difüzyon uzunluğunun kısa olmasıdır. Dolayısıyla, yansımaya ve düşük difüzyon uzunluğu nedeniyle toplam kuantum veriminde düşüş olmaktadır [43].



Şekil 2.3 İdeal ve Gerçek Bir Göze İçin Kuantum Verim Eğrisi

2.2. Pin Yapılı a-Si:H Güneş Gözeleri

Üç boyutta düzenli bir yapıya sahip olmayan amorf silikonda (**Şekil 2.4.**), en yakın dört komşusuyla kovalent bağ yapan kristal silikonda olduğu gibi uzun erimli bir düzen yoktur, kısa erimli düzen vardır. Bağ uzunlukları ve bağ açılarındaki değişimlerden kaynaklanan bant uzantı durumları (tail states) ve kopuk bağlar (dangling bonds), bant aralığı içinde yerleşmiş durumlar oluşmasına neden olmaktadır [5][46].



Şekil 2.4 Tek kristal silikon ve amorf silikonun atomik yapısı

Yapıya koyulan hidrojenle kopuk bağların doyurulmasıyla elde edilen hidrojenlendirilmiş amorf silisyum örneklerde, kopuk bağ yoğunluğu azalmakta ve a-Si:H' un elektriksel/optik özelliklerini etkilemektedir.

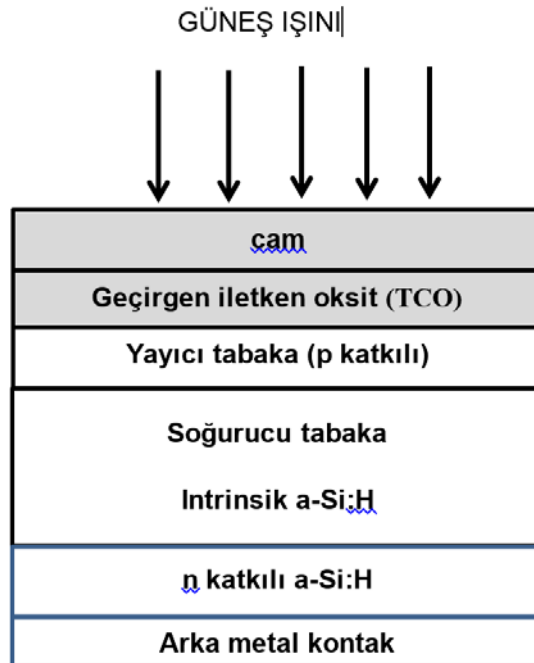
Yerleşmiş durumlar, Fermi düzeyini mıhladığından (pinned), Fermi düzeyinin katkılama kaynaklı bant merkezinden bant kenarlarına doğru yer değiştirmesinin önünde engeldirler. Fermi düzeyinin yerleşmiş bant durumlarına yakınlığı, yüksek katkı n tipi malzeme için 0,2 eV, yüksek katkı p tipi a-Si:H için 0,3 eV'dan fazla olamaz [12].

Amorf yapıda bağların hidrojenle doyurulması sonucu elde edilen hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) RF plazma reaktörünün içinde Silan gazının (SiH_4) ayrıştırılmasıyla elde edilir. İşlem sıcaklığı 200-250°C aralığındadır ve kristal silikon gözelerin hazırlanması sırasındaki sıcaklıklarla kıyaslandığında düşüktür. a-Si:H'un katkılandırma işlemi sırasında, p türü katkılama için B_2H_6 gazı, n türü katkılama için PB_3 kullanılmaktadır [17] [5] [46].

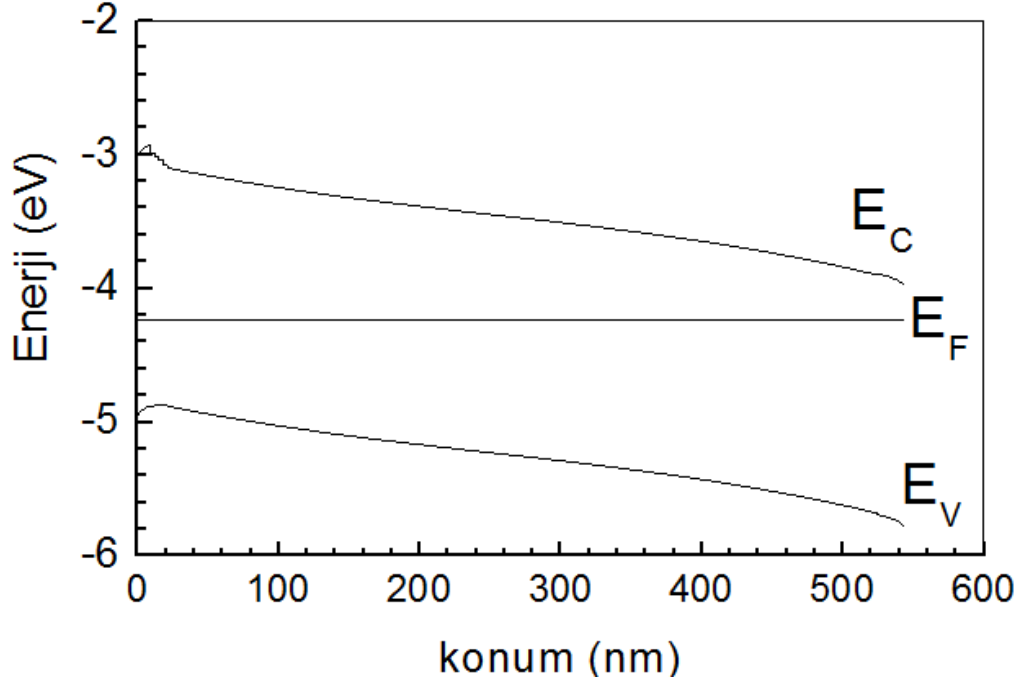
Pin yapıli ince film güneş gözelerinin yapısına ait bir kesit **Şekil 2.5**'te, pin yapıli güneş gözesinin bant yapısı ise **Şekil 2.6**'da verilmiştir.

Göze hazırlanırken ilk adım olarak cam üzerine, geçirgen iletken oksit (transparent conducting oxide-TCO) tabaka kaplanır. Yansıma etkilerini azaltmak ve daha fazla ışığın yapıya girmesini sağlamak için, bu tabaka üzerinde dokulandırma (texturized) işlemi yapılması gerekmektedir [45][12]. pin yapılı güneş gözesinde, alttaş olarak kullanılan cam tarafından giren ışık geçirgen iletken oksit tabakası boyunca p-tabakaya aktarılır [6]. p-tabakada soğurmanın olabildiğince az olması gerekir. Optik olarak inaktif olan ve yüksek iletkenliğe sahip p ve n katkılı tabakalar arasında bir potansiyel farkı ve dolayısıyla elektrik alan oluşur. Giren ışığın soğrulmasıyla oluşan yüklü taşıyıcılar, elektrik alanda birbirinden ayrılırlar. Malzeme içerisindeki kusurlardan kaynaklı yeniden birleşme gerçekleştiğinde, yüklü taşıyıcıların akıma bir katkısı olmaz.

p+/i arayüzünün göze içerisinde en baskın kısmı olması nedeniyle, p katkılı tabaka, güneş gözesi performansında en kritik tabaka olarak bilinmektedir. Soğurma kayıplarını en aza indirmek için p-katkılı tabaka içerisine karbon (C) ilave edilerek bant genişliğini arttırmak, a-Si:H güneş göze teknolojisindeki en önemli gelişme olmuştur [12]. a-SiC:H p-tabaka, açık devre geriliminin artmasına, yüksek geçirgenliği ile kısa dalga boylarında kuantum veriminin artmasına yol açmıştır [47].



Şekil 2.5 pin yapıda tek eklemlerli a-Si:H bir güneş gözesinin yapısı



Şekil 2.6 pin yapıda tek eklemli a-Si:H bir güneş gözesinin bant yapısı

İntrinsik tabaka, pin yapı içerisindeki en aktif tabakadır. Tipik bir intrinsik tabaka için kalınlık 300 nm ile 1,5 μm arasında değişmektedir. Işık eşikli bozulma nedeniyle, intrinsik tabaka kalınlığının seçimi önemli bir faktördür.

Temel olarak p ve n katkılı tabakalarda üretilen elektron ve deşik çiftlerinin akıma katkısının olmadığı bilinmesi nedeniyle, p ve n tabakalar 10-30 nm aralığında olacak şekilde ince seçilmektedir. p ve n katkılı tabakaların yüksek iletkenliğe sahip tabakalar olması, hem kendi aralarında ve hem de devrenin bütünü içerisinde düşük direnç sağlamaları, yüksek açık devre gerilimi sağlayacak oranda yeterli elektrik alanı sağlamaları gerekmektedir [3].

Literatürde pin yapıları tek eklemli a-Si:H gözeler üzerine yapılan çalışmalar ve sonuçları, izleyen kesimde özetlenmiştir;

- M.Kondo ve A.Matsuda'nın yaptığı çalışmada, foto taşıyıcıların yeniden birleşmelerinin güneş göze uygulamalarında kritik faktör olduğu ve yeniden birleşmelerin temelde, kopuk bağlardan kaynaklı yerel durumlardan ötürü meydana geldiği belirtilmiştir [48].
- B.Samanta ve arkadaşlarının 1996'da yaptığı çalışmada, tek eklemli ve çift eklemli gözelerde p+/i ara yüzüne tampon (buffer) tabaka eklenmesinin etkileri

araştırılmış, her iki yapı için de tampon tabakalı gözede ışığa maruz kaldığında ışık eşlikli bozulmanın, tampon tabaka içermeyen gözeye göre daha hızlı olduğu belirtilmiştir. Çift eklemli güneş gözesinde, tampon tabaka içermeyen, p⁺/i ara yüzünün ön tarafına ve p⁺/i ara yüzünün her iki tarafına (hem ön ve arka) tampon tabaka eklenmesi durumunda ışık eşlikli bozulma kinetiği incelenmiştir. Gözenin ışığa maruz bırakıldıktan sonra 100 saatin ardından kararlı hale geldiği ve en az bozulmanın ise tampon tabaka içermeyen gözede görüldüğü bildirilmiştir [49].

- S.Singh ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada, p-tabakanın yasak enerji aralığı ve kalınlığının a-Si:H pin yapılı güneş gözelerinde çok önemli oranda etkili olduğunu, aynı zamanda ise n-tabaka yasak enerji aralığının da anahtar rol oynadığını bulmuşlardır. AFORS-HET yazılımı ile yaptıkları simülasyonda, yasak enerji bantlarının, i-tabaka için 1,75 eV, n-tabaka için 1,95 eV, p-tabaka için ise 2,1 eV olması durumunda pin yapılı güneş gözesinde yüksek verimlilik sağladıklarını belirtmişlerdir [11].
- 2011 yılında J.Kim ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmada, p-tabakaya karbon (C) katkılanması yoluyla güneş gözesinin verimliliğini %25 oranında arttırdığını göstermişlerdir. a-Si:H tabanlı güneş gözelerinde, p-tabakasında hidrojenlenmiş amorf tabakaya karbon eklenmesi;
 - ✓ p-katkılı tabakanın bant aralığını yaklaşık 2 eV'a kadar çıkararak, gelen güneş ışınımının büyük bir kısmının içinden geçmesine ve intrinsik tabakada soğurulmasına neden olduğundan,
 - ✓ kısa devre akımı ve açık devre geriliminin artışına neden olan yapısal potansiyeli büyüttüğünden

tercih edilen bir durumdur. Bununla birlikte, karbon eklenmesi, p-tabaka ile geçirgen iletken oksit (TCO) arayüzeyinde Schottky engeli neden olmakta, bu da güneş gözesinin dolum faktörünü düşürmektedir. Jeehwan Kim ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, bu olumsuz etkiyi ortadan kaldıracak bir yöntem belirtmişlerdir. p-tabaka ile TCO arayüzeyine a-Ge:H ince bir tampon tabaka koyarak, dolum çarpanını düşürmeden eklenen karbon oranını arttırmışlardır. a-Ge:H'in varlığının Schottky engeli en aza indirdiği ya da yok ettiği gözlemlenmiştir. Bu yolla elde edilen güneş gözesinin verimliliğinin % 25 oranında arttırıldığı belirtilmiştir [50].

- p-katkılı a-Si:H tabakanın geliştirilmesi için pek çok çalışma yapılmış aşırı katkı geniş bant aralıklı a-SiC:H ve a-SiO:H alaşımları, mikrokristal Si filmler incelenmiştir [51] [47] [12].
- J.Park ve arkadaşları, 2013 yılında yaptıkları çalışmada, yayıcı tabaka olarak 10 nm kalınlığında bor katkılı amorf silikon oksit kullanılmış, flor katkılı kalay oksit (FTO) tabaka ile yayıcı tabaka arasına tampon tabaka ekleyerek göze parametrelerinin değişimini incelemişlerdir. Tampon tabaka olarak, hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) ve bor katkılı mikrokristalin silikon μ -Si:H(p) kullanmışlardır. Hem tampon tabakanın olmadığı durum, hem de hidrojenlenmiş amorf silisyumun kullanıldığı durumla kıyaslandığında, mikrokristal silikon tampon tabakanın kullanıldığı durumda en yüksek verimliliğe ulaştıklarını belirtmişlerdir. Bunun sebebi olarak, sadece düşük soğurmanın etkili olmadığını, aynı zamanda FTO ile yayıcı tabaka ara yüzündeki Schottky bariyerin düşük olmasını göstermişlerdir [15].
- Yayıcı tabaka olarak, dar bant aralığına sahip hidrojenlenmiş amorf silikonun yerini alan, geniş bant aralığına sahip hidrojenlenmiş amorf silikon karbon filmler, Hamakawa grubu tarafından geliştirilmiştir. Geniş bant aralığı hem kısa devre akımı hem de yüksek gerilime olanak sağlarken, yüksek geçirgenlik nedeniyle spektrumun mavi bölgesinde dış kuantum verimliliğini de geliştirici etki yapmaktadır [52]
- p⁺/i ve i/n arayüzeylerinin incelenmesi üzerine hem deneysel, hem de modelleme çalışmaları yapılmış olmasına karşın [2][5][53][39][54][55][56][45][57][58][34], arayüzeylerin etkisi tam olarak anlaşılammıştır. Bazı çalışmalarda tampon tabaka verimi artıracak olumlu etki yaparken bazı çalışmalarda ters bulgular elde edilmiştir.
- a-Si güneş gözelerinde meydana gelen ışık eşlikli bozulmalar ile ilgili literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Y.Hamakawa ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaların sonuçlarına göre, i-tabakanın kalınlığının artmasıyla birlikte, bozulmanın arttığı belirtilmiştir. Sebep olarak, i-tabakada en düşük elektrik alan değeri nedeniyle elektron deşik yeniden birleşmelerinin görece artması gösterilmiştir. İntrinsik tabakadaki elektrik alan dağılımı hesaplamalarında, i-tabakanın kalınlığının düşmesiyle birlikte en düşük elektrik alan değerinin

keskin bir biçimde arttığı görülmüştür [59][60][13]. Güneş gözelerinin ışık eşlikli bozulmanın hacimsel (bulk) etkisi olduğu, intrinsik tabakadaki kusur yoğunluğunun artması nedeniyle meydana geldiği genel yaklaşımlardan birisidir [55].

- D.Qingwen ve arkadaşlarının 2010 yılında yaptığı bir çalışmada, AMPS programı ile ara yüz yeniden birleşme hızı, p-tabaka kalınlığı, intrinsik tabaka, n-tabaka ve katkılama yoğunluğu gibi çeşitli parametrelerle, güç dönüşüm verimliliği araştırılmıştır. Bulunan sonuçlara göre, p-tabaka ve intrinsik tabaka kalınlıkları verimliliği etkileyen en önemli faktörlerdendir. Bant uzantılarının ve bant aralığı kusur durumlarının olduğu durumda, intrinsik tabaka için ideal kalınlık yaklaşık 400 nm'dir. p-tabakanın kalınlığının artırılması, verimliliği azaltıcı yönde etki ederken, öte yandan anot olarak üretiminin yapılabilmesi için de çok ince olmaması gerekir. Akseptör yoğunluğunun 10^{19} cm^{-3} 'den az olması durumunda verimlilik ciddi biçimde olumsuz etkilenmektedir. Deneysel olarak, bant uzantıları, ara bant durumları, katkılama yoğunluğu ve ara yüz yeniden birleşme hızlarını azaltmak, büyüme parametrelerinin kontrolü ile mümkündür. Bu büyütme parametrelerinin optimize edilmesiyle verimlilik artırılabilir [61].
- M.I.Kabir ve arkadaşlarının 2010 yılında yaptığı bir çalışmada, güneş gözesini oluşturan farklı tabakalara ait kalınlık, katkılama yoğunluğu, çalışma sıcaklığı gibi parametrelerin etkisi incelenmiş, 500 nm'lik intrinsik tabakalı tek eklemli amorf silisyum güneş gözesinde %19,62 verimliliğe ulaştıklarını belirtmişlerdir. Hazırlama sırasında farklı oranda metan ve silan gazlarının eklenmesi yöntemi ile hidrojenlenmiş amorf silikon karbon alaşımı ($a\text{-SiC}_x\text{H}_{1-x}$) filmler içerisindeki karbon oranının değiştirilerek, optik bant aralığı 1,8 eV ile 3 eV aralığına getirilebileceğini ifade etmişlerdir. Ancak karbon içeriğinin artmasıyla birlikte yapıda kusur yoğunluğunun da arttığını, fotoiletkenliğin düştüğünü vurgulamışlardır. Güneş gözesi pencere görevi göreceği için ideal p-tabakanın, yüksek mobilite ve düşük direnç sahip, aynı zamanda soğurucu tabakadan daha yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahip özelliklerde olması gerektiğini, aynı zamanda takip eden diğer tabakalara ışığın geçmesine izin verecek kadar ince olması gerektiğini belirtmişlerdir [62].
- M.I.Kabir ve arkadaşlarının 2012 yılında yaptığı bir çalışmada ise, tek ve çok eklemli (iki ve üç) amorf silikon ince film güneş gözelerinin performanslarını

AMPS 1D programını kullanarak araştırmışlardır. Soğurucu tabakanın yasak enerji bant aralığı, ışık şiddeti, çalışma sıcaklığı gibi parametreler değiştirilerek fotovoltaik özellikler gözlemlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre; tek eklemde yer alan ve bant aralığı 1,8-2,2 eV aralığında olan a-SiO:H soğurucu tabaka, daha iyi verim göstermiş, 10 güneş altında verimliliği %17,05 olmuştur. Çift eklemde yer alan ve bant aralığı 1,9 eV olan ikinci soğurucu tabaka a-SiC:H ile %19,04 verim, 1,8 eV bant aralıklı a-Si:H soğurucu tabaka ile üçlü eklemde %20,42 verimliliğe ulaşılmıştır. Tek eklemde 10 güneş altında %17,95 maksimum verimliliğe ulaşılırken, ikili eklemde 30 güneş altında %21,94'e, üçlü eklemde ise 100 güneş altında %25,58 verimliliğe erişilmiştir. Tek ve ikili eklemle karşılaştırıldığında, üçlü eklem en iyi performansı sergilemiştir [51].

- L.Raniero ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, n-tabaka kalınlığının optimize edilmesiyle, açık devre gerilimi, kısa devre akımı, verim, seri direnç vb. göze çıktı parametrelerinin iyileştirilebileceğini ancak p-tabaka kalınlığının pin yapı içerisinde en önemli parametre olduğunu belirtmişlerdir [63].
- Tampon tabaka eklenmesinin güneş gözesi üzerindeki etkisi ile ilgili literatürde çeşitli gruplar tarafından çalışmalar yer almaktadır. Tampon tabaka eklenmesinin gözenin başlangıç verimini arttırdığı, ancak ışığa maruz kaldığında hızla ışık eşlikli bozulmalar olduğu belirtilmiştir [54]. S.Honda ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, p⁺/i arayüzüne eklenen tampon tabaka ile güneş gözesi akım, gerilim, verim ve dolum çarpanında artış gözlemlendiği belirtilmiştir. Tampon tabaka eklenmiş ve tampon tabakasız iki güneş gözesinin kuantum verimi karşılaştırıldığında, 20 nm kalınlığına sahip geniş bant aralıklı tampon tabaka eklenmiş gözede daha yüksek değerlere ulaşıldığı rapor edilmiştir. Mavi bölgedeki güçlü soğrulma, mavi ışığın p⁺/i arayüzeyinde elektron-deşik çifti oluşturması ve bu arayüzde taşıyıcı birleşmesi nedeniyle oluşan düşüşle açıklamışlardır [60].
- G.Munyeme ve arkadaşlarının 2004 yılında yaptıkları bir çalışmada, p⁺/i arayüzüne dereceli silikon carbide tampon tabaka eklenerek (2-15 nm aralığında) ışık eşlikli bozulma kinetiği araştırılmıştır. Tampon tabakalı güneş gözesi başlangıç performansının yüksek olduğu, ancak ışığa maruz bırakıldıktan sonra tampon tabakasız güneş gözesiyle aynı performansa geldiği görülmüştür. Simülasyon sonuçlarına göre, 500 nm kalınlığındaki, az oranda katkılanmış 2

nm kalınlığında kusurlu kısmı yer alan 5nm'lik tampon tabakaya sahip güneş gözesinin, aynı kalınlıktaki tampon tabakasız güneş gözesinden daha iyi performansa sahip olduğu belirtilmiştir. Güneş gözesi üzerindeki etkisinin olumlu yönde olabilmesi için eklenen tampon tabakanın konfigürasyonun ve kompozisyonunun kritik olduğunu belirtmişlerdir [64].

- W.F.Mohamad ve arkadaşları 2003 yılında yaptıkları bir çalışmada, intrinsik tabaka kalınlığı ve kusur yoğunluğunun güneş gözesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hidrojenlenmiş amorf silisyum plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle üretilmesi nedeniyle, amorf silisyum içerisindeki kopuk bağların 10^{16} cm^{-3} ve daha altında değerlere düştüğünü ifade etmişlerdir. Taşıyıcı konsantrasyonunun katkılama yoğunluğundan etkilenmediğini, i-tabakadaki tuzaklama sürelerinin elektron ve deşikler için eşit olduğunu öne süren Stulik ve Singh'in teorisiyle örtüştüğünü belirtmişlerdir [65].

3. AMPS-1D YAZILIMI

Yarıiletken malzeme ve aygıtların karakterizasyonu için kullanılan modelleme yazılımları, malzeme özellikleri ve çalışma koşullarını tanımlayan modellerden oluşan bir dizi eşitliğin nümerik çözümünü kapsamaktadır [37][42][30].

Bu tez çalışmasında kullanılan AMPS-1D programı, Sonlu elemanlar, Newton Raphson Tekniği ve Poisson eşitliklerini kullanarak metaller, iletkenler ve yarı iletkenlerin optik ve elektriksel özelliklerinin analizini yapan, Pennsylvania State Üniversitesi'nde S.Fonash ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş tek boyutlu, ücretsiz bir simülasyon programıdır [66][37].

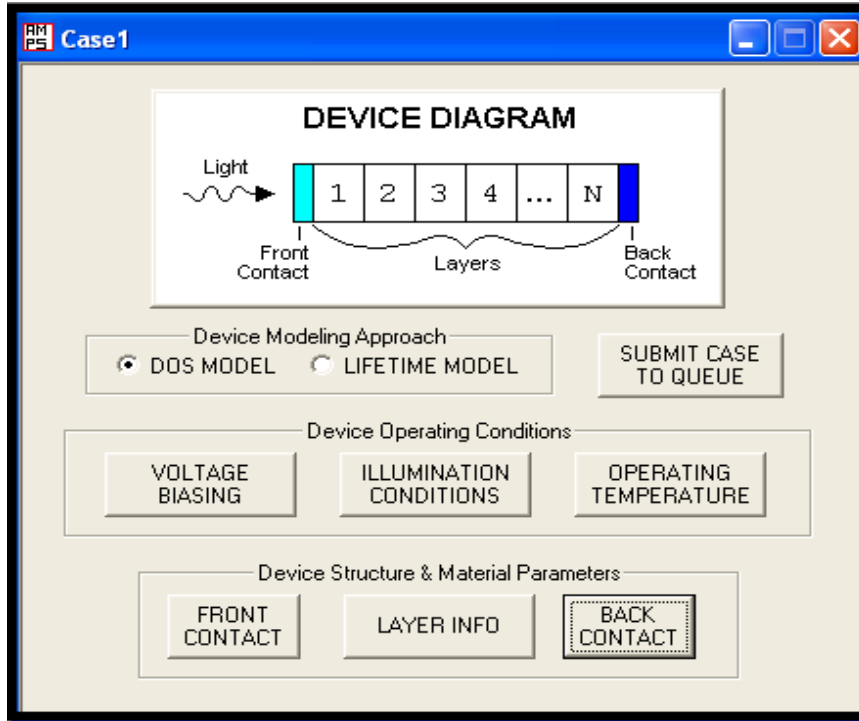
AMPS-1D, her durum için üç sınır koşulunda üç çift diferansiyel eşitlik çözerek hesaplama yapar, malzemenin her noktasında elektron ve deşikler için elektriksel potansiyel ve yarı Fermi seviyesini hesaplamaktadır. Bu değişkenler derinliğin fonksiyonu olduğu için, doğrudan taşıyıcı konsantrasyonu, elektrik alan, akım ve gerilimi hesaplamak, dolayısıyla açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve dolum faktörü ve verim gibi göze performansını belirleyen parametrelere ulaşmak için kolay bir yöntemdir.

Elektron ve deşiklerin birleşmesinde iki temel mekanizma olasıdır. İlki, iletim bandındaki elektronlar, değerlik bandındaki deşikler arasında gerçekleşen banttan banda birleşme ya da direkt birleşme olarak adlandırılır, ayrıca intrinsik birleşme de denir. Shockley, Read and Hall birleşimi olarak anılan ikinci mekanizma ise, elektron ve deşiklerin, birleşme merkezi (recombination center) denilen tuzak/kusur durumları üzerinden yeniden birleştiği, dolaylı yeniden birleşme ya da ekstrinik yeniden birleşme olarak bilinir. AMPS-1D'de kullanılan modelde, $R(x)$ olarak tanımlanan net yeniden birleşme, her iki durumu da göze alarak hesaplanmaktadır [37].

AMPS-1D yazılımında modellenen malzemelerin kararlı durumda olduğu, yani zamana bağlı olmadığı varsayılmaktadır [37]. AMPS-1D'de akım-gerilim (I-V) karakterizasyonu için, her gerilim değerine karşılık bir akım değeri hesaplanarak I-V eğrisi aydınlık ya da karanlık koşulları altında çizilmektedir.

AMPS-1D'de yer alan menülere ait ekran görüntüleri aşağıda verilmiş ve parametrelerin nasıl tanımlanacağı açıklanmıştır:

AMPS-1D programı açıldığında karşılaşılan ana veri giriş ekran arayüzü **Şekil 3.1**'de verilmiştir. Ana ekranda ilk olarak, modelin hangi yaklaşımla çalıştırılacağı **model yaklaşımı** seçilmektedir. Ardından aydınlatma, uygulanan gerilim ve sıcaklık değerlerinin belirlendiği **çalışma koşulları** ve **aygıt yapısı-malzeme parametreleri** sisteme tanımlanmaktadır. Bütün tabakalar ve parametreler sisteme girildikten sonra, "**Submit case to queue**" sekmesine basılarak modelleme başlatılır.



Şekil 3.1 Ana veri giriş ekranı ekran görüntüsü

Aygıt Model Yaklaşımı (Device Modelling Approach): AMPS-1D yazılımında, modellemede;

- yeniden birleşme trafiği, tuzaklama ve kusurların yük durumları ve elektrik alan üzerindeki etkilerinin göz önünde bulundurulduğu, yakalama ve salım için Shockly-Read-Hall (S-R-H) modelinin kullanıldığı, kullanıcı tarafından bant durumlarına ait parametrelerin (durum yoğunlukları, durumların uzaysal

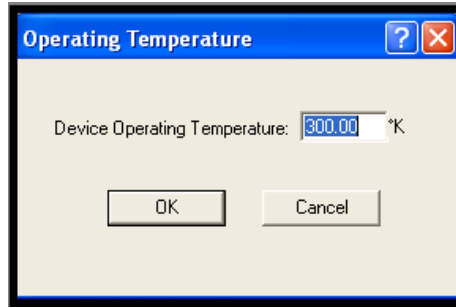
dağılımı ve yakalama etkin kesitlerinin) verildiği **Durum Yoğunluğu-(density of state-DOS)** yaklaşımı,

- yeniden birleşme trafiğinin ayrıntısı ile ilgilenilmeyen **Taşıyıcı Yaşam Süresi- (lifetime)** yaklaşımı

olmak üzere iki yaklaşım kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Durum yoğunluğu yaklaşımı kullanılmıştır.

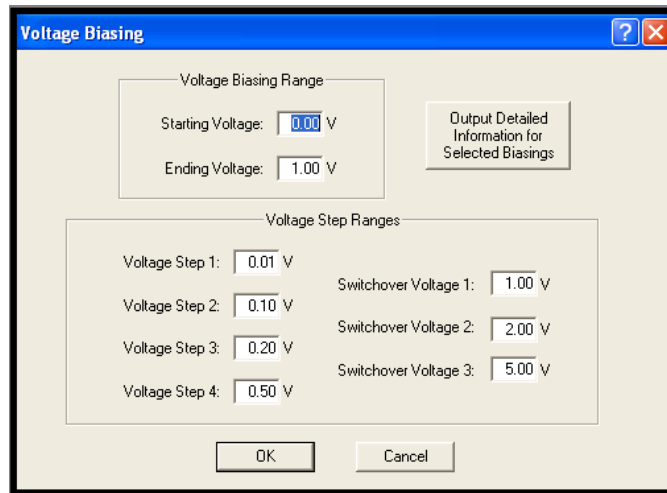
Aygıt Çalışma Koşulları (Device Operating Condition):

- Sıcaklık, **Şekil 3.2** 'de görüldüğü gibi, "Operation Temperature" sekmesi ile Kelvin cinsinden tanımlanır. Bu çalışmada sıcaklık 300K olarak alınmıştır.



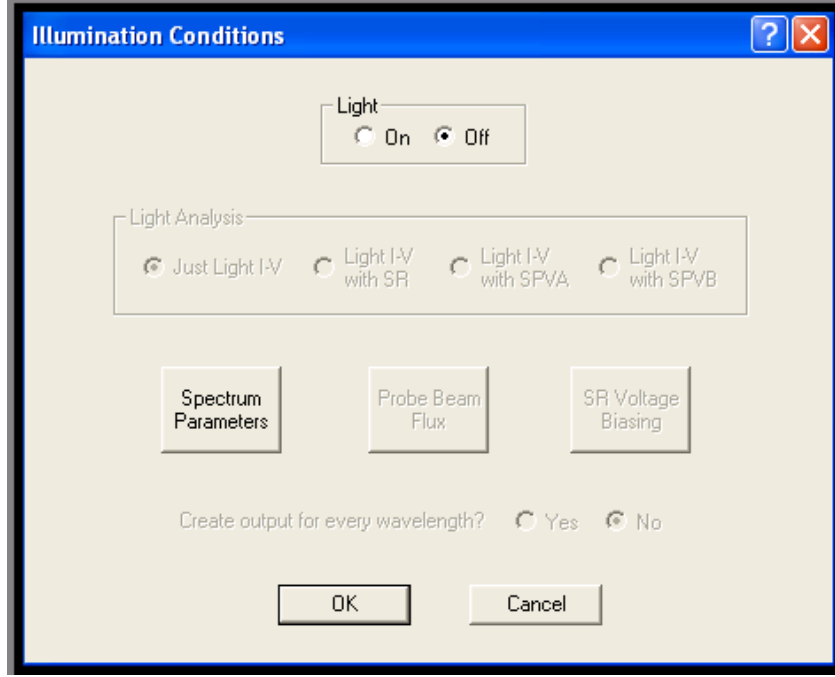
Şekil 3.2 Sıcaklık giriş ekranı ekran görüntüsü

- Uygulanan gerilim ve gerilim artım değerleri, "Voltage Biasing" sekmesi ile tanımlanır, **Şekil 3.3**.



Şekil 3.3 Gerilim değerleri giriş ekranı ekran görüntüsü

- Aydınlatma koşulları veri giriş ekranı **Şekil 3.4** ve **Şekil 3.5**'te verilmiştir. Eğer model ışık altında çalışacaksa “LIGHT” sekmesi seçilir ve ardından spektrum tanımlanır. “LIGHT = NO” sekmesi seçilirse, ışık spektrumu tanımlamaya gerek kalmaz, model ön gerilim altında, karanlıkta çalıştırılır.

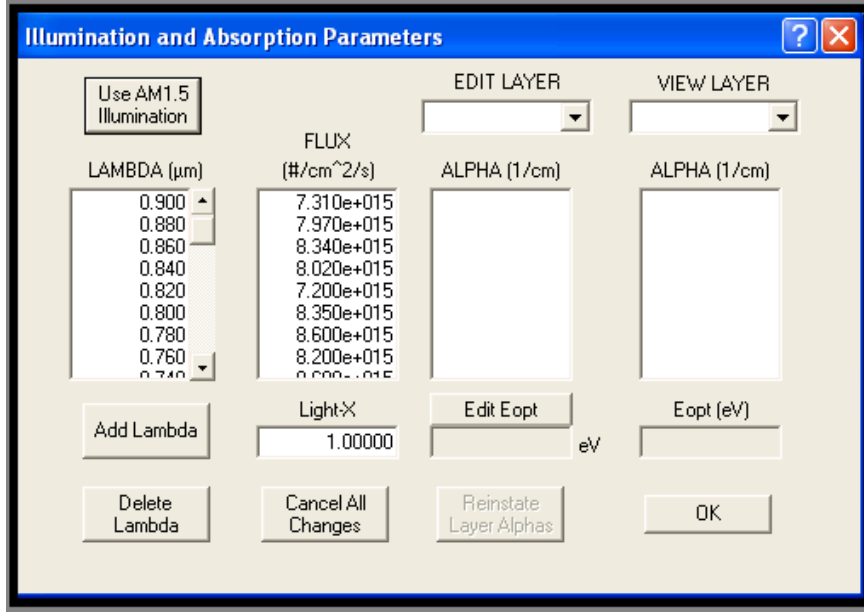


Şekil 3.4 Spektrum giriş ekranı ekran görüntüsü

Işık altında çalışılacak durum için, **Şekil 3.5**'te görüldüğü gibi, spektrumun her dalga boyuna karşılık, kullanıcı tarafından,

1. Her dalga boyuna karşılık gelen akı değeri "FLUX" ($1/\text{cm}^2/\text{sec}$)
2. Soğurma katsayısı "ALPHA" ($1/\text{cm}$),

ayrı tanımlanmalıdır. Seçilen yapıda her bir katmanı oluşturan malzemede dalga boylarına göre soğurma ve yansıtma katsayılarının değerleri için yazılımın içerisindeki kütüphanede yer alan değerler kullanılabilir gibi, kullanıcı tarafından da ayrıca yüklenebilmektedir.



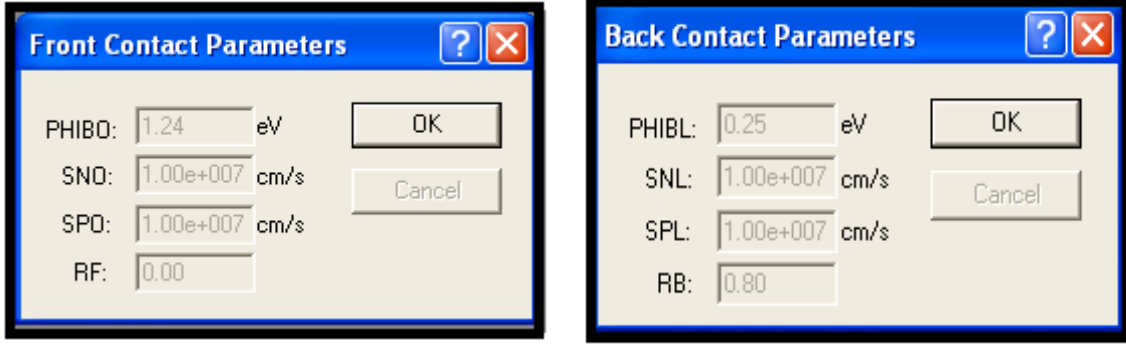
Şekil 3.5 Soğurma katsayıları giriş ekranı ekran görüntüsü

Amorf malzemeler modellenirken, mobilite bant aralığı (E_{Gu}) ve optik bant aralığının (E_{Gop}) farkının gözetilmesi gerekebilir. Tek kristal silikon malzemede bant aralığı ve optik bant aralığı aynı değerler olmasına karşın ($E_{Gu}=E_{Gop}=E_G$), amorf malzemede, yerelleşmiş durumlar nedeniyle, yerelleşmiş olmayan yaygın bant geçişini destekleyen durumlar, banttan banda optik geçişi destekleyen durumlardan farklı bir eşikte yer alabileceğinden. mobilite bant aralığı ve optik bant aralığının ayrı ayrı tanımlanmaktadır [5]. Bu nedenle AMPS-1D yazılımında, $E_{Gu}=E_c-E_v$ ve E_{Gop} değerlerinin kullanıcı tarafından ayrıca girilebilmesine olanak verilmiştir.

Aygıt Yapısı-Malzeme Parametreleri (Device Structure&Material Properties):

Şekil 3.1'de ana ekranda görülen, yapıyı oluşturan her bir tabaka, ön ve arka kontak tanımlanmaktadır.

- **Ön Kontak ve Arka Kontak Parametrelerinin Tanımlanması:** **Şekil 3.6**'da görüldüğü gibi, ön kontak ve arka kontak sekmeleri kullanılarak bu kontaklar için elektron ve deşik yüzey birleşme hızları (SN, SP), engel yükseklikleri (PHIBL, PHIB0) ve yansıma katsayıları (RB, RF) tanımlanabilmektedir. Engel yükseklikleri ve yüzey yeniden birleşme hızları ile yarı iletken kontakın kalitesi artırılıp azaltılabilmekte, kontak ideal ohmik, non-ideal ohmik ya da doğrultucu kontak olarak modellenebilmektedir.



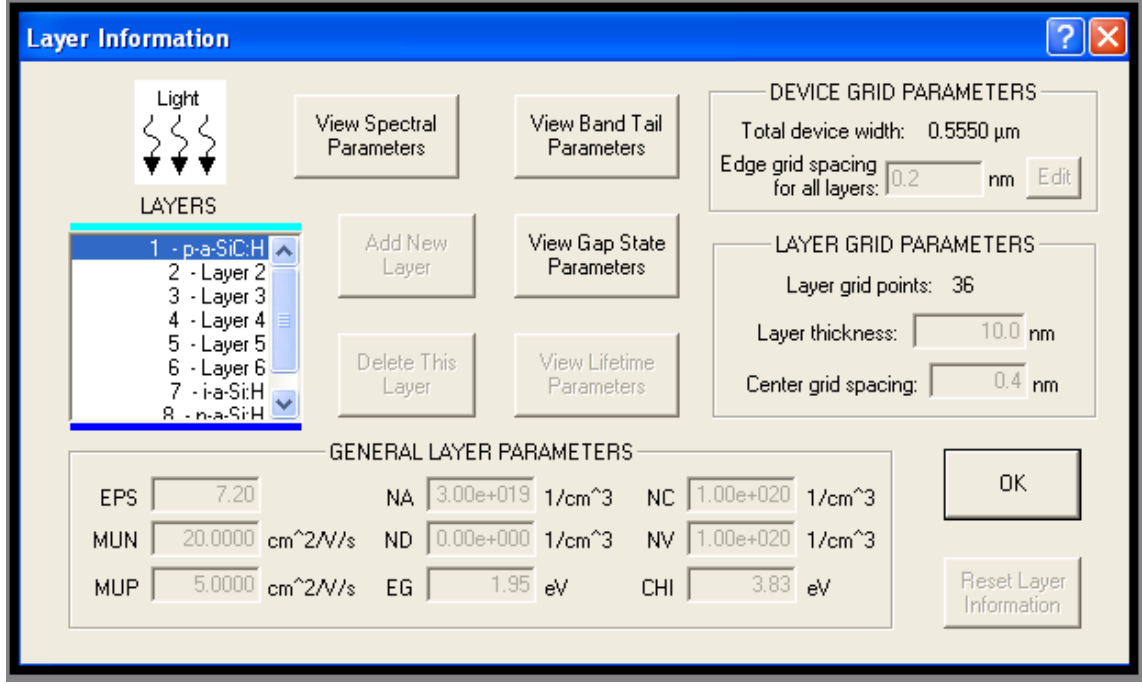
Şekil 3.6 Ön ve arka kontak parametre giriş ekranı ekran görüntüsü

AMPS1-D'de metal kontaklar, $x=0$ and $x=L$ 'de yer almakta ve kullanılan genel sınır koşulları, geniş spektrumda metal kontak modellenmesine olanak sağlamaktadır. AMPS1-D'de ön ($x=0$) ve arka ($x=L$) kontaklar için metalin iş fonksiyonu;

$$\begin{aligned}\Phi_{w,ön} &= \Phi_{b0} + \chi (x = 0) \\ \Phi_{w,arka} &= \Phi_{bL} + \chi (x = L)\end{aligned}\quad [3.1]$$

eşitlikleri ile verilmektedir. Burada Φ_b engel yüksekliği ve χ , elektron duygunluğudur.

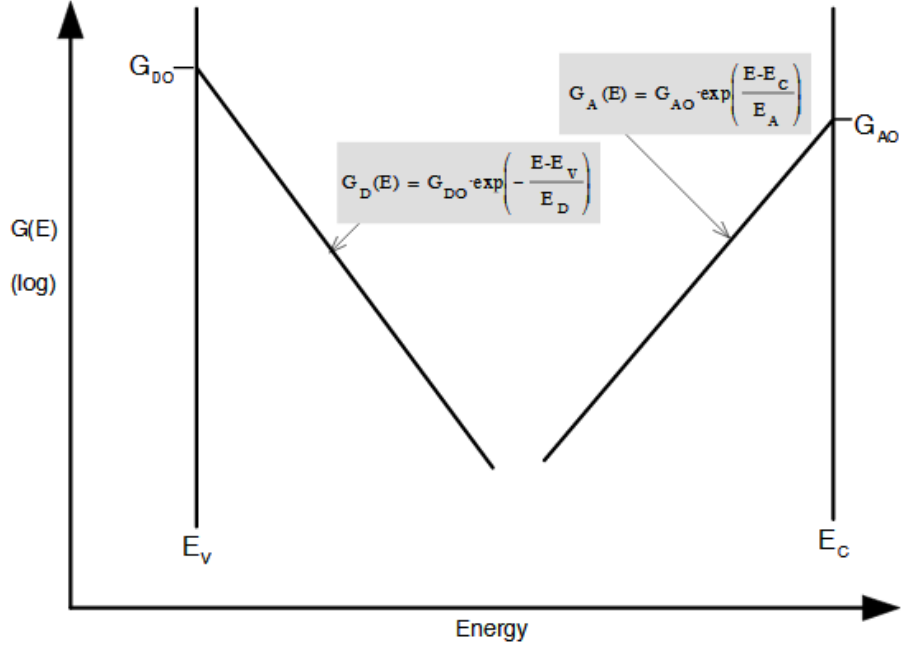
- **Yeni Tabaka Tanımlama:** “LAYER INFO” sekmesine basıldıktan sonra çıkan ekranda, “**Add new layer**” sekmesi ile yeni tabaka tanımlanır, **Şekil 3.7**. Tabakaya ait kalınlık, katkılama, mobilite, elektron duygunluğu, kusur yoğunluğu gibi özelliklerin tamamı bu ekrandan girilir. Tabakalar girilen değerleriyle birlikte kopyalanarak çoğaltılabilir, yapı içerisindeki tabaka ismi üzerinde çift tıklanılarak sıralamaları değiştirilebilir.



Şekil 3.7 Malzemede kullanılan tabaka parametrelerinin giriş ekran görüntüsü

AMPS1-D'de geçerli sonuç alabilmek için ızgaraların (grid) iyi tanımlanması gerekir, AMPS-1D hem eşit ızgara tanımlama hem de değişken ızgara tanımlamaya olanak verir, programın bütün versiyonları eşit ızgara tanımlanmasına olanak verirken, sadece bazıları değişken ızgara tanımlanmasına imkan tanır. Eğer eşit ızgara kullanılacaksa, AMPS1-D her zaman 400 eşit nokta kullanır. 400 sayısı rastgele seçilmiş bir üst sınır olup, çoğu durumda AMPS-1D'nin sonuca kolaylıkla ulaşması için yeterlidir, ancak modelleme yapısı kompleks ise ve daha iyi performans isteniyorsa değişken ızgara kullanılabilir [37].

- 1. Bant Uzantı Durumlarını Tanımlama:** Amorf malzemelerde bant uzantı durumları, **Şekil 3.8**'den görüleceği gibi üstel (ekponansiyel) dağılıma sahiptir.



Şekil 3.8 AMPS-1D'de göz önüne alınan bant uzantı durumları

Bant uzantısı durumları **Şekil 3.9**'da verilen ekrandan girilir, alıcı tip için "Acceptor-Like" ve verici tip için "Donor-Like" kısımlarından ayrı ayrı tanımlanır. Bant uzantıları için eşitlik,

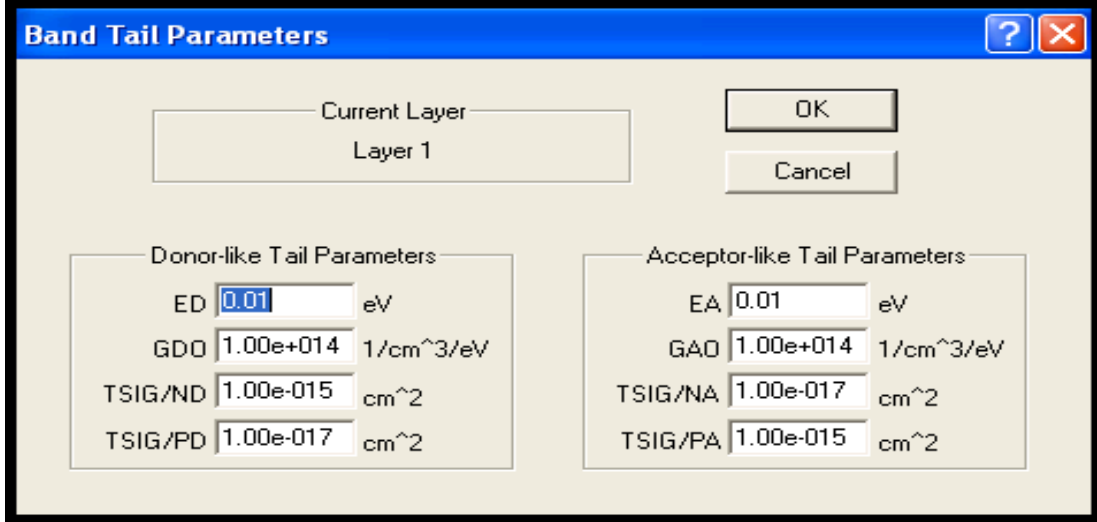
$$[N(E)]_{vt} = N(E_v) \cdot \exp\left[\frac{E_v - E}{E_D}\right], \quad [N(E)]_{ct} = N(E_c) \cdot \exp\left[\frac{E - E_c}{E_A}\right] \quad [3.2]$$

olarak verilmiştir. Burada;

$N(E_v)$, $N(E_c)$: Değerlik ve iletkenlik bant durum yoğunluğu

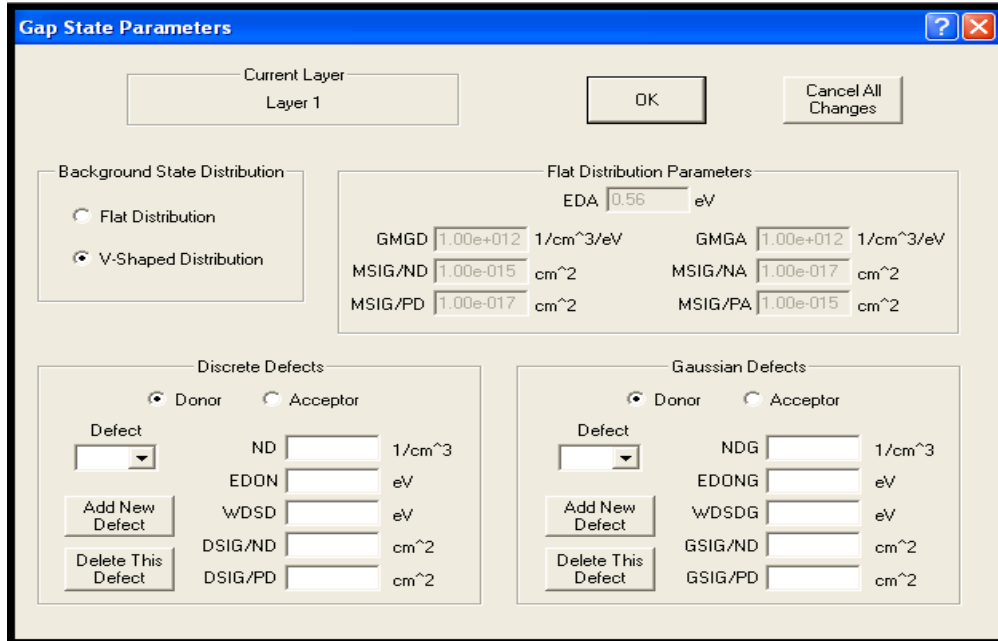
E_D : Değerlik bant uzantıları için karakteristik eğim

E_A : İletkenlik bant uzantıları için karakteristik eğimdir.



Şekil 3.9 Bant uzantı parametre ekranı

2. **Bant Ara Kusurları Tanımlama:** Kopuk bağ durumları ile ilgili değerler, Şekil 3.7’de verilen ekrandaki *“Edit Gap State Parameter”* sekmesi ile girilir, alıcı tip için “Acceptor” ve verici tip için “Donor” kısımlarından ayrı ayrı tanımlanır, Şekil 3.10.

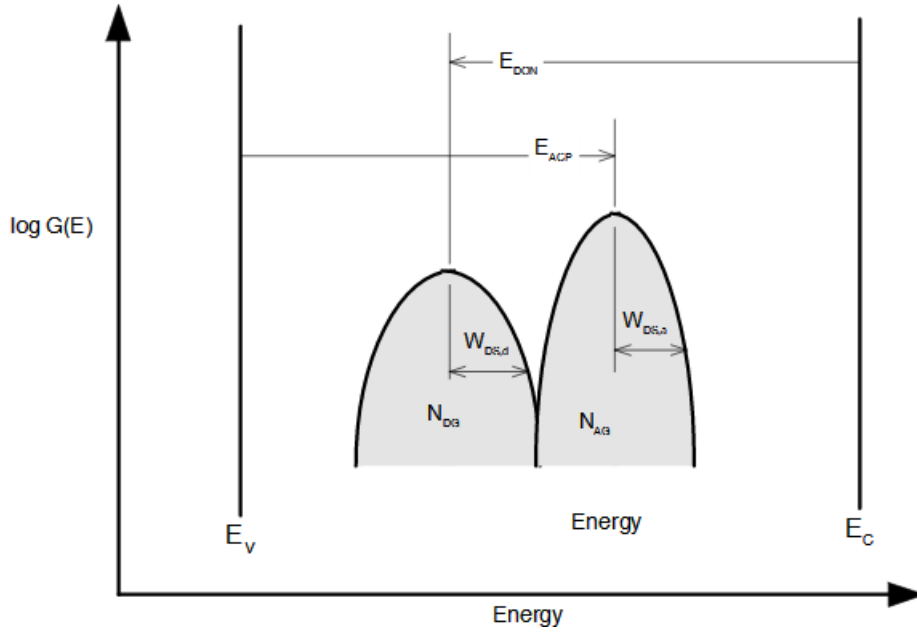


Şekil 3.10 Kusur yoğunluğu tanımlama ekranı

Şekil 3.11'de verildiği gibi, bant aralığındaki kusur durumları, diğer bir deyişle kopuk bağ durumları Gaussiyen dağılıma sahiptir ve E_{db} , pik konumu, N_{db} , kopuk bağ yoğunluğu, σ_{db} , kopuk bağların varyansını göstermek üzere,

$$[N(E)]_{db} = \frac{N_{db}}{\sigma_{db} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(E-E_{db})^2}{2\sigma_{db}^2}\right] \quad [3.3]$$

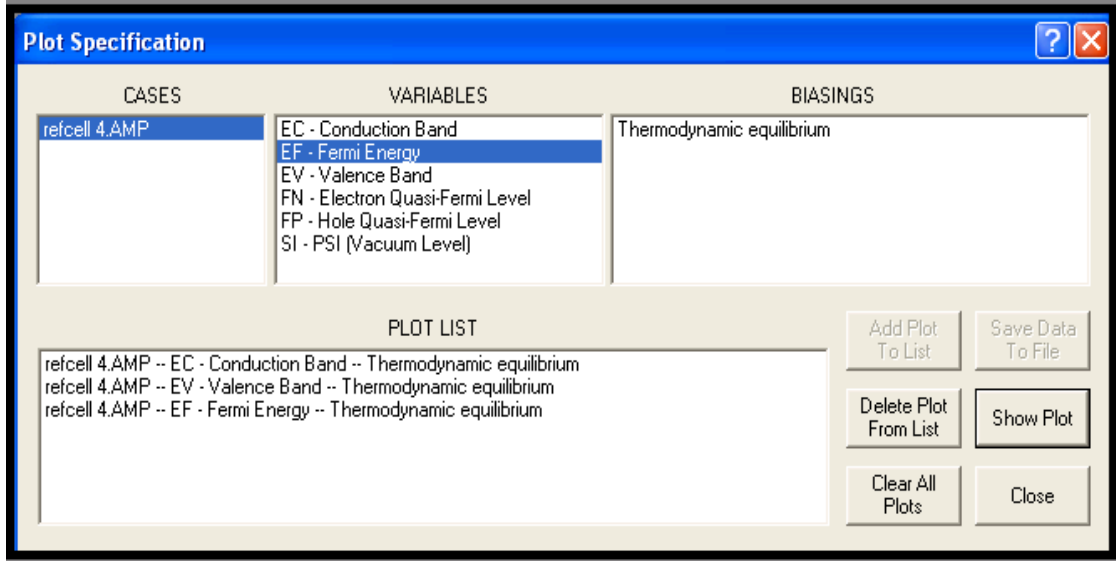
eşitliği ile tanımlanır.



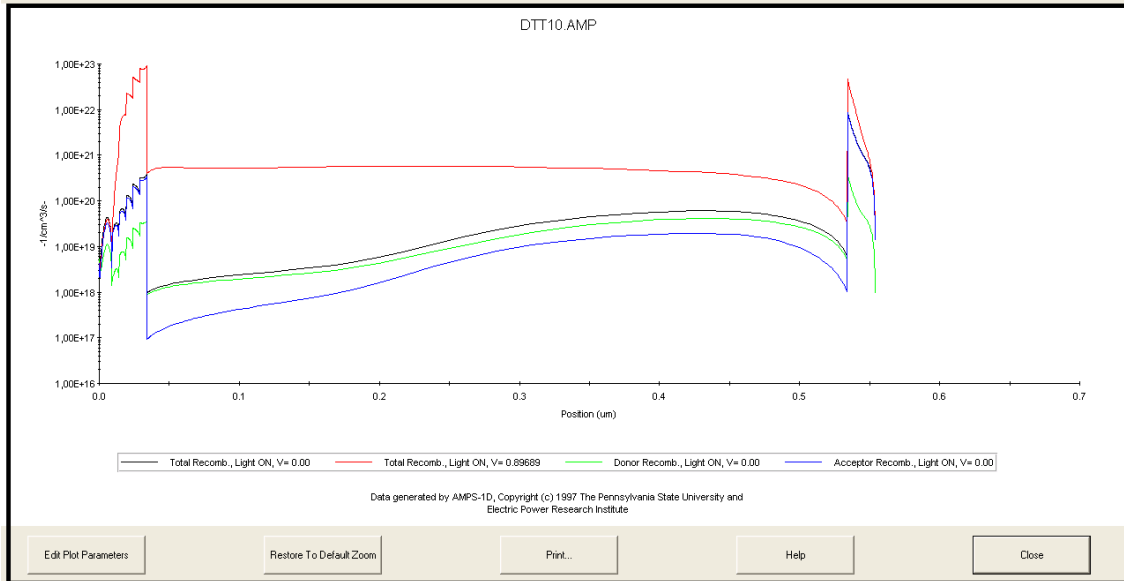
Şekil 3.11 AMPS-1D'deki bant aralığındaki kusur durumları

Modellemeyi Başlatma: Bütün tabakalar ve parametreler sisteme girildikten sonra, **Şekil 3.1**'de görülen "Submit case to queue" butonuna basılarak modelleme başlatılır. Kullanıcı arayüzü, sonuçların grafikler ile detaylı bir biçimde gösterilmesine olanak sağlar. Modelleme tamamlandıktan sonra, **Şekil 3.12**'de görüldüğü gibi; "cases" kısmından grafiği çizilmek istenen model, "variables" kısmından değişkenler seçilerek grafikler çizilebilir, "Save data to file" butonuyla istenen grafik verisi dış ortama aktarılarak grafik çizdirilebilir. AMPS-1D, yeniden birleşme, üretim, serbest ve tuzaklanmış taşıyıcı konsantrasyonu, karanlık ve aydınlık altında akım-gerilim eğrileri, elektron-deşik yaşam süresi, spektral tepki gibi

birçok grafiğin elde edilmesine olanak verir. Bu grafikler, **Şekil 3.13**'te görülen grafik izleme ekranından istenilen yerde kullanılmak üzere kopyalanabilir.



Şekil 3.12 Grafik ekranı ekran görüntüsü



Şekil 3.13 Grafik izleme ekranı ekran görüntüsü

4. MODELLEME ÇALIŞMALARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Pin yapıdaki tek eklemli hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) güneş gözeleri için yapılan modelleme çalışmaları iki aşamada yapılmıştır. İlk adımda, göze verimliliğini etkileyen parametrelere ait en iyi değerler bulunarak fiziksel yorumları yapılmıştır. İkinci adımda ise, ENEA-İtalya Araştırma Merkezi'nin deneysel verileri kullanılarak ışık eşikli bozulma kinetiği incelenmiştir.

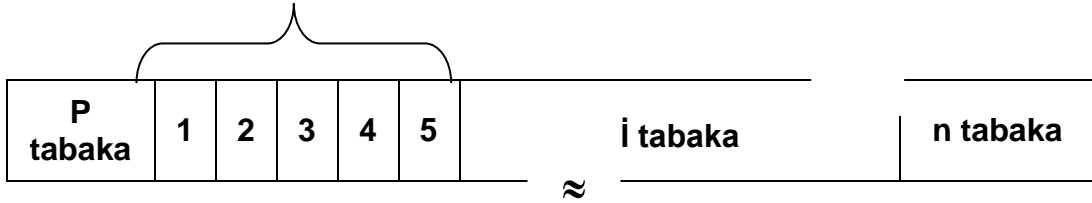
Giriş kesiminde açıklandığı gibi, modellemede kullanılan örnek yapısı seçilirken, ENEA araştırma merkezinde deneysel olarak hazırlanmış ve karakterizasyonu yapılmış örnekler göz önüne alınmıştır [67].

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi modellenen yapı;

- p-katkılı a-SiC:H tabaka
- katkısız a-SiC:H dereceli tampon tabaka
- saf intrinsik a-Si:H tabaka
- n-katkılı a-Si:H tabakadan meydana gelmektedir.

Modellemeler boyunca kullanılan parametreler ve değerleri **Çizelge 4.1** ve **Çizelge 4.2**' de verilmiştir.

Derecelendirilmiş Tampon Tabaka



Şekil 4.1 Güneş gözesi katman yapısı

Dereceli tampon tabaka; **Çizelge 4.2**'de verilen parametrelerle, katkısız, farklı değerlerde ancak eşit kalınlıkta beş adet a-SiC:H tabaka olarak modellenmiştir.

Işık eşikli bozulma kinetiğini incelemeyen önce, modellemede kullanılan göze yapısındaki her bir katman ayrı ayrı incelenmiştir. Deneysel olarak hazırlanmış ENEA örneklerinde, n-tabakanın aktivasyon enerjisinin 0,25 eV olduğu bilindiği için [67], bu tabakanın katkı yoğunluğu aynı aktivasyon enerjisini verecek şekilde dikkatlice ayarlanmıştır. N-katkılı tabakanın özellikleri çok kritik olarak düşünülmediğinden, modelleme çalışmalarında n-katkılı tabakaya ait parametreler

sabit olarak alınmış ve p-tabaka, tampon tabaka ve intrinsik tabaka üzerinde denemeler yapılmıştır.

Modellenen yapı çok fazla parametre içerdiğinden, çalışmalar sırasında birçok parametre literatürde verilen ve bilinen değerlere sabitlenmiş, serbest parametre sayısı olabildiğince en aza indirilmiştir.

AMPS-1D yazılımında dokulandırılmış (texturized) yüzeyi modelleyecek parametre bulunmadığından, deneysel çalışmada kullanılan;

Cam/Ag/ SnO₂/(p) a-Si:H / (tampon) a-SiC:H /(i) a-Si:H / (n) a-Si:H/ ZnO/Ag

yapıda, n-tabaka ve metal arka kontak arasındaki deneysel ZnO tabakasını modellemek için, arka yüzey yansımaları %85 olarak alınmıştır.

AMPS-1D yazılımında, termodinamik dengede elektronlar için engel yükseklikleri ön kontakta ($x=0$) ve arka kontakta ($x=L$), E_c , iletim bandı kenarı, E_f , Fermi Enerji Düzeyi olmak üzere;

$$\phi_{b0} = [E_c - E_f]_{x=0} \quad \phi_{bL} = [E_c - E_f]_{x=L} \quad (4.1)$$

eşitlikleri ile tanımlanmaktadır. Bu tanımlara göre, ön kontak engel yüksekliği 1,24 eV, arka kontak engel yüksekliği ise ENEA deneysel sonuçları ile uyumlu olarak 0,25 eV alınmıştır. Sıcaklık 300K olarak sabit tutulmuş ve gelen güneş ışınımı AM 1.5G spektrumu olarak alınmıştır.

pin yapıdaki amorf silikon güneş gözesinin her bir tabakası farklı bant aralığına ve elektron uygunluğuna sahip olduğundan, bu tabakalardan oluşturulan eklemlerde, değerlik bantları arasında ve/veya iletkenlik bantları arasında bant ofset olarak adlandırılan uyumsuzluklarla karşılaşılır. Bu nedenle bant ofsetler, güneş gözesinin elektron taşınımı üzerinde etkisi olan potansiyel engeller olarak görülürler.

Çizelge 4.1 Pin yapılı gözelerde kullanılan parametre seti

Parametre		(p) a-SiC:H	(i) a-Si:H	(n) a-Si:H	
Tabaka Kalınlığı (nm)		5-50	500	20	
Mobilite Aralığı (eV)		1,85-1,95	1,78	1,80	
Elektron Duygunluğu (eV)		3,83	4	3,98	
Etkin Durum Yoğunluğu, N_c , N_v (cm^{-3})		1.10^{20}	1.10^{20}	1.10^{20}	
Katkılama Yoğunluğu, N_A , N_D (cm^{-3})		2.10^{17} - 3.10^{19}	-	1.10^{19}	
Elektron Mobilitesi (cm^2/V^s)		20	20	20	
Deşik Mobilitesi (cm^2/V^s)		5	5	5	
Bant uzantı eğimi	Verici tipi (eV)	90	50	160	
	Alicı tipi (eV)	180	30	70	
Gaussien Kopuk Bağlar	Verici Tipi	Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	3.10^{17} - 3.10^{19}	5.10^{15} - 5.10^{17}	$9,5.10^{18}$
		Standart sapma (eV)	0,14	0,15	0,15
		Konumu (E_c 'den) (eV)	0,7	0,89	1,4
	Alicı Tipi	Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	3.10^{17} - 3.10^{19}	5.10^{15} - 5.10^{17}	$9,5.10^{18}$
		Standart sapma	0,14	0,15	0,15
		Konumu (E_v 'den) (eV)	1,44	1,09	0,6
Yakalama Etkin Kesitleri	Kopuk Bağ - Nötr (cm^2)		1.10^{-16}	1.10^{-16}	1.10^{-16}
	Kopuk Bağ -Yüklü (cm^2)		1.10^{-15}	1.10^{-15}	1.10^{-15}
	Bant Uzantı Durumları-Nötr (cm^2)		7.10^{-17}	7.10^{-17}	7.10^{-17}
	Bant Uzantı Durumları-Yüklü (cm^2)		7.10^{-17}	7.10^{-17}	7.10^{-17}

Çizelge 4.2 Dereceli tampon tabaklar için kullanılan parametreler seti

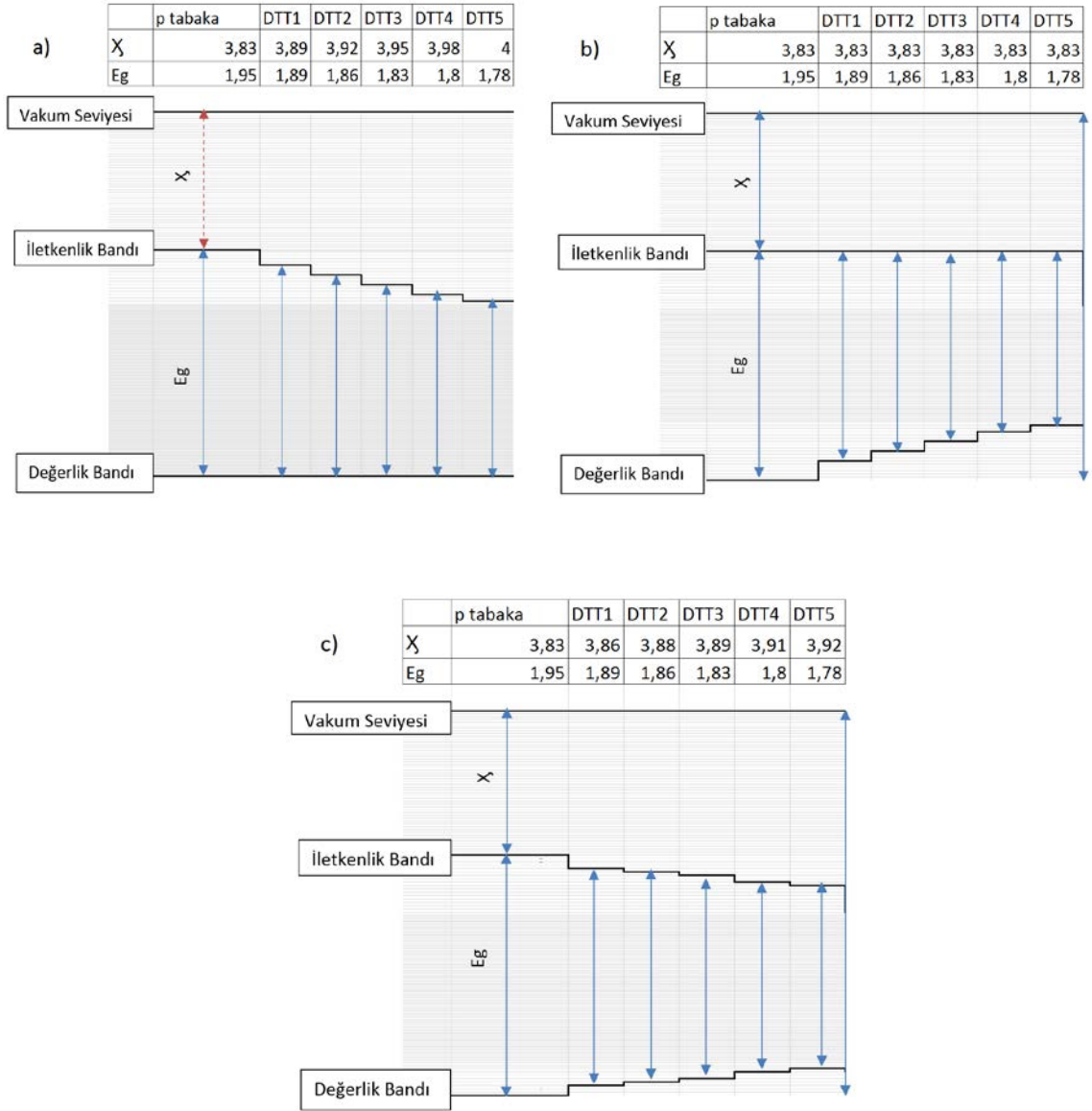
Parametre		DTT 1	DTT 2	DTT 3	DTT 4	DTT 5	
Tabaka Kalınlığı (nm)		1-5	1-5	1-5	1-5	1-5	
Mobilite Aralığı (eV)		1,89	1,86	1,83	1,8	1,78	
Elektron Duygunluğu (eV)		3,89	3,92	3,95	3,98	4	
Etkin Durum Yoğunluğu, N_c , N_v (cm^{-3})		1.10^{20}	1.10^{20}	1.10^{20}	1.10^{20}	1.10^{20}	
Katılama Yoğunluğu, N_A , N_D (cm^{-3})		-	-	-	-	-	
Elektron Mobilitesi (cm^2/V^s)		20	20	20	20	20	
Deşik Mobilitesi (cm^2/V^s)		5	5	5	5	5	
Bant uzantı eğimi	Verici tipi (eV)	90	90	90	90	90	
	Alıcı tipi (eV)	180	180	180	180	180	
Gaussien Kopuk Bağlar	Verici Tipi	Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	3.10^{16} - 3.10^{19}	3.10^{16} - 3.10^{19}	3.10^{16} - 3.10^{19}	3.10^{16} - 3.10^{19}	3.10^{16} - 3.10^{19}
		Standart sapma (eV)	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
		Konumu (E_c 'den) (eV)	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65
	Alıcı Tipi	Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	3.10^{16} - 3.10^{19}	3.10^{16} - 3.10^{19}	3.10^{16} - 3.10^{19}	3.10^{16} - 3.10^{19}	3.10^{16} - 3.10^{19}
		Standart sapma	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
		Konumu (E_v 'den) (eV)	1,43	1,42	1,41	1,4	1,39
Yakalama Etkin Kesitleri	Kopuk Bağ - Nötr (cm^2)		1.10^{-16}	1.10^{-16}	1.10^{-16}	1.10^{-16}	1.10^{-16}
	Kopuk Bağ -Yüklü (cm^2)		1.10^{-15}	1.10^{-15}	1.10^{-15}	1.10^{-15}	1.10^{-15}
	Bant Uzantı Durumları- Nötr (cm^2)		7.10^{-17}	7.10^{-17}	7.10^{-17}	7.10^{-17}	7.10^{-17}
	Bant Uzantı Durumları- Yüklü (cm^2)		7.10^{-17}	7.10^{-17}	7.10^{-17}	7.10^{-17}	7.10^{-17}

Bant ofsetlerin etkisini görebilmek amacıyla, p⁺/i arayüzeyinde 3 türlü bant ofset denenmiştir.

Tabakaların elektron duygunluğu değeri aynı olduğunda, tabakaların değerlik bantları vakum düzeyine göre farklı enerjidedir ve bant ofsetleri değerlik bandındadır. Bu durumda arayüzeyde, azınlık taşıyıcısı olan elektronların p-tabakaya geri difüzyonu engel oluşmazken, çoğunluk taşıyıcısı deşikler için engel söz konusudur. Bu koşulda, arayüzey bölgesinde yeniden birleşmenin artması, açık devre geriliminin düşmesi ve performansın düşmesi beklenir.

Tüm tabakalar için elektron duygunluğu ve bant aralığı toplamı aynı ise, tabakaların değerlik bandı vakum düzeyine göre aynı enerjidedir ve bant ofset iletim bandındadır. Bu durumda Vet B. ve Zeman, M'nin de gözlemlediği gibi [68], deşik iletimi için bir engel oluşmazken, p-tabakasına geri difüz olacak elektronlar için engel olduğundan, yeniden birleşmelerde azalma, açık devre geriliminde artma beklenir.

Bant ofsetlerin iki bant arasında eşit dağıtıldığı durum ise, %50-%50 olarak adlandırılmaktadır. **Şekil 4.2**'de her üç durum için bant ofsetler verilmiştir.



Şekil 4.2 Bant Ofsetler a) İletkenlik bandında ofset verilmesi b) Değerlik bandında ofset verilmesi c) İletkenlik ve değerlik bantlarının arasında ofset verilmesi

4.1. pin Yapıdaki Amorf Silikon Güneş Göze Katmanları İçin En İyi Değerlerin Elde Edilmesi

Pin yapılı a-Si:H gözelerin modellemeleri sırasında;

- p-tabakasının katkı yoğunluğu; $2 \cdot 10^{17}$ - $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ aralığında, kalınlığı; 5-50 nm aralığında, kusur yoğunlukları; $3 \cdot 10^{17}$ - $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ aralığında,
- p/n tabakaları arasında, arayüzeye yerleştirilen a-SiC:H tampon tabakanın kalınlığı, 5-25 nm aralığında, kusur yoğunlukları, $3 \cdot 10^{16}$ - $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ aralığında

- bant aralıkları farklı olan tabakalar arasındaki bant ofsetleri, iletkenlik bandında, değerlik bandında ve %50-%50 olacak şekilde,
- ışık eşlikli kusurların etkisini incelemek amacıyla, intrinsik tabakanın kalınlığı, 300-1000 nm aralığında, kusur yoğunlukları, $5 \cdot 10^{15}$ - $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ aralığında,

değiştirilmiştir. Her bir durum için, yapıyı oluşturan katmanlardaki yeniden birleşme hızı ve elektrik alan değişimleri değerlendirilerek, bu parametrelerin modellenmiş I-V eğrilerine ve modellenmiş kuantum verimi eğrilerine etkileri incelenmiştir.

İzleyen kesimde bu modelleme sonuçları ayrıntılı olarak verilmiş ve tartışılmıştır.

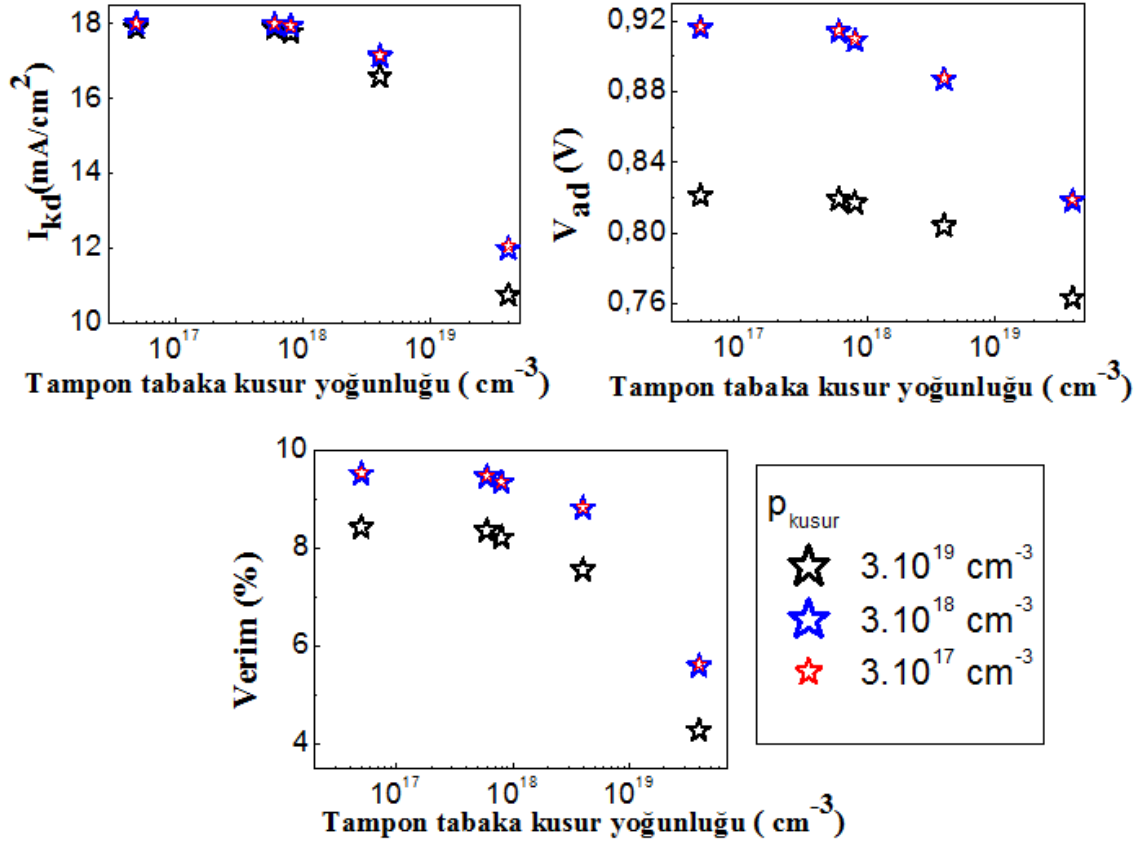
4.1.1. P Katkılı a-SiC:H Yayıcı Tabakanın İncelenmesi

p-katkılı tabaka pin yapılı güneş gözesinde pencere özelliği gördüğünden ve gelen güneş ışınının bu tabakadan en az soğrulmayla geçmesi gerektiğinden, bu tabakanın kalınlığı, bant aralığı, katkılama yoğunluğu ve kusur yoğunluğu önemli parametrelerdir. Bu çalışmada, geniş bant aralıklı (1.95 eV) p-tabaka alınıp diğer parametrelerin etkisi incelenmiştir.

p-katkılı yayıcı tabaka kalınlığı (d_{ptabaka}); 9 nm, dereceli tampon tabaka kalınlığı (d_{DTT}); 15 nm, diğer parametreler **Çizelge 4.1** ve **Çizelge 4.2**'deki değerler sabit alınarak modelleme yapılmıştır.

Kusur Yoğunluğu Etkisi

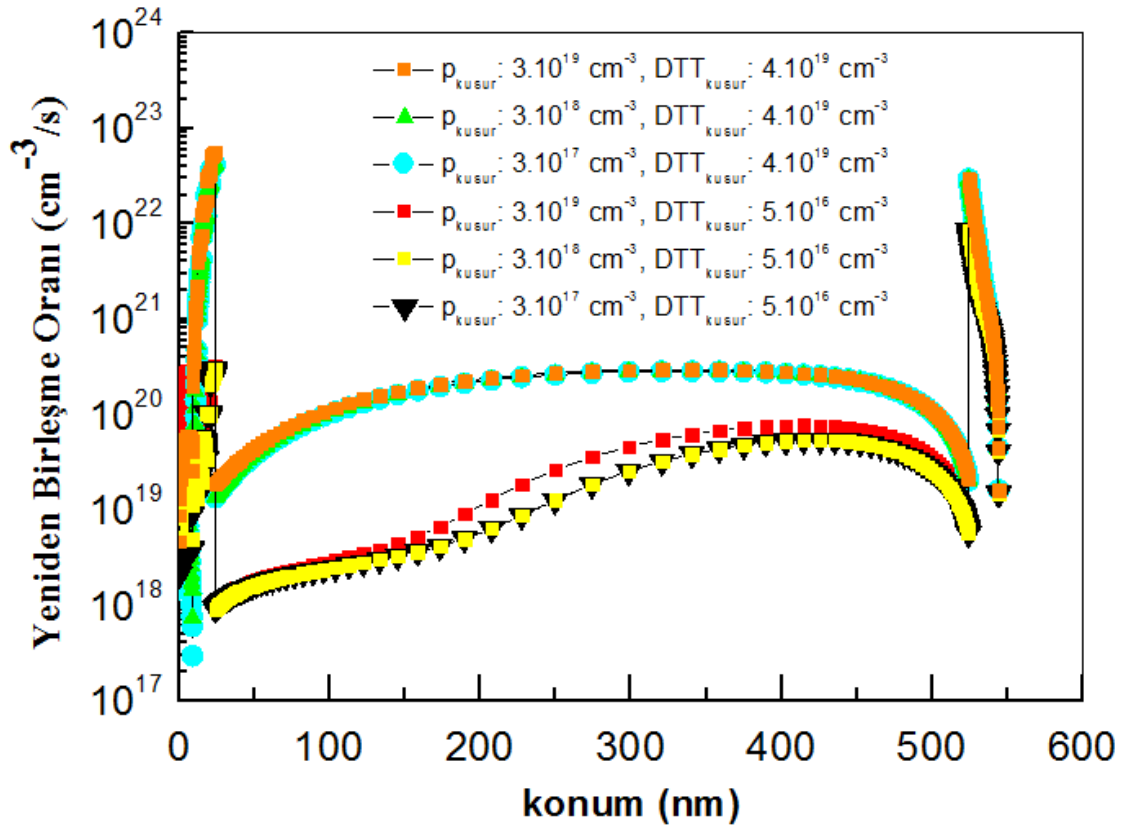
p-tabaka katkı yoğunluğu (N_A); $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olarak alınıp, p-katkılı yayıcı tabaka kusur yoğunluğu etkisi incelenirken, aynı anda dereceli tampon tabaka kusur yoğunluğu da değiştirilerek modelleme yapılmıştır. p-tabaka kusur yoğunluğu (p_{kusur}); $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, dereceli tampon tabaka kusur yoğunluğu ($\text{DTT}_{\text{kusur}}$); $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ aralığında alınarak elde edilen sonuçlar, aydınlık I-V eğrilerinden elde edilen, kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi ve verim değişimi olarak **Şekil 4.3**'te verilmiştir. **Şekil 4.3**'te görüldüğü gibi, p^+/i arayüzeyindeki tampon tabaka kusur yoğunluğu $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 'den fazla olduğunda, kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi ve verim hızla düşmektedir. Bu değerden küçük kusur yoğunlukları için, tampon tabaka kusur yoğunluğuna bağımlılık zayıftır. p-katkılı yayıcı tabaka kusur yoğunluğunun $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 'den büyük olan değerleri için de göze parametrelerinde hızlı düşüş gözlenmiştir.



$d_{\text{tabaka}}: 9 \text{ nm}, d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}, N_A: 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.3 p-katkılı a-SiC:H yayıcı tabakadaki farklı kusur yoğunluğu için göze parametrelerinin tampon tabaka kusur yoğunluğu ile değişimi

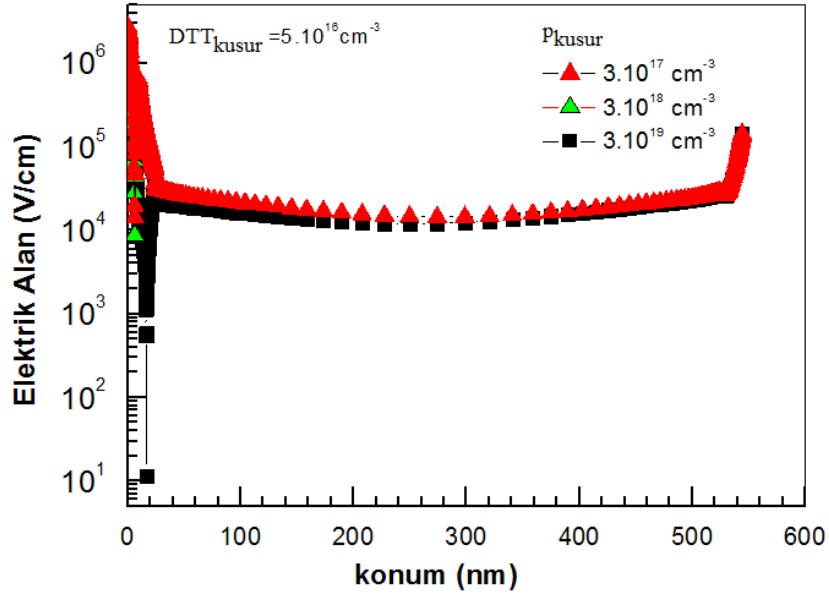
Akım, gerilim ve verim değerlerine ilave olarak, kusur yoğunluğu değişimlerinin termodinamik dengede yeniden birleşme ve elektrik alan üzerindeki etkisi incelenmiş, yeniden birleşme oranının (recombination rate) konuma bağlı değişimleri **Şekil 4.4**, elektrik alan değişimleri ise **Şekil 4.5** ve **Şekil 4.6**'da verilmiştir. **Şekil 4.4**'ten görüldüğü gibi, yeniden birleşmelerin, dereceli tampon tabaka kusur yoğunluğuna yüksek bağımlılık gösterdiği görülmüştür. Tampon tabaka kusur yoğunluğunun $4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olduğu durumda, $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olduğu durumdakine göre daha yüksek yeniden birleşme oranı vermesi, **Şekil 4.3** ile uyumlu olarak açık devre geriliminin düşüşünü açıklamaktadır. Tampon tabaka kusur yoğunluğunun düşük olduğu durumlarda, $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, p+/i arayüzeyindeki düşüş daha belirgindir.



$d_{\text{tabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $N_A: 3.10^{19} \text{ cm}^{-3}$

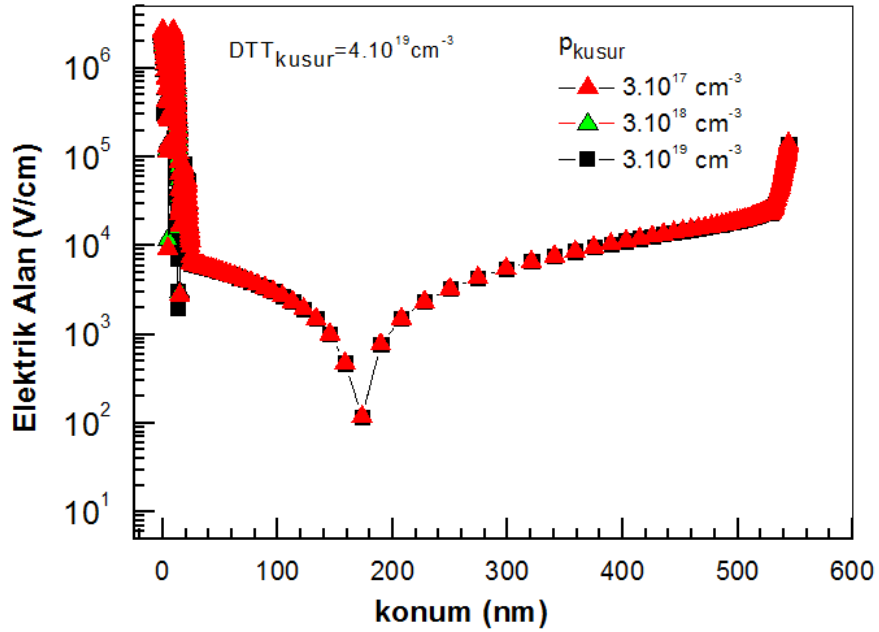
Şekil 4.4 p-katkılı a-SiC:H yayıcı tabakadaki farklı kusur yoğunlukları için yeniden birleşme oranının, tampon tabaka kusur yoğunluğu ile değişimi (Termodinamik dengede)

Şekil 4.5 ve **Şekil 4.6**'dan açıkça görüldüğü gibi, tampon tabaka kusur yoğunluğunun artışı, elektrik alan dağılımını olumsuz etkilemekte ve $DTT_{\text{kusur}}=4.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olduğu durumda, elektrik alanda göze veriminde keskin azalışı da açıklayan ani düşüşler gözlenmektedir. Tampon tabakada biriken + yükler, p⁺/i arayüzeyinde elektrik alanı artırmakta ve intrinsik tabakada azaltmaktadır.



d_{ptabaka}:9 nm, d_{DTT}: 15 nm

Şekil 4.5 p-katkılı a-SiC:H yayıcı tabakadaki farklı kusur yoğunlukları için elektrik alanın konum ile değişimi



d_{ptabaka}:9 nm, d_{DTT}: 15 nm

Şekil 4.6 p-katkılı a-SiC:H yayıcı tabakadaki farklı kusur yoğunlukları için elektrik alanın konum ile değişimi

Bu nedenle bundan sonraki çalışmalarda kusur yoğunlukları, açık devre geriliminin yüksek, yeniden birleşme oranının düşük ve kısa devre akım yoğunluğunun yüksek olduğu koşulları sağlayan;

p-katkılı yayıcı tabaka kusur yoğunluğu; $3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$

tampon tabaka kusur yoğunluğu; $3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

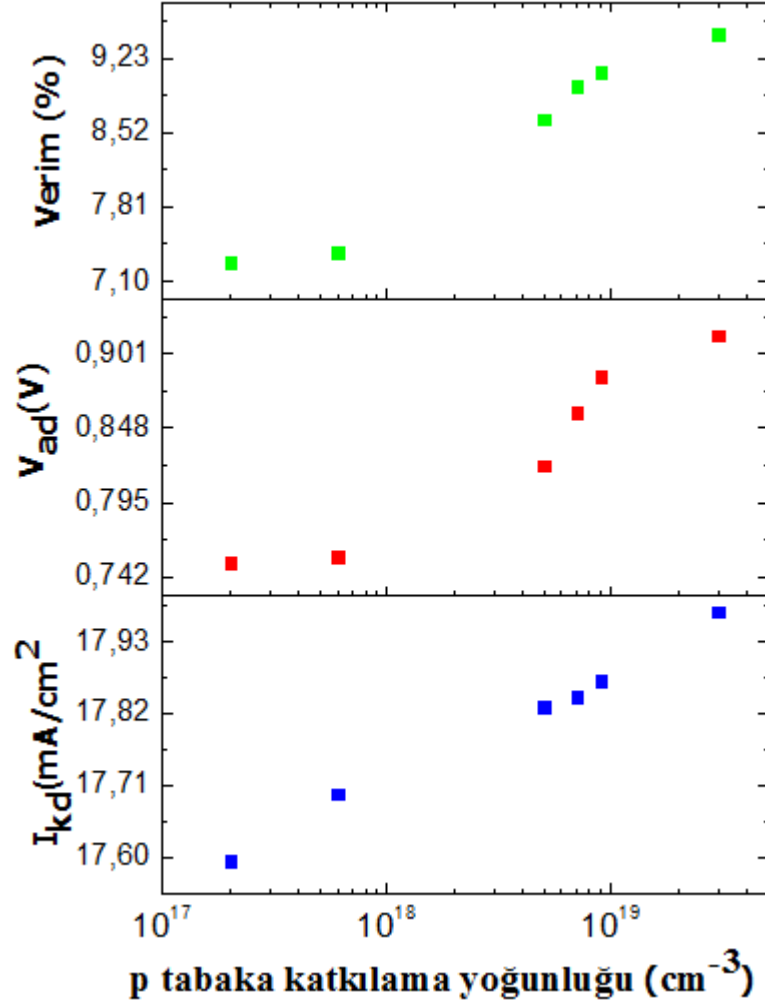
değerler olarak alınmıştır. [69] Alınan bu değerler ENEA deneysel değerleriyle ($I_{kd}=17 \text{ mA/cm}^2$, $\eta=\% 9.96$, $V_{oc}:0, 857 \text{ V}$, $D\check{C}:\% 69,98$) ile de uyumludur [45] [67]

Katkı Yoğunluğu Etkisi

p-katkılı yayıcı tabaka katkı yoğunluğunun etkisini gözlemlemek amacıyla, p-katkılı yayıcı tabaka kusur yoğunluğu ve tampon tabaka kusur yoğunluğu için, bir önceki kesimde elde edilen optimum değerler kullanılarak ve p-tabaka için katkılama yoğunluğu değeri, $2.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ile $3.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ arasında değiştirilerek modelleme yapılmıştır.

Aydınlık I-V eğrilerinden elde edilen göze parametrelerinin değişimi **Şekil 4.7**'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, p-tabaka için katkılama yoğunluğunun 10^{18} cm^{-3} değerinin üzerine çıktığı durumda, göze parametrelerinde hızlı bir artış olmuştur. Bu gözlemler, literatürle uyumlu olarak [70][71], p-tabakasının katkı yoğunluğu arttırıldığında, Fermi düzeyi değerlik bandına doğru kayarak, pin yapıda sözde Fermi düzeyleri açıldığından, yapı potansiyelinin büyüdüğünü, açık devre geriliminin arttığını, dolaylı olarak da yeniden birleşme oranlarının azaldığını göstermektedir.

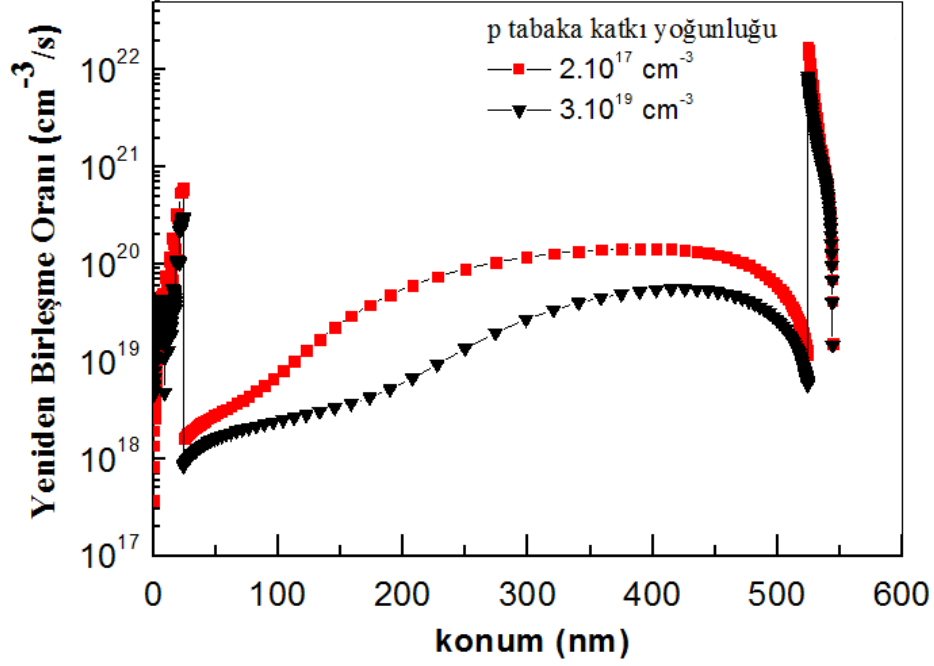
Modelleme çalışmalarında, p-katkılı tabaka için optimum katkılama değeri için $3.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ değeri alınarak bundan sonraki modellemelere devam edilmiştir.



$d_{\text{ptabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $p_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.7 p-katkılı tabaka katkılama değişimine göre kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi ve verim değişimi

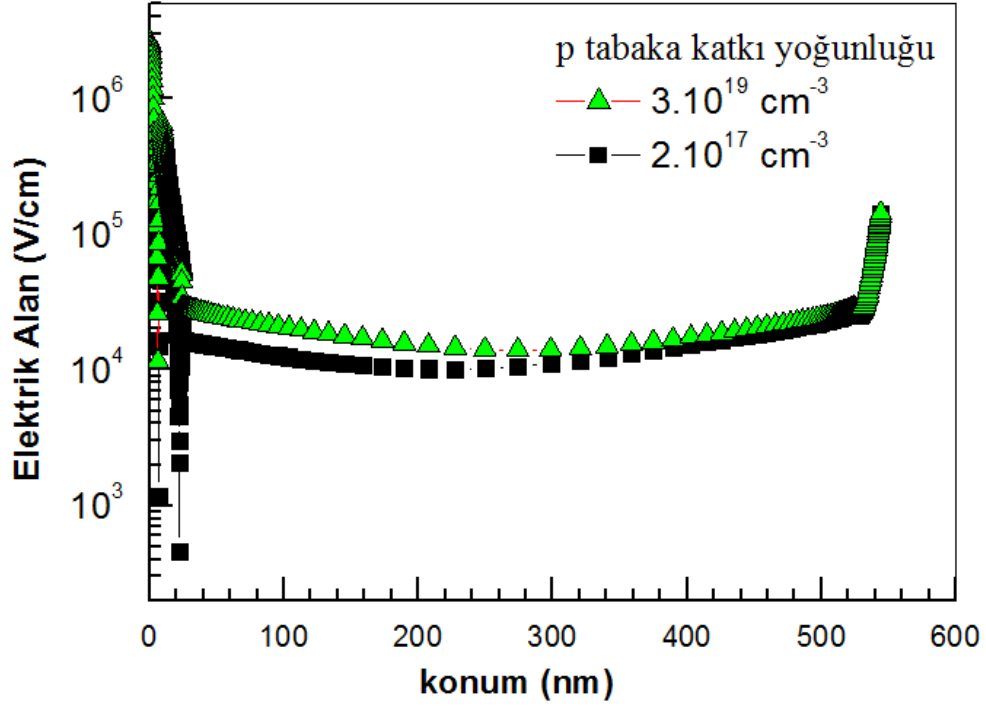
p-tabaka katkılama yoğunluğunun, yeniden birleşme oranı ve elektrik alandaki etkisini incelemek için, katkılama yoğunluğunun modellemede kullanılan en az ve en fazla olduğu $2.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ve $3.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ iki durum için yapılan modellemelerden elde edilen sonuçlar **Şekil 4.8**'de verilmiştir.



$d_{\text{ptabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $p_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.8 p-katkılı tabaka katkılama değişimine göre yeniden birleşme oranının değişimi

Şekilden görüldüğü gibi, yeniden birleşme hızı uniform değildir, p^+/i arayüzeyi yakınında keskin düşme gözlenmektedir ve p-tabaka katkı yoğunluğunun düşmesiyle, intrinsik tabaka içinde yeniden birleşme oranı artmaktadır. Benzer şekilde elektrik alan değişimine bakıldığında, p^+/i arayüzeyine yakın yerlerde elektrik alan profilini bozmayan küçük artışlar gözlenmektedir. (**Şekil 4.9**) p-tabaka katkı yoğunluğunun göze parametrelerine etkisi, farklı yayıcı kalınlığı ve farklı tampon tabaka kusur yoğunluğunun göz önüne alındığı durumlar için de incelenmiş ve **Kesim 4.1.2.2**'de verilmiştir.



$d_{\text{ptabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $p_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

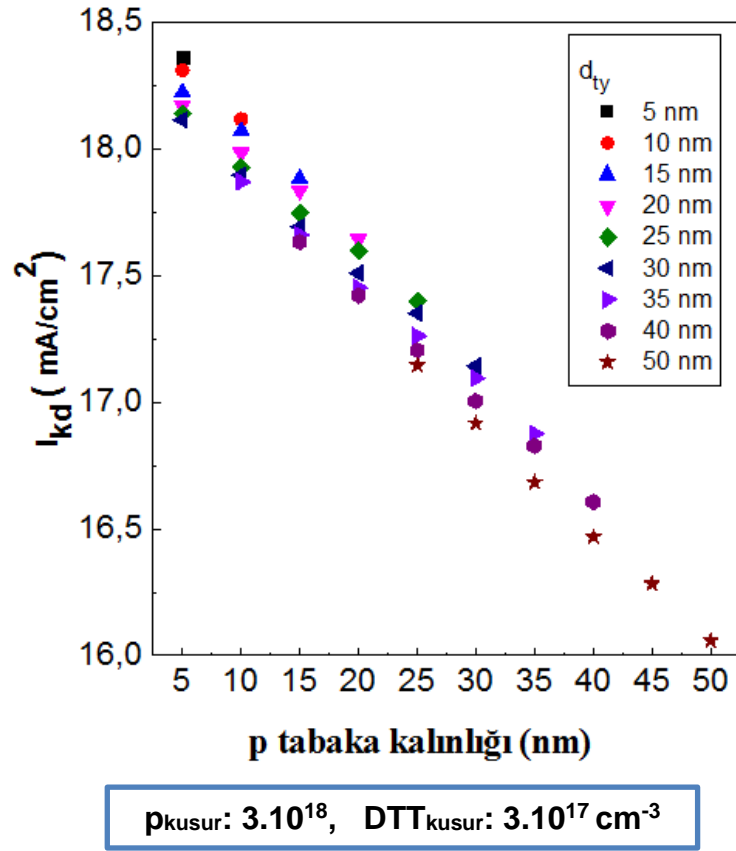
Şekil 4.9 P Katkılı tabaka katkılama değişimine göre elektrik alan değişimi

Toplam Yayıcı Kalınlığının Etkisi

Toplam yayıcı kalınlığının etkisini incelemek için yapılan modellemelerde, p-katkılı a-SiC:H ve katkısız dereceli tampon tabakalarının toplam kalınlığı 5 nm ile 50 nm arasında değiştirilirken, p-tabaka ve dereceli tampon tabaka oranları da değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar **Çizelge 4.3**, **Şekil 4.10** ve **Şekil 4.11**'de verilmiştir.

Kuramsal kesimde de belirtildiği gibi, p-tabaka kalınlığının artmasıyla, bu tabakada ışığın soğurulması sonucu, kısa devre akım yoğunluğu azalmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla, p-katkılı a-SiC:H yayıcı kalınlığı 5 nm'den 50 nm'ye arttırıldığında, şekilden görüldüğü gibi, pin yapı içerisinde tampon tabaka olmadığı durumda, kısa devre akım yoğunluğu, $18,36 \text{ mA/cm}^2$ 'den $16,06 \text{ mA/cm}^2$ 'ye (**Şekil 4.10**), açık devre gerilimi, $0,976 \text{ V}$ 'tan $0,938 \text{ V}$ 'a (**Şekil 4.11**) düşmektedir. Toplam yayıcı kalınlığının sabit olduğu, p-tabakanın kalınlığının tampon tabakadan daha

fazla olduğu durumlarda, kısa devre akım yoğunluğu azalırken, açık devre gerilimi artma eğilimindedir.



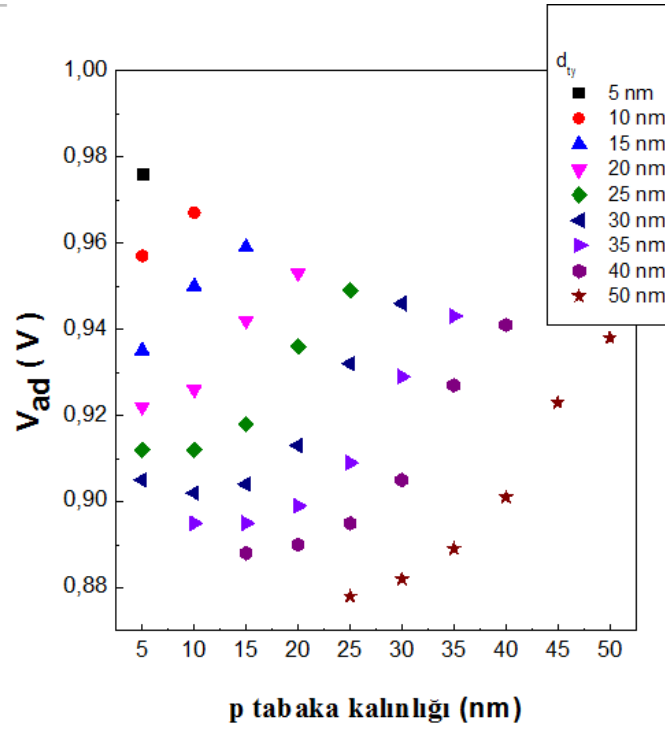
Şekil 4.10 p-katkılı tabaka kalınlığının kısa devre akım yoğunluğu değerleri üzerinde etkisi

5 nm'lik ve 50 nm'lik toplam yayıcı kalınlığına sahip, tampon tabakasız iki güneş gözesinin spektral tepkisi karşılaştırıldığında ise **Şekil 4.12**'te görüldüğü gibi, p-tabaka kalınlık artışı mavi bölge tepkisini olumsuz yönde etkilemektedir.

p-tabaka ve tampon tabaka kalınlık değişiminin göze spektral tepkisi üzerindeki etkisi de incelenmiş, toplam yayıcı kalınlığı 35 nm olan örnek için sırasıyla tampon tabakasız, tampon tabaka kalınlığının 10 ve 20 nm olduğu durumlar için, spektral tepkinin dalgaboyuna bağlı değişimi **Şekil 4.13**'te verilmiştir. 600 nm dalgaboyunun üstünde spektral tepkinin kalınlık değişiminden etkilenmediği, ancak 600 nm'nin altında dalgaboylarında p-tabaka kalınlığının en düşük, tampon tabaka kalınlığının ise en yüksek olduğu durumda, spektral tepkinin en yüksek seviyesinde olduğu görülmüştür.

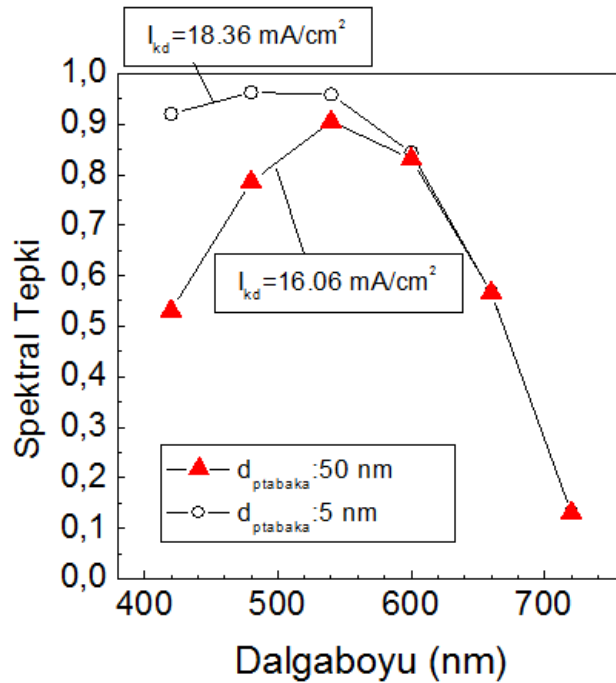
Çizelge 4.3 Toplam yayıcı tabaka içinde tampon tabaka kalınlığının etkisi

Model Adı	d_{ty} (nm)	d_p (nm)	d_{DTT} (nm)	I_{ad} (mA/cm ²)	Verim (%)	DÇ	V_{ad} (V)
DTT15.p5b0	5	5	0	18,363	10,404	0,638	0,976
DTT14.p5b5	10	5	5	18,312	10,183	0,639	0,957
DTT15.p10b0	10	10	0	18,118	10,260	0,644	0,967
DTT13.p5b10	15	5	10	18,225	9,775	0,631	0,935
DTT14.p10b5	15	10	5	18,072	10,070	0,645	0,950
DTT15.p15b0	15	15	0	17,884	10,112	0,649	0,959
DDT12.p5b15	20	5	15	18,172	9,559	0,628	0,922
DTT13.p10b10	20	10	10	17,985	9,657	0,638	0,926
DTT14.p15b5	20	15	5	17,837	9,924	0,650	0,942
DTT15.p20b0	20	20	0	17,646	9,962	0,652	0,953
DTT11.p5b20	25	5	20	18,142	9,404	0,625	0,912
DTT12.p10b15	25	10	15	17,929	9,431	0,635	0,912
DTT13.p15b10	25	15	10	17,749	9,516	0,642	0,918
DTT14.p20b5	25	20	5	17,599	9,776	0,653	0,936
DTT15.p25b0	25	25	0	17,400	9,807	0,653	0,949
DTT10.p5b25	30	5	25	18,116	9,267	0,622	0,905
DTT11.p10b20	30	10	20	17,898	9,276	0,632	0,902
DTT12.p15b15	30	15	15	17,693	9,292	0,639	0,904
DTT13.p20b10	30	20	10	17,510	9,374	0,645	0,913
DTT14.p25b5	30	25	5	17,352	9,624	0,654	0,932
DTT15.p30b0	30	30	0	17,143	9,646	0,654	0,946
DTT10.p10b25	35	10	25	17,871	9,139	0,628	0,895
DTT11.p15b20	35	15	20	17,661	9,138	0,636	0,895
DTT12.p20b15	35	20	15	17,453	9,152	0,642	0,899
DTT13.p25b10	35	25	10	17,263	9,227	0,647	0,909
DTT14.p30b5	35	30	5	17,095	9,465	0,656	0,929
DTT15.p35b0	35	35	0	16,877	9,479	0,655	0,943
DTT10.p15b25	40	15	25	17,634	9,003	0,633	0,888
DTT11.p20b20	40	20	20	17,422	8,999	0,639	0,890
DTT12.p25b15	40	25	15	17,206	9,007	0,643	0,895
DTT13.p30b10	40	30	10	17,006	9,074	0,648	0,905
DTT14.p35b5	40	35	5	16,829	9,301	0,656	0,927
DTT15.p40b0	40	40	0	16,606	9,309	0,655	0,941
DTT10.p25b25	50	25	25	17,146	8,726	0,638	0,878
DTT11.p30b20	50	30	20	16,917	8,709	0,642	0,882
DTT12.p35b15	50	35	15	16,683	8,703	0,645	0,889
DTT13.p40b10	50	40	10	16,468	8,756	0,649	0,901
DTT14.p45b5	50	45	5	16,283	8,966	0,656	0,923
DTT15.p50b0	50	50	0	16,058	8,967	0,655	0,938



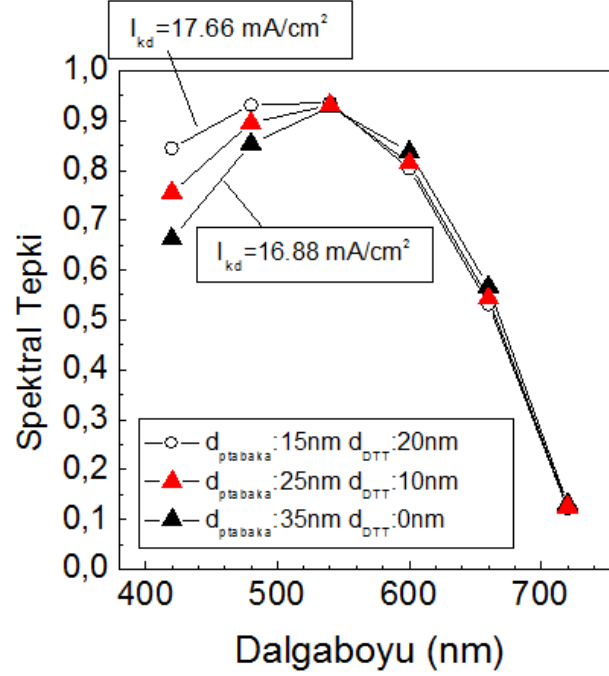
$\rho_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.11 p-katkılı tabaka kalınlığının gerilim değerleri üzerinde etkisi



Şekil 4.12 Tampon tabaka olmadığı durumda p-katkılı tabaka kalınlığına karşılık spektral tepki değişimi

Yayıcı tabaka olan p türü katkılı a-SiC:H tabakanın kalınlığının artmasıyla, gelen güneş ışınımının bu tabaka içinde soğrulması artmakta ve bunun sonucu olarak da kısa devre akım yoğunluğu azalmakta, mavi bölgede spektral tepki azalmaktadır.



Şekil 4.13 p-katkılı tabaka ve tampon katkılı tabaka kalınlığına karşılık spektral tepki değişimi

4.1.2. p⁺/i Arayüzeyindeki Tampon Tabakanın İncelenmesi

Pin yapıllı güneş gözelerinde, p ve i tabakası arasında;

- bant aralıkları farklı olan p-tabaka ve i-tabaka arasındaki p⁺/i arayüzeyinde bant ofsetlerini ayarlamak,
- bu alanda elektrik alanı artırmak,
- p-katkılı tabakaya elektron geri difüzyonunu önlemek,
- p⁺/i arayüzeyinde yeniden birleşme oranını düşürmek

amacıyla, dereceli tampon tabaka yerleştirilmektedir. Fotovoltaik etkinin büyük bir kısmı p⁺/i ara yüzünde gerçekleştiği için, ara yüzdeki tampon tabakanın kusur yoğunluğu, bant aralığı ve bant ofsetleri oldukça önemli parametrelerdir [45]. Bu parametrelerin güneş gözesi üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek için yapılan modelleme çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

4.1.2.1. Dereceli Tampon Tabakanın Optimizasyonunda Bant Ofsetlerin Etkisi

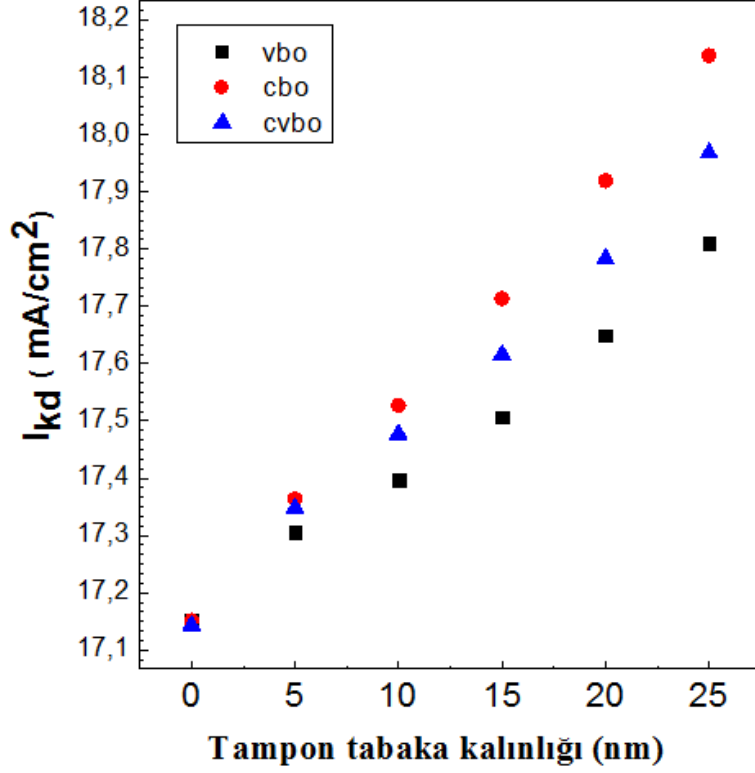
Tampon tabaka, p⁺/i arayüzeyinde bant ofsetlerini ayarlamak için kullanıldığından, ilk adım olarak **Kesim 4**'ün girişinde açıklanan ve **Şekil 4.2**'de verilen bant ofsetleri düzenlenimleriyle, toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan göze için, kısa devre akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi değişimleri incelenmiştir. Bu incelemeler sırasında, **Kesim 4.1.1**'de elde edilen optimum değerler kullanılmıştır.

Tampon tabakalara ait elektron duygunlukları sırasıyla 3.89, 3.92, 3.95, 3.98, 4.00 eV olarak alınıp, değerlik bandında $\Delta E_v=0$ yapılmıştır. Bu durumda bant ofset iletkenlik bandında yaratılmıştır. Benzer şekilde tampon tabakalara ait elektron duygunluğu değerleri 3,83 eV alınarak iletkenlik bandında birleştirilmiş, değerlik bandında ofset verilmiş ve $\Delta E_c=0$ yapılmıştır.

Bant ofsetinin iletkenlik bandında (cbo), değerlik bandında (vbo) yaratıldığı ve bant ofsetlerinin %50-%50 dağıtıldığı (cvbo) durumları için, kısa devre akım ve açık devre geriliminin tampon kalınlığı ile değişimi **Şekil 4.14** ve **4.15**'te, yeniden birleşme oranı ise **Şekil 4.16**'da verilmiştir.

Şekillerden görüldüğü gibi, tüm düzenlenimlerde, **Şekil 4.10** ve **4.11** ile uyumlu olarak, toplam yayıcı kalınlığı içinde tampon tabaka kalınlığının payı arttıkça, kısa devre akım yoğunluğu artmakta, açık devre gerilimi azalmaktadır.

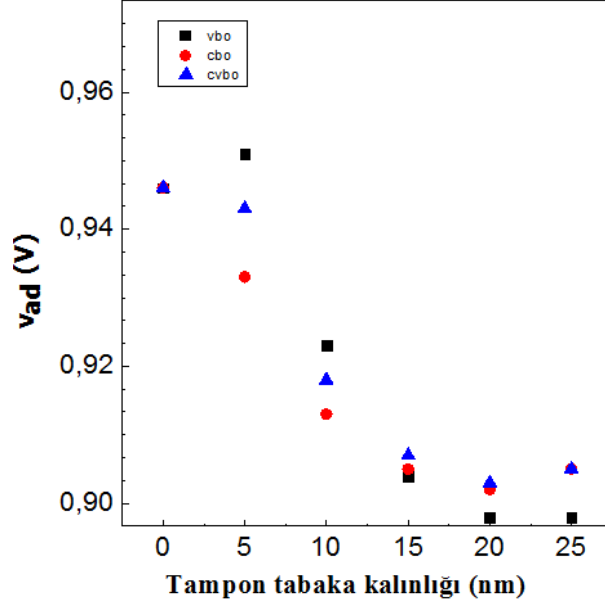
Toplam 30 nm yayıcı kalınlığına sahip gözeler için, değerlik bandında, iletkenlik bandında ofset verilmesi ve bant ofsetlerin %50-%50 dağıtıldığı durumlar için yeniden birleşme oranları değerleri incelenmiş, **Şekil 4.17**'de görüldüğü gibi bulk kısımda yeniden birleşme değerleri arasında çarpıcı bir fark gözlenmemiş, ancak 0-30 nm aralığında iletkenlik bandında yeniden birleşme oranlarının yüksek olduğu görülmüştür.



$$\rho_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}, \text{ DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

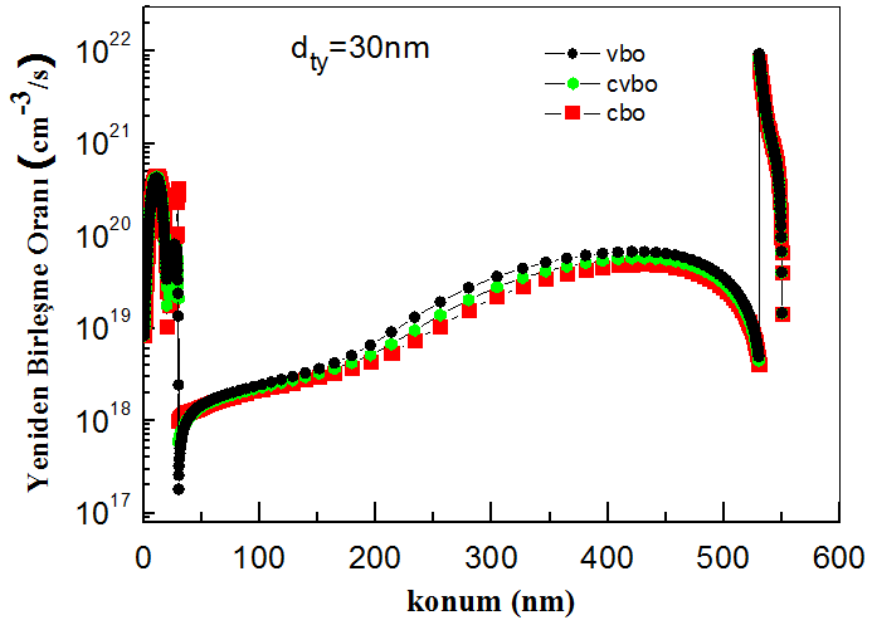
Şekil 4.14 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örneğe ait tampon tabakaların bant ofset değışikliğinin, kısa devre akım değęerlerine etkisi

İletkenlik bandına verilecek bant ofseti ile p-tabakaya doğru elektronun geri difüzyonu önleneceğinden ve bu nedenle yeniden birleşme oranının azalması ve açık devre geriliminin artması beklenmektedir. **Şekil 4.14** ve **Şekil 4.16**'dan görüldüğü gibi, bant ofset düzenleniminin, açık devre gerilimi ve yeniden birleşme oranları üzerindeki etkisi çok azdır. Bu sonuçlar, dereceli tampon tabaka kullanılan göze yapılarında bant ofset etkisinin göz ardı edilebileceğini göstermektedir.



$\rho_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.15 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örneğe ait tampon tabakaların bant ofset değişikliğinin gerilim değerlerine etkisi



$d_{\text{ptabaka}}: 20 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 10 \text{ nm}$, $\rho_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.16 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örneğe ait tampon tabakanın üç farklı ofset verilmesi durumu için yeniden birleşme değerleri

4.1.2.2. Dereceli Tampon Tabakanın Optimizasyonunda Tampon Tabaka Kusur Yoğunluğunun Etkisi

Kesim 4.1.1.'de açıklandığı gibi, katkılama yoğunluğunun $3.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olduğu durumda, açık devre geriliminin yüksek, yeniden birleşme oranının düşük ve kısa devre akım yoğunluğunun yüksek olduğu koşulları sağlayan $3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değeri tampon tabaka kusur yoğunluğu olarak seçilmiştir. Seçilen bu değer üzerinde, p-tabaka katkı yoğunluğunun etkisini görmek amacıyla, deneysel bir çalışma ile desteklenmeyen, yalnızca modelleme amaçlı olarak, katkı yoğunluğunun $1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ olduğu durum için çalışmalar tekrarlanmıştır.

Bant ofset düzenleniminin göze parametreleri üzerindeki etkisinin az olmasına karşın, bu modellemelerde elektronların geri difüzyonuna ve yeniden birleşmelere olanak sağlayan değerlik bant ofsetinin verildiği en kötü senaryo göz önüne alınmıştır.

p-tabaka tabaka kusur yoğunluğunun $3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ olduğu durumda, katkılama yoğunluğunun $3.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ve $1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ alındığı durumlarda, açık devre geriliminin, tampon tabaka kalınlığı ile değişimi sırasıyla **Şekil 4.17** ve **Şekil 4.18'de** verilmiştir. **Şekil 4.11'de** de tartışıldığı gibi, açık devre gerilimi, artan tampon tabaka kalınlığı ile azalırken tampon tabaka kusur yoğunluğunun artması ile de azalma eğilimi göstermektedir.

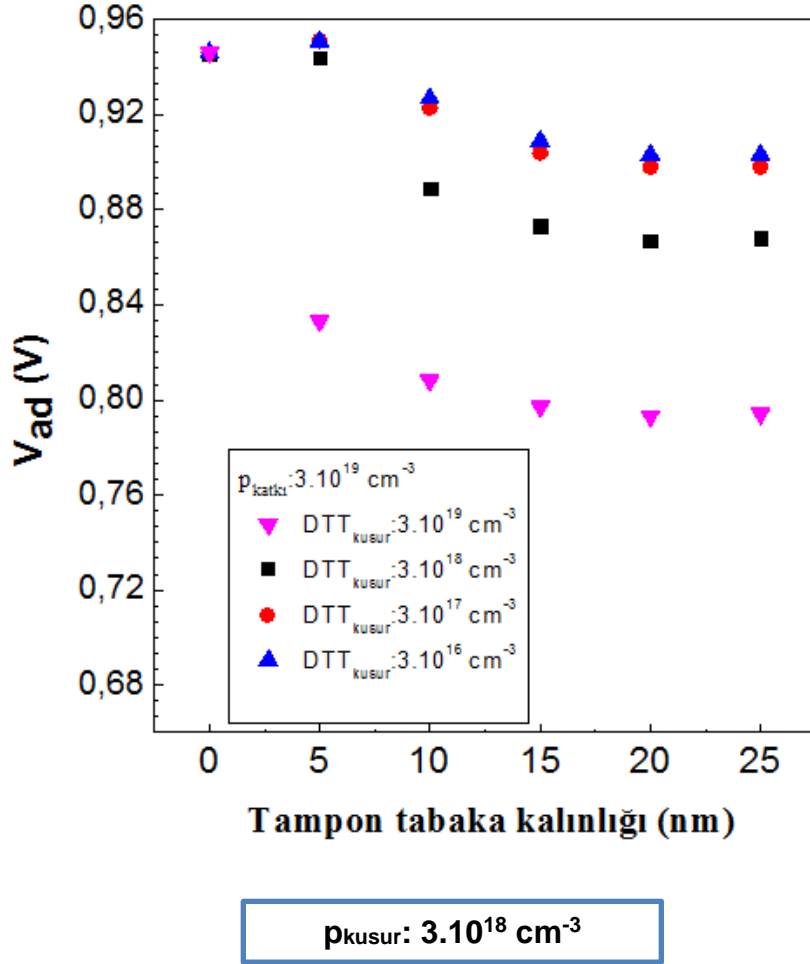
Katkı yoğunluğunun düşük olduğu durumda, yeniden birleşme oranlarının yüksek olması nedeniyle beklendiği gibi, daha düşük açık devre gerilimi değerleri elde edilmiştir ve tampon tabaka kusur yoğunluğuna bağımlılık daha zayıftır.

Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan güneş gözesinde, her iki katkılama yoğunluğu değeri için, farklı tampon tabaka kusur yoğunlukları ile elde edilen yakalama etkin kesit oranları **Şekil 4.19'da** verilmiştir.

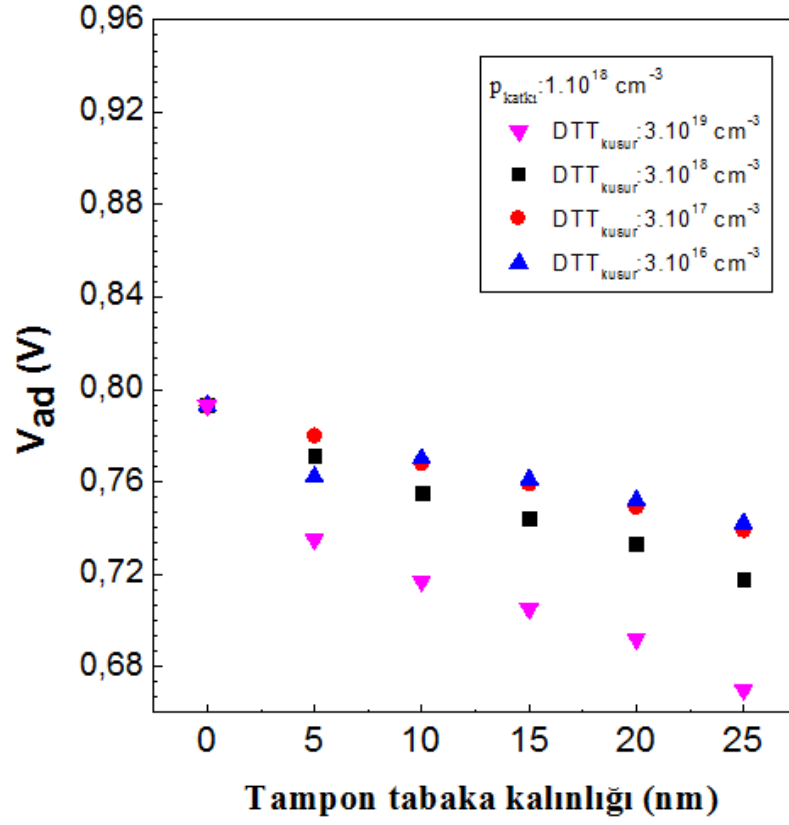
Şekilden açıkça görüldüğü gibi, katkılama yoğunluğunun azalmasıyla, intrinsik bölgede yeniden birleşme oranı artmakta ve Şekil 4.17'de görüldüğü gibi açık devre gerilimi düşmektedir.

Bu grafikler aynı zamanda, katkılama yoğunluğunun tek başına önemli bir parametre olmadığını, bununla birlikte p ve tampon tabakadaki kusur yoğunluğunun da önemli olduğunu göstermektedir. p⁺/i arayüzeyine yerleştirilen tampon

tabakadaki kusur yoğunluğu, p türü katkıli tabakadaki kusur yoğunluğundan daha fazla olduğunda, göze parametrelerinde düşme gözlenmiştir.

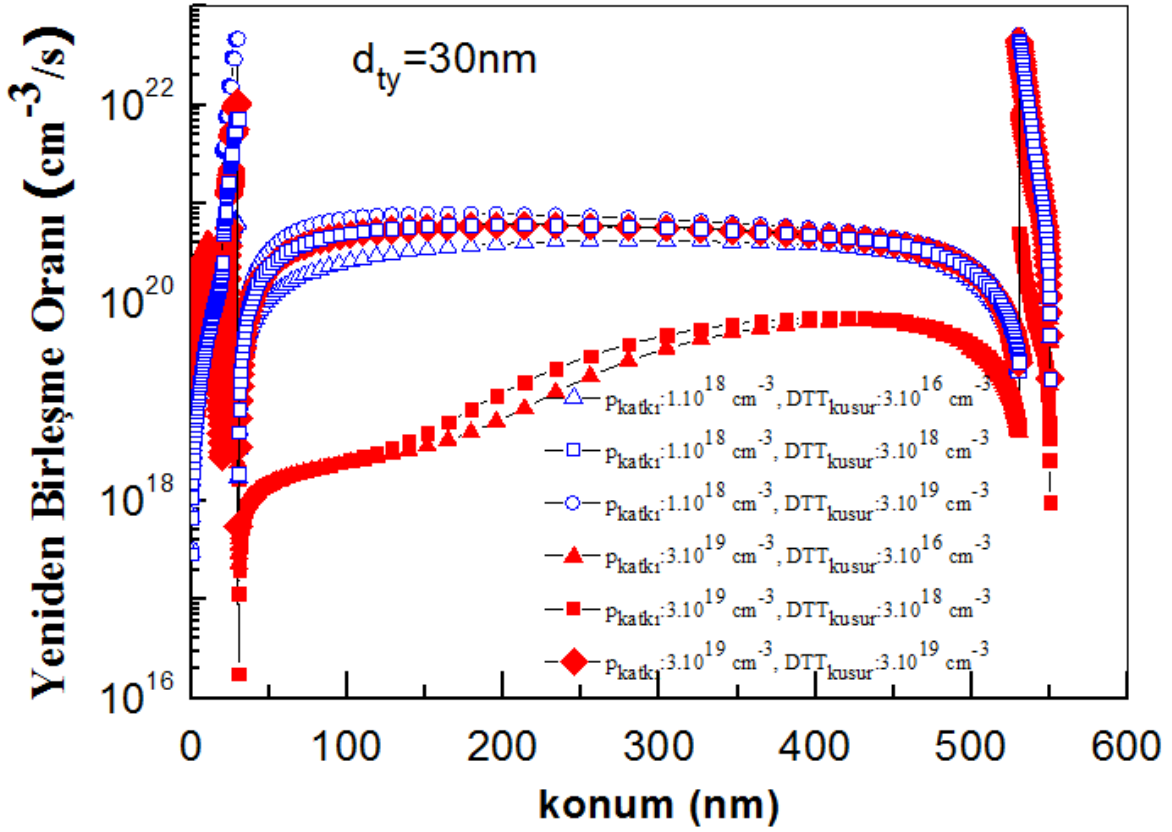


Şekil 4.17 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örnekte yer alan tampon tabakalara ait kusur yoğunluklarının açık devre gerilimi üzerindeki etkisi ($\rho_{\text{katki}}: 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)



$p_{kusur}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.18 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örnekte yer alan tampon tabakalara ait kusur yoğunluklarının açık devre gerilimi üzerindeki etkisi ($p_{katki}: 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$)



$d_{ptabaka}: 20 \text{ nm}, d_{DTT}: 10 \text{ nm}, p_{kusur}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}, E_{gDTT}: 1,95 \text{ eV}$

Şekil 4.19 Toplam yayıcı kalınlığı 30 nm olan örnekte yer alan tampon tabakalara ait kusur yoğunluklarının yeniden birleşme oranı üzerindeki etkisi

4.1.3. ENEA Tarafından Yapılan Degradasyon Kinetiği Çalışmalarının Modellenmesi

ENEA tarafından yapılan ışık eşikli bozulma kinetiği çalışmalarına ait deneysel sonuçlar **Çizelge 4.4**'te verilmiştir [67]. Işığa maruz kalma süresinin sıfır olduğu değerler, ışık eşikli bozulmanın olmadığı durumu göstermektedir. %9,96 verim ve %70 dolun çarpanı değeriyle, iyi kalitede göze olduğu anlaşılmaktadır. Çizelgeden görüldüğü gözelerin 140 saat ışık altında kalması sonucunda, göze parametrelerinde gözlenen ışık eşikli bozulma etkisiyle;

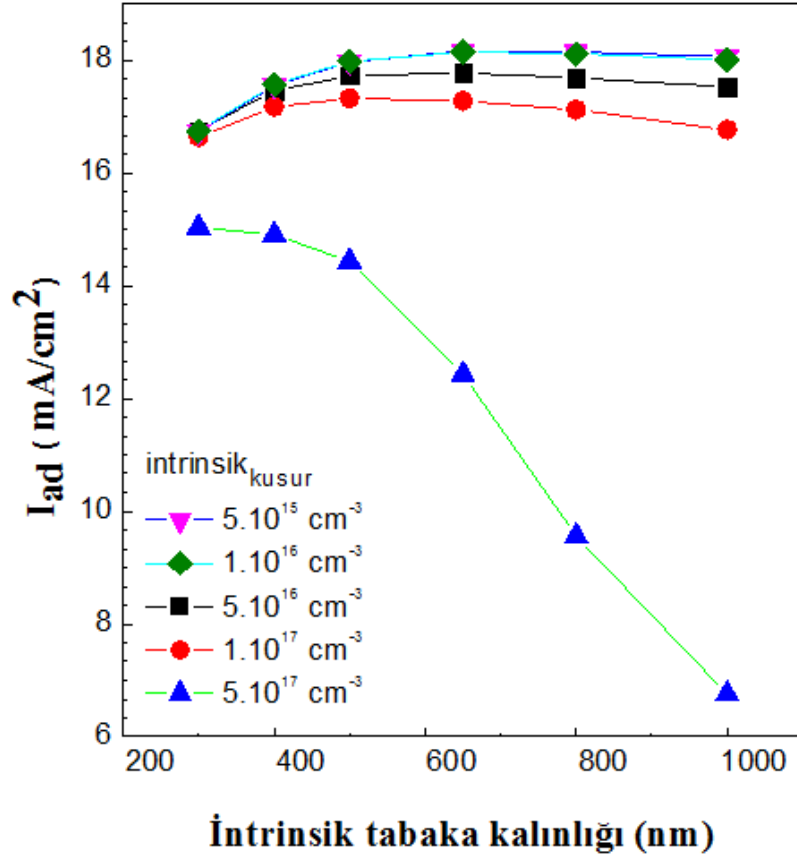
- kısa devre akım yoğunluğu %6.9'luk azalma ile 15.83 mA/cm^2 değerine,
- verim %8.8'lik azalma ile %6.98'e
- Dolun çarpanı %23'lük azalma ile 53,71 değerine düşmektedir.

Çizelge 4.4 ENEA araştırma merkezi laboratuvarında elde edilen ışık eşlikli bozulma deney sonuçları

Işığa maruz kalma süresi (saat)	V _{ad} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Dolum Çarpanı (%)	Verim (%)
0	0,857	17.00	69.98	9.96
5	0,854	16.59	66.50	9.42
20	0,845	16.35	62.40	8.64
44	0,839	16,17	59,54	8,08
68	0,832	16,10	58,54	7,89
92	0,828	15,91	55,72	7,71
116	0,822	15,83	54,46	7,33
140	0,822	15.83	53.71	6.98

Literatür çalışmalarından, ışığa maruz kalma sonucu oluşan bu etkinin, yapıdaki intrinsik tabakada kopuk bağ yoğunluğunun artması sonucu olduğu bilindiğinden [17][6] bu çalışmada da i-a-Si:H tabaka kusur yoğunluğu 5.10^{15}cm^{-3} - 5.10^{17}cm^{-3} aralığında artırılarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Literatürde, ışık eşlikli bozulma etkisinin ince örneklerde daha az olduğunun bildirilmesi [45] nedeniyle, intrinsik a-Si:H tabakanın kalınlığı da 300 nm ve 1000 nm arasında değiştirilmiştir.

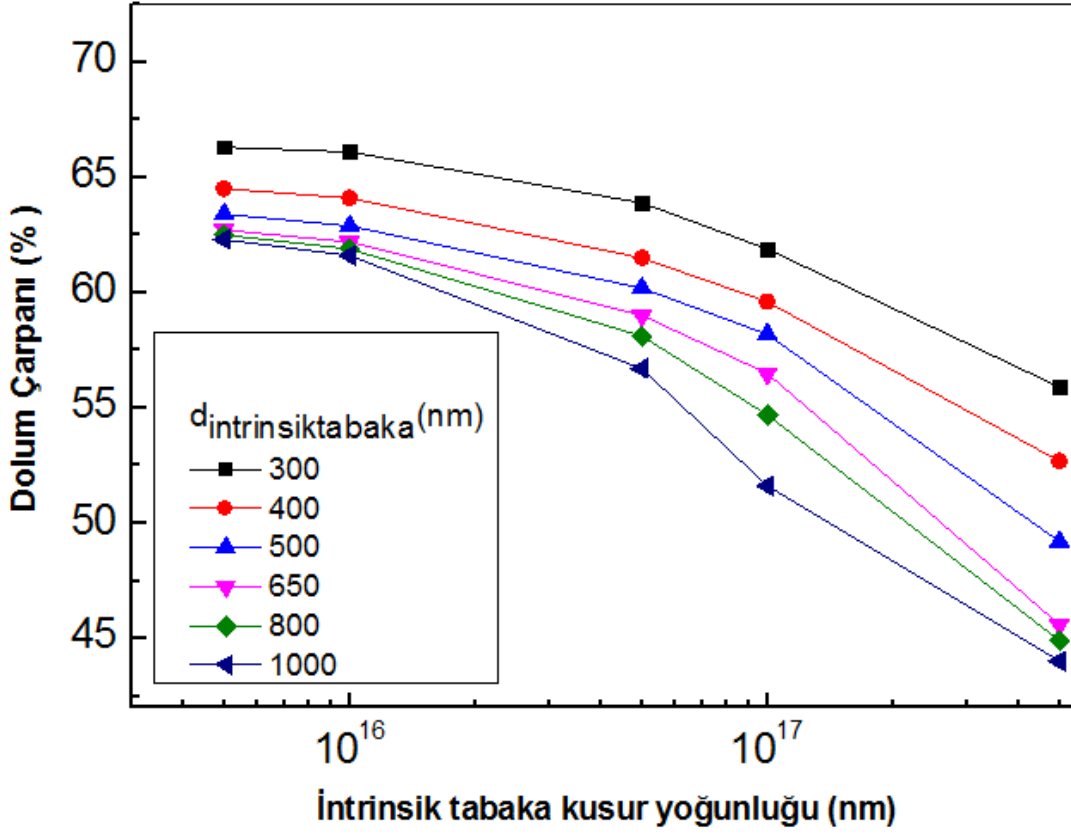
Şekil 4.20'de intrinsik tabaka kalınlığının 300-1000 nm arasında, intrinsik tabaka kusur yoğunluğunun 5.10^{15} - 5.10^{17}cm^{-3} aralığında değiştirilmesiyle, kısa devre akım yoğunluğunun değişimi görülmektedir. İntrinsik tabaka kusur yoğunluğunun artmasıyla, kısa devre akım yoğunluğunun düştüğü, kusur yoğunluğunu 5.10^{17}cm^{-3} değerine ulaştığında ise düşme oranının artan kalınlıkla arttığı gözlenmektedir.



$d_{\text{tabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $p_{\text{kusur}}: 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.20 İntrinsik tabaka kusur yoğunluğu için kısa devre akım yoğunluğunun intrinsik tabaka kalınlığı ile değişimi

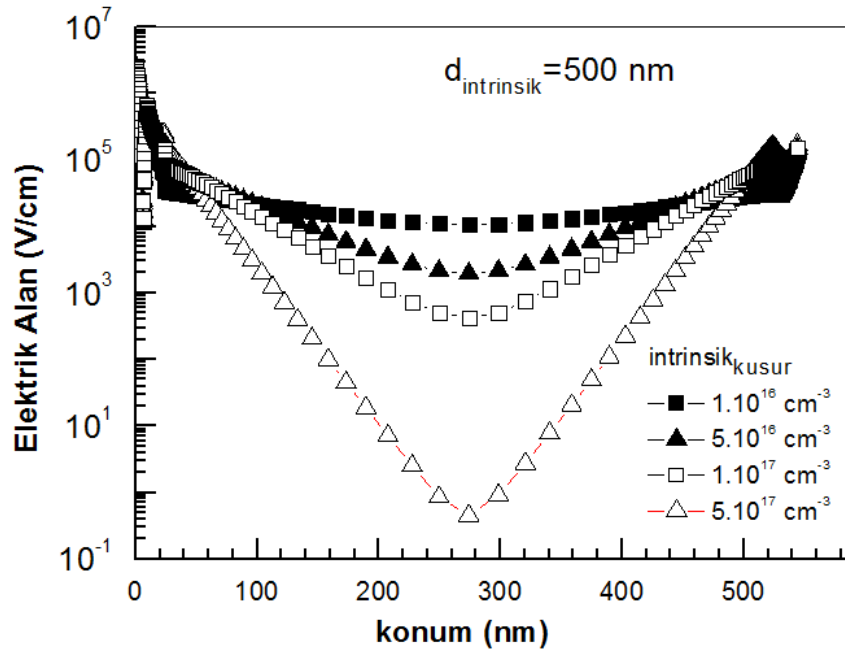
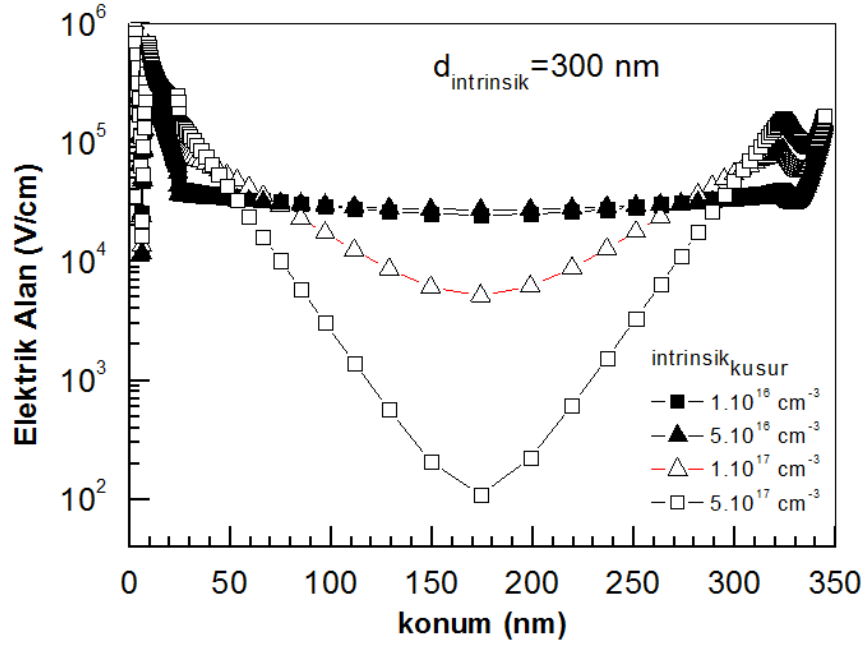
Modelleme sonucu elde edilen verilerden, dolun çarpanındaki değişim de incelenmiş ve **Şekil 4.21**'de görüleceği gibi, hem intrinsik tabaka kalınlığı hem de kusur yoğunluğu artışına bağlı olarak göze dolun çarpanı düşmektedir. Kusur yoğunluğunun $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve üzerinde olduğu durumda, tabaka kalınlığının artmasıyla birlikte dolun çarpanının belirgin bir biçimde azaldığı görülmüş, $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olduğu durumda ise keskin bir düşüş meydana gelmiştir. Işık eşlikli bozulma mekanizmasında, intrinsik tabakanın kalınlık seçimi önemli olduğundan, elektrik alan ve yeniden birleşme oranı grafikleriyle bu durum ayrıntılı araştırılmıştır.



$d_{\text{ptabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $p_{\text{kusur}}: 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

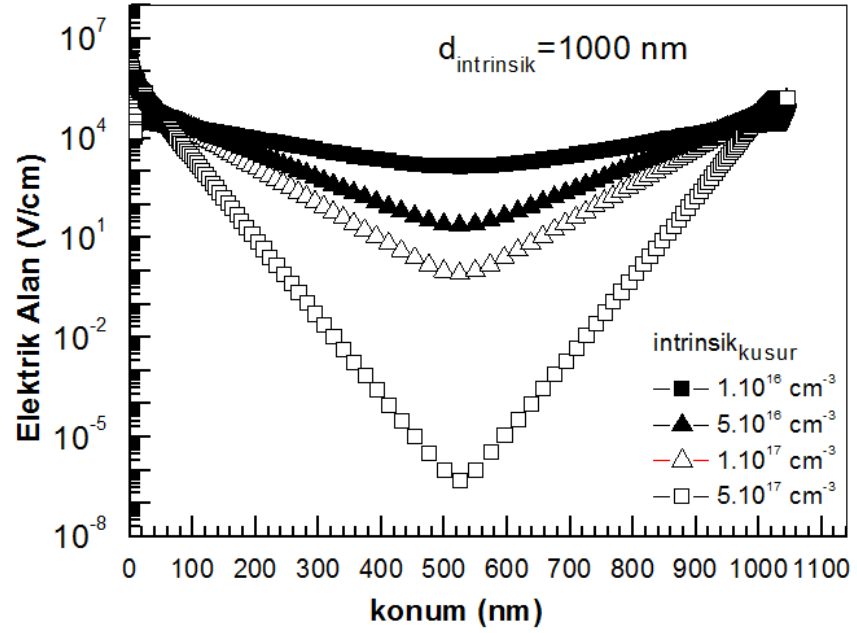
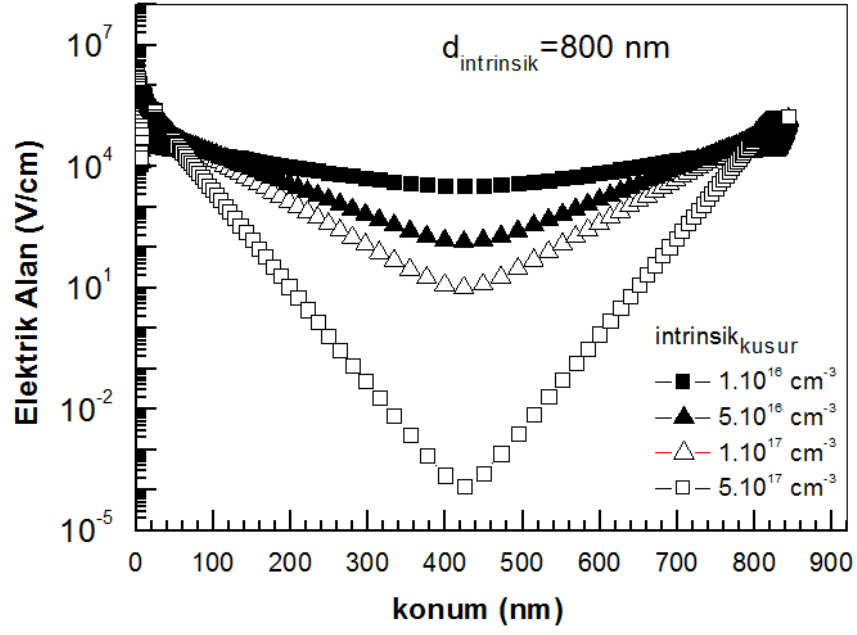
Şekil 4.21 İ tabaka kalınlık ve kusur yoğunluğu değişimi için dolum çarpanı

Intrinsik tabaka kusur yoğunluğu değişiminin, elektrik alan üzerindeki etkisinin konuma bağlı değişimi, 300 nm, 500 nm, kalınlığındaki örnekler için **Şekil 4.22** ve 800 nm ve 1000 nm kalınlığındaki örnekler için **Şekil 4.23**'te verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi, p⁺/i arayüzü ve i-n arayüzünde elektrik alan yüksek iken, intrinsik tabakanın kusur yoğunluğuna bağlı olarak bulk kısımda düşüş olmakta, kusur yoğunluğunun $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'ün üzerinde olduğu durumda ise bu düşüş keskin olarak gözlenmektedir.



$d_{\text{tabaka}}: 9 \text{ nm}, d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}, p_{\text{kusur}}: 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, \text{DTT}_{\text{kusur}}: 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.22 300 ve 500 nm kalınlığındaki intrinsik tabakalarda, termodinamik dengede elektrik alanın konum ile değişimi

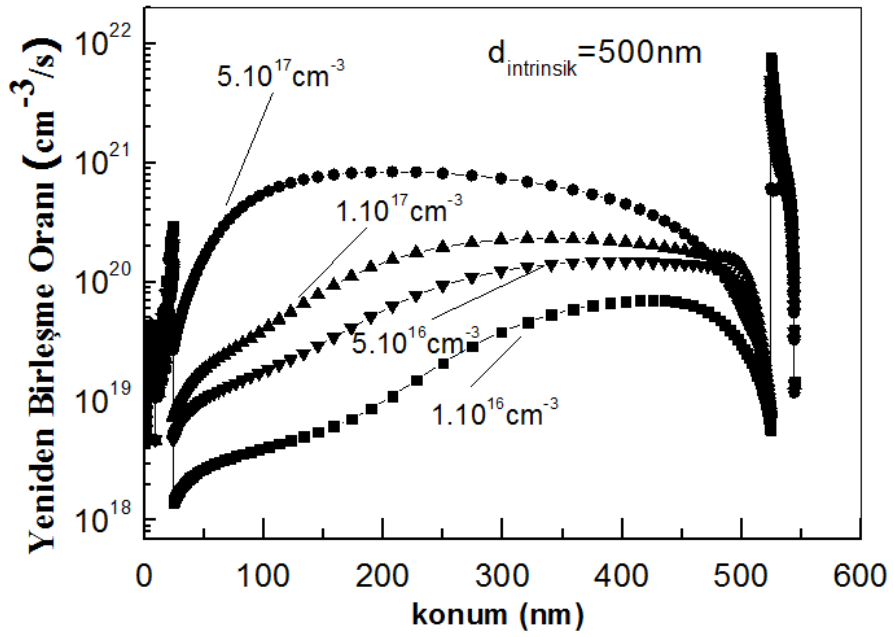
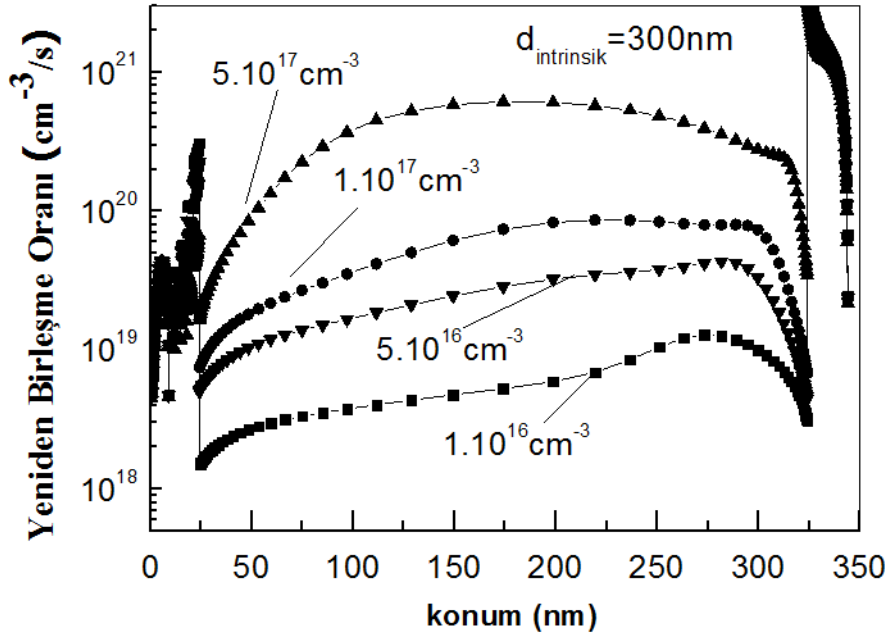


$d_{\text{tabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $\rho_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.23 800 nm – 1000 nm kalınlığındaki intrinsik tabakalarda, termodinamik dengede elektrik alanın konum ile değişimi

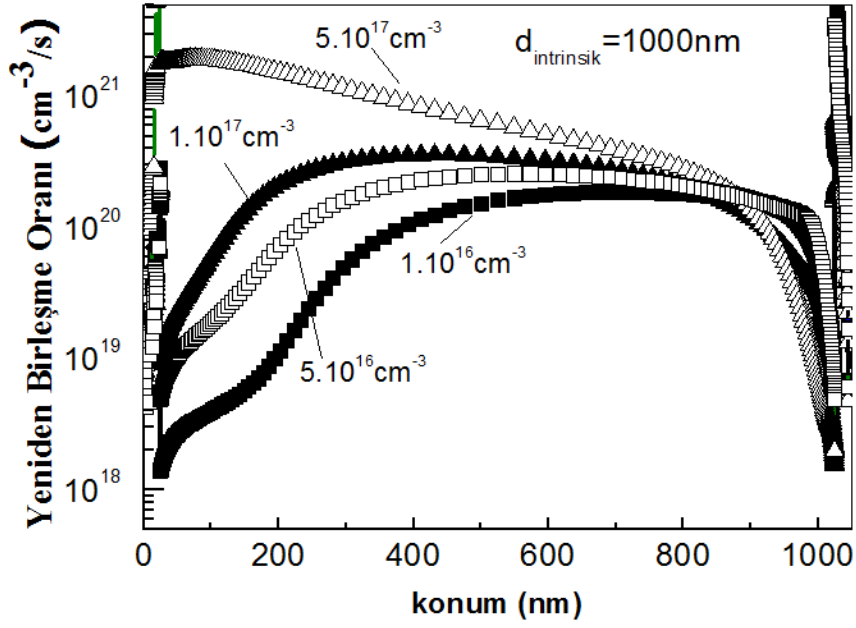
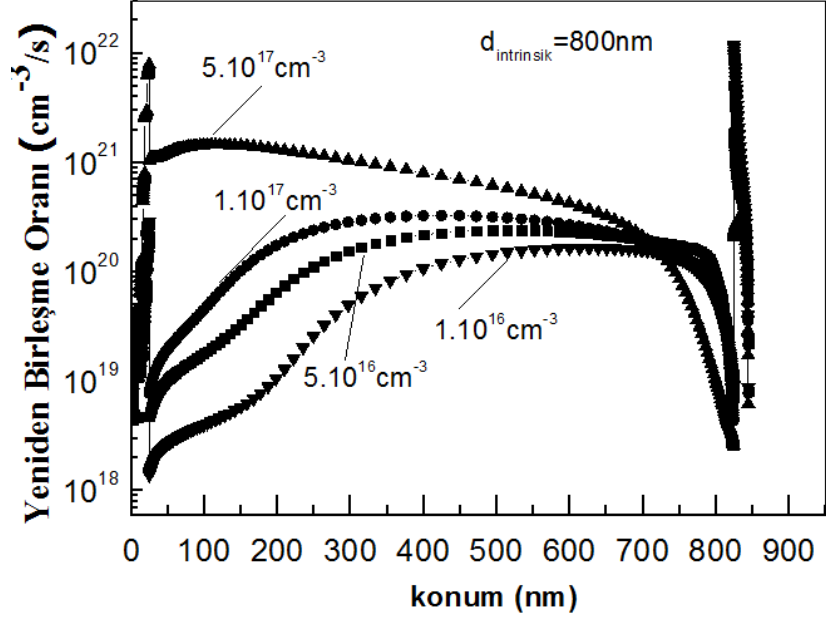
İntrinsik tabaka kalınlığı, 300 nm, 500 nm, 800 nm ve 1000 nm'lik gözeler için yeniden birleşme oranları incelendiğinde (**Şekil 4.24** ve **Şekil 4.25**), elektrik alan değişiminde gözlemlendiği gibi, kusur yoğunluğunun $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'ün üzerine çıktığı

durumda yeniden birleşmeler keskin bir biçimde artmakta, kusurların yeniden birleşme merkezi olarak görev yaptığı görülmektedir.



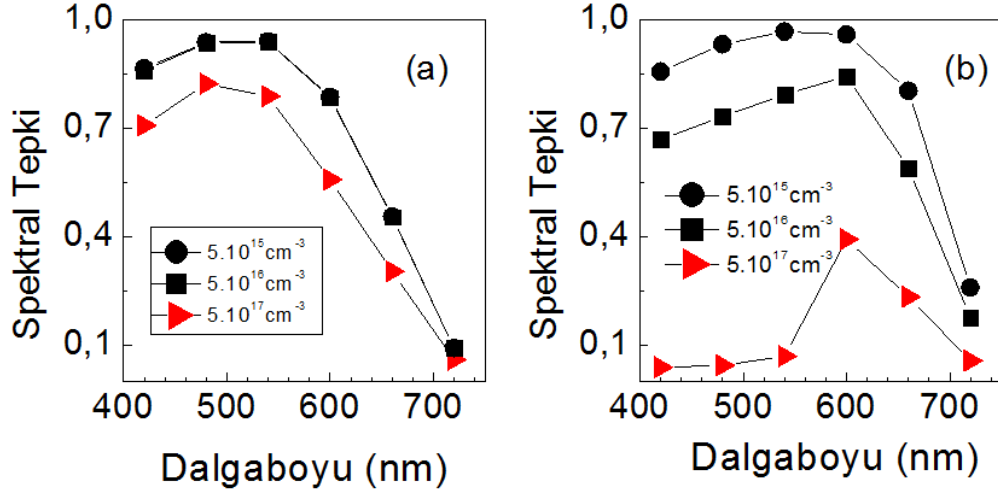
$d_{\text{tabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $p_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.24 300 nm ve 500 nm kalınlığındaki intrinsik tabakalar için yeniden birleşmelerin konuma göre değişimi



$d_{\text{tabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $p_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.25 800 nm ve 1000 nm kalınlığındaki intrinsik tabakalar için yeniden birleşmelerin konuma göre değişimi



$d_{\text{tabaka}}: 9 \text{ nm}$, $d_{\text{DTT}}: 15 \text{ nm}$, $p_{\text{kusur}}: 3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{DTT}_{\text{kusur}}: 3.10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 4.26 a) 300 nm b) 1000 nm kalınlığında intrinsik tabakalar için kusur yoğunluğuna bağlı spektral tepki değişimi

Işık eşikli bozulma kinetiğini anlamak amacıyla intrinsik tabaka kusur yoğunluğu değiştirilerek, modellemelerde kullanılan en ince (300 nm) ve en kalın (1000 nm) iki tabaka için spektral tepki incelenmiştir.

Şekil 4.26'dan da görüldüğü gibi, kalınlık artışı ile birlikte, kusur yoğunluğunun yüksek olduğu durumda mavi bölge tepkisinde keskin düşüşler gözlenmektedir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Literatür taraması ve yapılan modellemelerden de görülmüştür ki, pin yapılı güneş gözelerinin verimliliğini etkileyen birçok parametre yer almaktadır. Deneysel olarak elde edilmesi mümkün olmayan sonuçları elde etmede, hem zaman hem de maliyet açısından büyük avantaj sağlayan modelleme, bu parametrelerin tespitinde ve iyileştirilmesinde iyi bir araçtır.

Hidrojenlendirilmiş amorf silikon güneş gözelerinin (a-Si:H) performansı, gözede kullanılan katmanların özelliklerine bağlı olduğundan, uygun maliyetli, kararlı ve verimli a-Si:H güneş gözesini tasarlamak için göze için en uygun yapıyı belirlemek, her katmanın özelliklerini ve işlevlerini anlamak önemlidir. Bu tez kapsamında yapılan modelleme çalışmalarında, göze üzerinde kritik etkisi olan, tabaka kalınlıkları, kusur yoğunlukları ve katkılama yoğunlukları gibi faktörler üzerinde durulmuş ve optimum değerlerinin elde edilmesi üzerinde çalışılmıştır.

Taşıyıcıların yeniden birleşmesi, kısa devre akımı yoğunluğunu düşürmekte ve açık devre gerilimini azalttığından, göze performansını optimize etmek için, taşıyıcıların hangi düzenlenimde, hangi koşullarda, nerede ve ne oranda yeniden birleştiklerini çok iyi anlamak gerekir. Bu nedenle de güneş göze parametreleri ve yeniden birleşme mekanizması arasında ilişki kurmak ve bunu modelleme ile gerçekleştirmek, göze performansı artırma çalışmaları için yol gösterici olmaktadır.

Bu çalışmada ENEA araştırma merkezinde hazırlanan, p-katkılı a-SiC:H/saf (intrinsik) a-Si:H/n katkılı a-Si:H, tek eklemli güneş gözelerinde, katmanlardaki malzeme özellikleri geliştirilerek en iyi performansın elde edileceği yapılara ulaşmak için AMPS-1D kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Literatür ile uyum içinde olan ve laboratuvarında çalışılmış gerçek örneklerin koşullarında yapılmış modelleme sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Yayıcı tabaka olan p türü katkılı a-SiC:H tabakanın kalınlığının artmasıyla, gelen güneş ışınımının bu tabaka içinde soğrulması artmakta ve bunun sonucu olarak da kısa devre akım yoğunluğu azalmakta, mavi bölgede spektral tepki azalmaktadır. Aktif soğurucu intrinsik a-Si:H tabakadaki soğurma en fazla ve p-katkılı a-SiC:H yayıcı tabakadaki soğurma en az yapılarak güneş gözesinin performansı artırılabilir.

- Pin yapıda hazırlanan a-Si:H güneş gözelerinde, p-katkılı tabakanın elektriksel olarak ölü tabaka olması, bu tabakadan akım üretilmemesi, yalnızca yapısal elektrik alan yaratma görevinin olması istenir. Bu nedenle de p katkılı tabakanın geniş bant aralıklı, aşırı katkılı, gelen güneş ışınımını en az soğuracak kadar ince, intrinsik tabaka boyunca yeterli elektrik alan yaratacak kadar kalın olması gerekir.
- Açık devre geriliminin, V_{ad} , p⁺/i arayüzeyindeki yeniden birleşmeye, kusur yoğunluğuna, bu arayüzeyin yerleşimine bağlı olduğu görülmüştür.
- p-tabaka kalınlığının artmasıyla verimdeki azalma, bu tabakada gerçekleşen soğrulma nedeniyle aktif soğurucu i-tabakaya gelen foton sayısındaki azalma nedeniyle, beklenen sonuçtur.
- Dolum çarpanındaki düşme, soğurucu tabakadaki yüksek yeniden birleşme oranıdır.
- Kuantum verimi diğer bir deyişle spektral tepkinin, gözenin soğurma katsayısına, yüklerin ayrılma verimine, yüklerin toplanma verimine bağlı olduğu gözlenmiştir.
- a-Si:H gözede, p-katkılı katmanda taşıyıcı toplanmasındaki zayıflığa bağlı olarak mavi ışığa yanıt zayıftır. Geniş bant aralıklı tabaka kullanımı ile bu sorun çözülebilir.
- İntrinsik tabaka kusur yoğunluğu artırılarak oluşturulan ışık eşlikli bozulma kinetiği incelendiğinde, bu etkinin kalınlığa bağlı olduğu ve ince örneklerde daha az ışık eşlikli bozulmalar olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, maliyeti ucuz, verimi yüksek gözeler elde edilmesi hedeflendiğinden;

- Yüksek kısa devre akım yoğunluğu (J_{ad}), elde etmek için kusur yoğunluğu düşük, iyi kaliteli malzeme kullanılması ve gelen fotonların çoğunun aktif soğurucu tabakada soğurulacak şekilde en uygun göze tasarımının yapılması gereklidir.
- Açık devre geriliminde (V_{ad}) yüksek değerleri elde edilmesi için, aşırı katkılı, geniş bant aralıklı p-tabaka ve kaliteli arayüzeyler kullanılmalıdır.

- Yüksek dolum çarpanı değerlerine ulaşmak için, intrinsik tabaka ve arayüzeyde yaratılan taşıyıcılarda en az oranda kayıp, intrinsik tabakada kuvvetli elektrik alan ve iyi ohmik kontakların olması gerekir.
- Verimliliği en üst düzeye çıkarmak için elektron deşik çiftlerin üretimini en üst düzeye çıkarmak ve yüklü taşıyıcı yeniden birleşmesini en aza indirmek gerekir.

Bu çalışmalar göstermektedir ki, amorf yapı içerisindeki belirsizlikler ve güneş gözesi verimini etkileyen parametrelerin çokluğu nedeniyle, gerek optimizasyon gerekse deneysel çalışmalarda bu konu güncelliğini korumaya devam edecektir.

Son yıllarda literatürde yaygın olarak çalışılmış olan, p⁺/i arayüzeyine tampon tabaka eklenmesi konusunda yapılan çalışmalarda, bu konunun henüz araştırmaya açık olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, tampon tabaka malzemesi, tampon tabakanın katkılanması, tampon tabaka sayısı, kalınlığı, bant aralığı bant ofsetler, bant uzantı durumları ve yakalama etkin kesitleri gibi birçok parametre göz önüne alınarak, ucuz maliyetli, yüksek verimli göze elde edebilmek için daha ayrıntılı çalışmalara gereksinim vardır.

KAYNAKLAR

- [1] S. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley Interscience, **1969**.
- [2] M. Schropp, R., Zeman, *Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells*. **1998**.
- [3] S. Guha, J. Yang, and A. Banerjee, "Amorphous silicon alloy photovoltaic research - present and future," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 8, no. 1, pp. 141–150, **2000**.
- [4] N. Raval and A. K. Gupta, "Historic Developments , Current Technologies and Potential of Nanotechnology to Develop Next Generation Solar Cells with Improved Efficiency," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 4, no. 2, pp. 77–93, **2015**.
- [5] Street R.A, "Technology and Application of Amorphous silicon," *Springer-Verlag, Berlin*, no. 0, p. 6221, **2000**.
- [6] F. Sculati-Meillaud, *Microcrystalline Silicon Solar Cells: Theory, Diagnosis and Stability*, Doktora Tezi, Neuchatel Üniversitesi, İsviçre, **2006**.
- [7] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power," *J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 5, pp. 676–677, May **1954**.
- [8] T. Saga, "Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production," *NPG Asia Mater.*, vol. 2, no. July, pp. 96–102, **2010**.
- [9] G. Young, S. Hyun, J. Shik, S. Hong, A. Kim, and K. Joong, "Solar Energy Materials & Solar Cells Band engineering of a Si quantum dot solar cell by modification of B-doping profile," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 159, pp. 80–85, **2017**.
- [10] D. Shi, Y. Zeng, and W. Shen, "Perovskite/c-Si tandem solar cell with inverted nanopramids: realizing high efficiency by controllable light trapping," *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 16504, Nov. **2015**.
- [11] S. Singh, S. Kumar, and N. Dwivedi, "Band gap optimization of p-i-n layers of a-Si:H by computer aided simulation for development of efficient solar cell," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 1470–1476, **2012**.
- [12] B. Rech and H. Wagner, "Potential of amorphous silicon for solar cells," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 69, no. 2, pp. 155–167, **1999**.
- [13] Y. Hamakawa, "Recent advances in amorphous and microcrystalline silicon basis devices for optoelectronic applications," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 142, no. 1, pp. 215–226, **1999**.

- [14] H. N. Wanka, M. B. Schubert, and E. Lotter, "Growth of a-Si:H on transparent conductive oxides for solar cell applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 41–42, pp. 519–527, **1996**.
- [15] J. Park, V. Ai, C. Shin, H. Park, M. Kim, J. Jung, D. Kim, and J. Yi, "A buffer-layer / a-SiO_x: H (p) window-layer optimization for thin film amorphous silicon based solar cells," *Thin Solid Films*, vol. 546, pp. 331–336, **2013**.
- [16] A. V. Shah, M. Vaněček, J. Meier, F. Meillaud, J. Guillet, D. Fischer, C. Droz, X. Niquille, S. Faÿ, E. Vallat-Sauvain, V. Terrazzoni-Daudrix, and J. Bailat, "Basic efficiency limits, recent experimental results and novel light-trapping schemes in a-Si:H, μ c-Si:H and 'micromorph tandem' solar cells," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 338–340, no. 1 SPEC. ISS., pp. 639–645, **2004**.
- [17] a V Shah, H. Schade, M. Vanecek, J. Meier, E. Vallat-Sauvain, N. Wyrsh, U. Kroll, C. Droz, and J. Bailat, "Thin-film silicon solar cell technology," *Prog. Photovoltaics*, vol. 12, no. 2–3, pp. 113–142, **2004**.
- [18] M. Stuckelberger, R. Biron, N. Wyrsh, F. Haug, and C. Ballif, "Review : Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. November 2016, pp. 1497–1523, **2017**.
- [19] W. E. Spear and P. G. Le Comber, "Electronic properties of substitutionally doped amorphous Si and Ge," *Philos. Mag.*, vol. 33, no. 6, **1976**.
- [20] D. E. Carlson and C. R. Wronski, "Amorphous silicon solar cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 28, no. 11, pp. 671–673, Jun. **1976**.
- [21] J. Carabe and J. J. Gandia, "Thin-film-silicon solar cells," *Opto-Electronics Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–6, **2004**.
- [22] A. Matsuda, "Formation kinetics and control of microcrystallite in μ c-Si:H from glow discharge plasma," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 59–60, Part 2, pp. 767–774, Dec. **1983**.
- [23] Y. Hattori, D. Kruangam, T. Toyama, H. Okamoto, and Y. Hamakawa, "Highly conductive p-type microcrystalline SiC:H prepared by ECR plasma CVD," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 33, pp. 1276–1284, **1988**.
- [24] X. Xu, J. Yang, and S. Guha, "Hydrogen dilution effects on a-Si: H and a-SiGe: H materials properties and solar cell performance," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 198, pp. 60–64, **1996**.
- [25] C. Longeaud, J. . Kleider, P. Roca i Cabarrocas, S. Hamma, R. Meaudre, and M. Meaudre, "Properties of a new a-Si:H-like material: hydrogenated polymorphous silicon," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 227–230, pp. 96–99, **1998**.
- [26] S. Tchakarov, D. Das, O. Saadane, a. V. Kharchenko, V. Suendo, F. Kail, and P. Roca i Cabarrocas, "Helium versus hydrogen dilution in the optimization of

- polymorphous silicon solar cells," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 338–340, no. 1 SPEC. ISS., pp. 668–672, **2004**.
- [27] N. Souffi, M. Daouahi, L. Chahed, K. Zellama, and P. Roca I Cabarrocas, "Effect of light soaking and annealing on the stability of hydrogenated amorphous silicon films deposited using pure and highly helium diluted silane," *Solid State Commun.*, vol. 122, no. 5, pp. 259–264, **2002**.
- [28] M. Ito, S. Shimizu, M. Kondo, and a. Matsuda, "Light-soaking stability of silicon thin film solar cells using alternately hydrogenated dilution method," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 338–340, no. 1 SPEC. ISS., pp. 698–701, **2004**.
- [29] R. Gottschalg, T. R. Betts, D. G. Infield, and M. J. Kearney, "The effect of spectral variations on the performance parameters of single and double junction amorphous silicon solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 85, no. 3, pp. 415–428, **2005**.
- [30] M. Zeman, J. a. Willemen, L. L. a. Vosteen, G. Tao, and J. W. Metselaar, "Computer modelling of current matching in a-Si : H/a-Si : H tandem solar cells on textured TCO substrates," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 46, no. 2, pp. 81–99, **1997**.
- [31] M. V. and J. K. and K. B. and F. S. and M. Topic, "Modelling and simulation of optoelectronic devices with ASPIN," *IEEE Reg. 8 EUROCON 2003. Comput. as a Tool*, vol. 1, pp. 474–477 vol.1, **2003**.
- [32] M. Burgelman, K. Decock, S. Khelifi, and A. Abass, "Advanced electrical simulation of thin film solar cells," *Thin Solid Films*, vol. 535, no. 1, pp. 296–301, **2013**.
- [33] M. Zeman, O. Isabella, S. Solntsev, and K. Jäger, "Solar Energy Materials & Solar Cells Modelling of thin- fi lm silicon solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 119, pp. 94–111, **2013**.
- [34] E. Klimovsky, J. K. Rath, R. E. . Schropp, and F. . Rubinelli, "Modeling a-Si:H p-i-n solar cells with the defect pool model," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 338–340, pp. 686–689, **2004**.
- [35] M. Burgelman, P. Nollet, and S. Degrave, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells," *Thin Solid Films*, vol. 361, pp. 527–532, **2000**.
- [36] A. Belfar and H. Ait-Kaci, "Numerical simulation of barrier height effect on output parameters , for a a-Si:H/nc-Si:H based solar cell," in *EPJ Web Conferences 44*, vol. 03005, **2013**.
- [37] S. Tripathi, "AMPS-1D simulation studies of electronic transport in n -," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 352, no. 9–20, pp. 1105–1108, **2006**.

- [38] S. Singh, S. Kumar, and N. Dwivedi, "Band gap optimization of p – i – n layers of a-Si : H by computer aided simulation for development of efficient solar cell," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 1470–1476, **2012**.
- [39] A. Fantoni, M. Vieira, and R. Martins, "Simulation of hydrogenated amorphous and microcrystalline silicon optoelectronic devices," *Math. Comput. Simul.*, vol. 49, no. 4–5, pp. 381–401, **1999**.
- [40] M. Zeman and J. Krc, "Electrical and Optical Modelling of Thin-Film Silicon Solar Cells," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 989*, vol. 989, **2007**.
- [41] W. K. Metzger and M. Gloeckler, "The impact of charged grain boundaries on thin-film solar cells and characterization," *J. Appl. Phys.*, vol. 98, no. 6, p. 35301, **2005**.
- [42] S. Sharbati and J. R. Sites, "Impact of the band offset for n-Zn(O,S)/p-Cu(In,Ga)Se₂ solar cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 2, pp. 697–702, **2014**.
- [43] "<http://www.pveducation.org/pvcdrom/quantum-efficiency>" (Eylül, **2017**) .
- [44] R. De Rose, P. Magnone, M. Zanucoli, E. Sangiorgi, and C. Fiegna, "Loss analysis of silicon solar cells by means of numerical device simulation," *2013 14th International Conference on Ultimate Integration on Silicon (ULIS)*. pp. 205–208, **2013**.
- [45] A. Eray and G. Nobile, "The Optimization of A-Si : H PIN Solar Cells: More Insight From Simulation," in *Recent Developments in Solar Energy Research*, Nova Science Publishers, pp. 313–334, **2007**.
- [46] S. Fonash, *Solar Cells Device Physics*, **2010**.
- [47] Y.-M. Li, F. Jackson, L. Yang, B. F. Fieselmann, and L. Russell, "An Exploratory Survey of p-Layers for a-Si:H Solar Cells," *MRS Proc.*, vol. 336, **1994**.
- [48] M. Kondo and a. Matsuda, "Novel aspects in thin film silicon solar cells- amorphous, microcrystalline and nanocrystalline silicon," *Thin Solid Films*, vol. 457, no. 1, pp. 97–102, **2004**.
- [49] B. Samanta, D. Das, and a. K. Barua, "Role of buffer layer at the p/i interface on the stabilized efficiency of a-Si solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 46, no. 3, pp. 233–237, **1997**.
- [50] J. Kim, A. I. Abou-kandil, A. J. Hong, M. M. Saad, D. K. Sadana, and T. Chen, "Efficiency enhancement of a-Si:H single junction solar cells by a-Ge:H incorporation at the p 1 a-SiC:H/transparent conducting oxide interface," *Appl. Phys. Lett.* 99, vol. 062102, pp. 3–6, **2011**.

- [51] M. I. Kabir, Z. Ibarahim, M. Alghoul, K. Sopian, M. R. Karim, and N. Amin, "Bandgap optimization of absorber layers in amorphous silicon single and multijunction junction solar cells," *Chalcogenide Lett.*, vol. 9, no. 1, pp. 51–59, **2012**.
- [52] Y. Tawada, H. Okamoto, and Y. Hamakawa, "a-SiC:H/a-Si:H heterojunction solar cell having more than 7.1% conversion efficiency," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39, no. 3, pp. 237–239, Aug. **1981**.
- [53] Y. Ashida, "Single-junction a-Si solar cells with over 13% efficiency," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 34, no. 1, pp. 291–302, **1994**.
- [54] B. Rech, C. Beneking, and H. Wagner, "Improvement in stabilized efficiency of a-Si:H solar cells through optimized p/i-interface layers," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 41–42, pp. 475–483, **1996**.
- [55] N. Wyrsh and a. Shah, "Degradation of a-Si:H solar cells: new evidence for a bulk effect," *Proc. 1994 IEEE 1st World Conf. Photovolt. Energy Convers. - WCPEC (A Jt. Conf. PVSC, PVSEC PSEC)*, vol. 1, pp. 583–586, **1994**.
- [56] H. Zhu and S. J. Fonash, "Study of buffer layer design in single junction solar cells," *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1996*. pp. 1097–1100, **1996**.
- [57] D. Phong, S. Kim, J. Park, J. Cho, H. Kim, A. Huy, T. Le, and J. Yi, "Optik Role of a-Si : H buffer layer at the p / i interface and band gap profiling of the absorption layer on enhancing cell parameters in hydrogenated amorphous silicon germanium solar cells," *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 136, pp. 507–512, **2017**.
- [58] J. A. Rodriguez, P. Otero, M. Fortes, and E. Comesa, "Optik Collection length and optical path improvement in a-Si : H solar cells," vol. 140, pp. 370–380, **2017**.
- [59] H. Takakura and Y. Hamakawa, "Device simulation and modeling of microcrystalline silicon solar cells," *Sol. Energy Mater.*, vol. 74, pp. 479–487, **2002**.
- [60] S. Honda, T. Yamazaki, M. Tsurukawa, H. Takakura, and Y. Hamakawa, "Wide band gap buffer effect for amorphous silicon solar cell analyzed by BASREA measurement," *3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proc.*, vol. 2, pp. 1729–1732, **2003**.
- [61] D. Qingwen, W. Xiaoliang, X. Hongling, M. Zeyu, Z. Xiaobin, H. Qifeng, L. Jinmin, and W. Zhanguo, "Theoretical investigation of efficiency of a p-a-SiC:H/i-a-Si:H/n- μ c-Si solar cell," *J. Semicond.*, vol. 31, no. 10, p. 103003, **2010**.
- [62] M. I. Kabir, Z. Ibrahim, K. Sopian, and N. Amin, "Solar Energy Materials & Solar Cells Effect of structural variations in amorphous silicon based single

and multi-junction solar cells from numerical analysis,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 9, pp. 1542–1545, **2010**.

- [63] L. Raniero, N. Martins, P. Canhola, S. Zhang, S. Pereira, I. Ferreira, E. Fortunato, and R. Martins, “Influence of the layer thickness and hydrogen dilution on electrical properties of large area amorphous silicon p-i-n solar cell,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 87, no. 1–4, pp. 349–355, **2005**.
- [64] G. Munyeme, M. Z. R. E. I. Schropp, and W. F. Van Der Weg, “Performance analysis of a-Si:H p-i-n solar cells with and without a buffer layer at the p/i interface,” *Phys. Status Solidi*, vol. c(1), no. 9, pp. 2298–2303, **2004**.
- [65] W. F. M. Ã and A. M. Mustafa, “The influence of defects on short circuit current density in p-i-n silicon solar cell,” *Renew. Energy*, vol. 30, pp. 187–193, **2005**.
- [66] <http://www.ampsmodeling.org> (Eylül, **2017**).
- [67] G. Nobile and M. Morana, “Light Soaking Effect in a-Si:H based n-i-p and p-i-n Solar Cells,” *Sol. Energy Mater. & Solar Cells*, pp. 265–266, **2003**.
- [68] B. Vet and M. Zeman, “Energy Procedia Comparison of a-SiC : H and a-SiN : H as candidate materials for a p-i interface layer in a-Si : H p-i-n solar cells,” *Energy Procedia*, vol. 2, no. 1, pp. 227–234, **2010**.
- [69] T. Ocağ and A. Eray, “Simulation of a-Si:H p-i-n Solar Cell Using AMPS-1D,” in *Solar Conference & Exhibition, Solar TR2016*, **2016**.
- [70] M. Isomura, T. Takahama, S. Tsuda, and S. Nakano, “Dependence of Open Circuit Voltage of Amorphous Silicon Solar Cells on Thickness and Doping Level of the p-Layer,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32, pp. 1902–1907, **1993**.
- [71] P. Jelodarian and A. Kosarian, “Effect of p-Layer and i-Layer Properties on the Electrical Behaviour of Advanced a-Si : H / a-SiGe : H Thin Film Solar Cell from Numerical Modeling Prospect,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2012, pp. 1–8, **2012**.

EK-1 DOPING-FREE SILICON THIN FILM SOLAR CELLS USING A VANADIUM PENTOXIDE WINDOW LAYER AND A-LiF/Al BACK ELECTRODE

APPLIED PHYSICS LETTERS 103, 073903 (2013)



Doping-free silicon thin film solar cells using a vanadium pentoxide window layer and a LiF/Al back electrode

Hyung Hwan Jung,^{1,2} Jung-Dae Kwon,¹ Sunghun Lee,¹ Chang Su Kim,¹ Kee-Seok Nam,¹ Yongsoo Jeong,¹ Kwun-Bum Chung,² Seung Yoon Ryu,³ Tülay Ocak,⁴ Aynur Eray,⁵ Dong-Ho Kim,^{1,a)} and Sung-Gyu Park^{1,b)}

¹Advanced Functional Thin Films Department, Korea Institute of Materials Science, Changwon 641-831, South Korea

²Department of Physics, Dankook University, San 29 Anseo-Dong, Cheonan 330-714, South Korea

³Department of Information Display, Sunmoon University, Asan 336-708, South Korea

⁴Nanotechnology and Nanomedicine Division, Hacettepe University, Beytepe, Ankara 06800, Turkey

⁵Department of Physics Engineering, Hacettepe University, Beytepe, Ankara 06800, Turkey

(Received 5 February 2013; accepted 27 July 2013; published online 16 August 2013)

This work describes the preparation of a doped layer-free hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) thin film solar cell consisting of a vanadium pentoxide (V_2O_{5-x}) window layer, an intrinsic a-Si:H absorber layer, and a lithium fluoride (LiF)/aluminum (Al) back electrode. The large difference between the work functions of the V_2O_{5-x} layer and the LiF/Al electrode permitted photogenerated carriers in the i-a-Si:H absorber layer to be effectively separated and collected. The effects of the V_2O_{5-x} layer thickness and the oxidation states on the photovoltaic performance were investigated in detail. X-ray photoelectron spectroscopy analysis confirmed that the major species of the sputtered V_2O_{5-x} thin films were V^{5+} and V^{4+} . Optimization of the V_2O_{5-x} window layer yielded a power conversion efficiency of 7.04%, which was comparable to the power conversion efficiency of a typical a-Si:H solar cell (7.09%). © 2013 AIP Publishing LLC.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4818714>

Conventional a-Si:H solar cells typically have a p-type doped layer/intrinsic absorber layer/n-type doped layer configuration, in which photogenerated holes and electrons in the i-a-Si:H cell are effectively collected in the p-doped and n-doped layers, respectively.¹⁻⁵ The p-doped and n-doped layers are formed by introducing hazardous doping gases, such as diborane (B_2H_6) and phosphine (PH_3), which require cluster-type bulky deposition systems. The use of these toxic gases poses operational and environmental issues and can increase production costs. Additionally, doping has a detrimental effect on the quality of the i-a-Si:H layers because it leads to the creation of several additional Si dangling bonds that decrease the stabilized solar cell efficiency. These drawbacks of conventional a-Si:H thin film solar cells may be overcome by using a thermally evaporated molybdenum oxide window layer film in an a-Si:H solar cell (FTO/MoO₃/i-a-Si:H/n-a-Si:H/Al).⁶ Such layers yield a power conversion efficiency (PCE) of 6.21%. a-Si:H rear Schottky junction solar cells with LiF/Al back electrodes (FTO/p-a-SiC:H/i-a-Si:H/LiF/Al) may provide alternatives to conventional a-Si:H solar cells.⁷ This paper describes the preparation of a doping-free a-Si:H solar cell design consisting of a V_2O_{5-x} window layer, an i-a-Si:H absorber layer, and a LiF/Al back electrode.

Vanadium pentoxide (V_2O_5) displays promising properties as a window layer, including a high optical band gap of 2.8 eV, a high work function of 6.85 eV, and good electrical properties.⁸⁻¹³ Accordingly, it has been widely used as a hole-selective layer in organic solar cells.⁹⁻¹³ In our a-Si:H

solar cell design, a LiF/Al bilayer was used as a back electrode because it displayed a low work function (2.9 eV),^{14,15} thereby forming a Schottky junction between the i-a-Si:H and back electrode layers.⁷ LiF reduced the work function of Al when LiF was coupled to Al due to the large dipole moment of LiF.¹⁶ Therefore, a high internal electric field between the V_2O_{5-x} layer and the LiF/Al electrode formed, leading to effective charge separation in the i-a-Si:H. Optimizing the V_2O_{5-x} window layer produced a PCE of 7.04% with a short circuit current density (J_{sc}) of 14.17 mA/cm², an open circuit voltage (V_{oc}) of 0.80 V, and a fill factor (FF) of 0.62.

V_2O_{5-x} thin films were deposited on fluorine-doped tin oxide (FTO, SnO₂:F) glass substrates using RF magnetron sputtering with a V_2O_5 target (2 in. diameter, 99.95% purity). Sputtering was carried out in an Ar and O₂ gas mixture with a base pressure of 2×10^{-6} Torr and a working pressure of 5×10^{-3} Torr. The O₂ gas flow rate ranged from 0 to 0.5 sccm whereas the total flow rate was maintained at 50.0 sccm. The separation distance between the sputtering target and the substrate was 5 cm, and the RF power was maintained at 50 W during sputtering.¹⁷ A 500 nm thick i-a-Si:H absorber layer was deposited onto a V_2O_{5-x} coated FTO glass using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD). A 1.5 nm thick LiF layer and a 100 nm thick Al layer were thermally evaporated using a shadow mask to define a cell active area of 0.25 cm². The optimal LiF layer thickness is 1.5 nm, according to the literature;⁷ therefore, we did not investigate the effects of the LiF layer thickness on the photovoltaic performance in this work. The current density versus voltage (J - V) characteristics of the solar cell devices were measured under AM 1.5 simulated illumination with an intensity of 100 mW/cm². The external quantum

^{a)}Electronic mail: dhkim2@kims.re.kr

^{b)}Electronic mail: sgpark@kims.re.kr

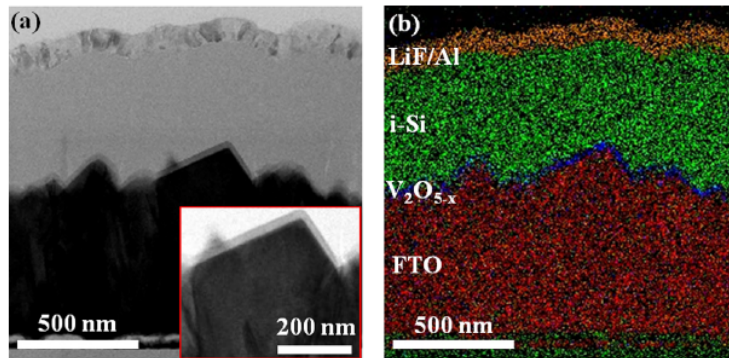


FIG. 1. (a) High-resolution TEM cross-sectional image and (b) EDX-based elemental mapping of a-Si:H solar cells with a V_2O_{5-x} window layer and a LiF/Al back electrode. The inset in (a) shows a magnified image showing the conformal deposition of a 20 nm thick V_2O_{5-x} layer onto the textured FTO substrate.

efficiency (EQE) was obtained by using a 200 W Xe lamp and a grating monochromator, and the light intensity was measured using a calibrated Si solar cell (PV measurement). The total transmittance spectra were obtained using a UV-vis spectrophotometer. The cross-sectional microstructures of the devices were observed using transmission electron microscopy (TEM), and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) was used to perform elemental analysis in the spherical aberration-corrected scanning transmission electron microscope (Cs-corrected STEM) mode. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) measurements were performed using a VG Microtech ESCA 2000 with an Al K α photon source to analyze the chemical composition of the V_2O_{5-x} surface. Ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS) spectra were recorded using an AXIS-NOVA using a He I (21.22 eV) gas discharge lamp.

Figure 1 shows high-resolution TEM cross-sectional image and an EDX-based elemental mapping of a-Si:H solar cell with a V_2O_{5-x} window layer and a LiF/Al back electrode. A conformal V_2O_{5-x} layer with a thickness of 20 nm was deposited onto the textured FTO substrate. Uniform distributions of the component elements were clearly observed (Fig. 1(b)). No evidence of layer-by-layer mixing or physical damage, which could have occurred during the PECVD and thermal evaporation steps, was observed.

Figure 2 shows the J - V characteristics of our a-Si:H solar cells as a function of V_2O_{5-x} thickness sputtered under Ar ambient. In the device with no window layers (FTO/i-a-Si:H/LiF/Al), reasonable photovoltaic effects were observed with a J_{sc} of 11.93 mA/cm 2 ; however, the V_{oc} and FF were poor, at 0.21 V and 0.35, resulting in a PCE of only 0.87%. The poor photovoltaic performance of the device arose from the absence of a built-in potential in the solar cell. The insertion of a sputtered V_2O_{5-x} window layer between the FTO and i-a-Si:H layers significantly improved the device performance (Fig. 2(b)). The J_{sc} clearly decreased with the thickness of the V_2O_{5-x} layer due to light absorption in the window layer. The device performance improvements, however, were mainly attributed to an increase in V_{oc} with increasing V_2O_{5-x} window layer thickness (Fig. 2(b)). The device with a 20 nm thick V_2O_{5-x} window layer exhibited the highest PCE of 6.32%, with a J_{sc} = 13.54 mA/cm 2 , a V_{oc} = 0.75 V, and an FF = 0.62.

The ambient O_2 concentration during the sputtering step was critical for controlling the stoichiometry of the metal oxide. The metal-rich film can usually form under ambient Ar,

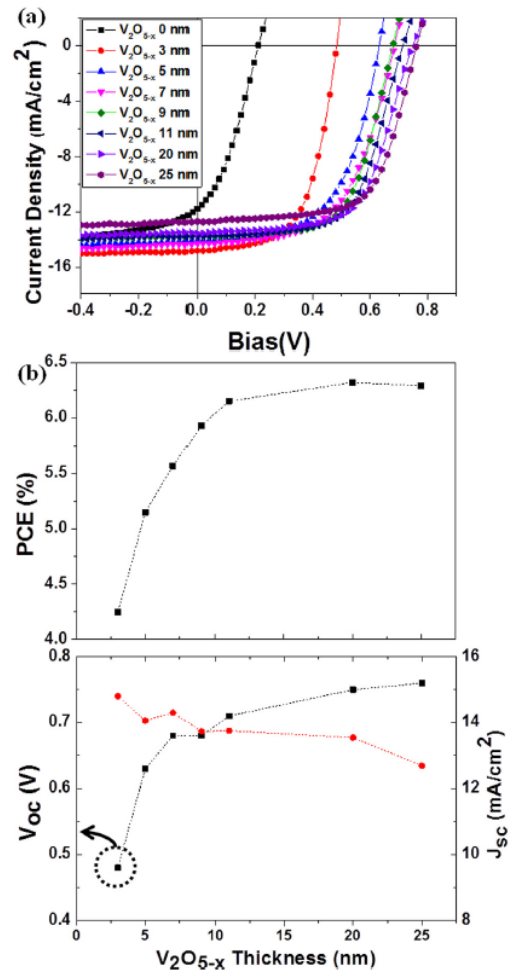


FIG. 2. (a) J - V characteristics of the doped layer-free a-Si:H solar cell with different V_2O_{5-x} layer thickness values. (b) Solar cell output parameters of the a-Si:H solar cell with different V_2O_{5-x} layer thickness values.

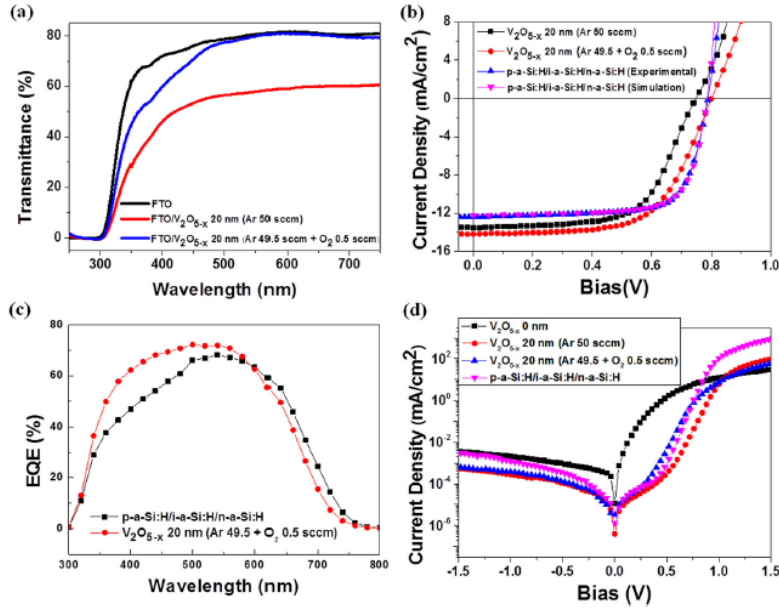


FIG. 3. (a) Total transmittance of the 20 nm thick sputtered V_2O_{5-x} thin films prepared in the presence of different O_2 flow rates. (b) Illuminated J - V characteristics, (c) EQE, and (d) dark J - V characteristics of the doped layer-free a-Si:H solar cell prepared with different O_2 flow rates.

and a stoichiometric film can be obtained upon the addition of O_2 . It should be noted that the films sputtered under 0.5 sccm O_2 and 49.5 sccm Ar appeared as transparent light yellow films, characteristic of vanadium pentoxide,¹⁸ whereas the films exhibited a light grey color when deposited under pure ambient Ar. The visual appearance agreed well with the total transmittance spectra (Fig. 3(a)). The 20 nm thick V_2O_{5-x} film sputtered under 0.5 sccm O_2 and 49.5 sccm Ar provided a much higher transparency, whereas the film sputtered under an Ar atmosphere provided a lower transmittance. The high transmittance of the V_2O_{5-x} window layer increased the J_{sc} for a given window layer thickness (Fig. 3(b) and Table I). In addition to increasing J_{sc} , V_{oc} was also enhanced by adding small amounts of O_2 gas during the V_2O_{5-x} sputtering process. The solar cell with the best performance, that is, the device with a 20 nm V_2O_{5-x} layer sputtered under 0.5 sccm O_2 and 49.5 sccm Ar, exhibited a PCE of 7.04% with a $J_{sc} = 14.17 \text{ mA/cm}^2$, a $V_{oc} = 0.80 \text{ V}$, and a FF = 0.62. The improvement in V_{oc} was mainly attributed to an enhancement in the internal electric field between the V_2O_{5-x} layer and the LiF/Al electrode due to an increase in the work function of the V_2O_{5-x} sputtered in the presence of O_2 , as confirmed by the UPS spectra. The performance of the optimized a-Si:H solar cell was comparable to that of a typical p-i-n a-Si:H solar cell (PCE = 7.09%, $J_{sc} = 12.38 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0.79 \text{ V}$,

and FF = 0.73), where the i-a-Si:H layer was prepared according to the same protocol as was used for preparing doping-free devices.

Analysis of microelectronic and photonic structure device simulation program in one-dimension (wxAMPS-1D) was used for a numerical modeling of 12 nm thick p-a-Si:H/500 nm thick i-a-Si:H/25 nm thick n-a-Si:H configuration.¹⁹ The input parameters for a device modeling was obtained from the literature (Table II).¹⁹ To obtain the best matched simulation results with our experimental data for p-i-n configuration, the reflection ratio has been considered as 0.25 at front contact. Graded buffer layer has been simulated by two undoped a-Si:H layers with equal thickness (2 nm), with variable band gaps ($E_g = 1.75 \text{ eV}$ and 1.72 eV , respectively). The band gap profile and characteristic energy were also decreased gradually from the wide band gap p-a-Si:H layer ($E_g = 1.78 \text{ eV}$) towards the lower band gap of i-a-Si:H layer ($E_g = 1.72 \text{ eV}$) and n-a-Si:H layer ($E_g = 1.72 \text{ eV}$). As seen in Fig. 3(b) and Table II, the best matched simulation results have the PCE of 7.03%, with a $J_{sc} = 12.20 \text{ mA/cm}^2$, a $V_{oc} = 0.79 \text{ V}$, and an FF = 0.73, which correspond very well the experimental one.

Compared to the p-i-n configuration, doping-free a-Si:H solar cell exhibited lower FF (0.62, versus 0.73 for the p-i-n configuration). This is attributed to an increase in the series

TABLE I. Photovoltaic parameters and dark current fitting results for the a-Si:H solar cells with different window layers. For comparison, the device parameters of conventional p-i-n type a-Si:H solar cells are also presented.

	PCE (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	Shunt resistance (k Ω -cm ²)	Series resistance (Ω -cm ²)
FTO/i-Si:H/LiF/Al	0.87	11.93	0.21	0.35	27.5	1185.0
FTO/ $V_2O_{4.53}$ (20 nm)/i-a-Si:H/LiF/Al	6.32	13.54	0.75	0.62	9129.9	54.2
FTO/ $V_2O_{4.73}$ (20 nm)/i-a-Si:H/LiF/Al	7.04	14.17	0.80	0.62	6215.9	41.6
FTO/p-a-Si:H (12 nm)/i-a-Si:H/n-a-Si:H (25 nm)/Ag	7.09	12.38	0.79	0.73	3408.0	11.5

TABLE II. Set of parameters used in this simulation and variation of the simulated solar cell parameters with different midgap density of states (DOS) of p-a-Si:H for the p-i-n device.

Parameters used in the simulation			Device performance			
p-a-Si:H midgap DOS (cm^{-3})	Buffer layer midgap DOS (cm^{-3})	i-a-Si:H midgap DOS (cm^{-3})	PCE (%)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF
3.2×10^{18}			7.74	12.35	0.84	0.74
8.0×10^{18}	2.0×10^{19}	7.0×10^{15}	7.03	12.20	0.79	0.73
3.0×10^{19}			5.58	12.14	0.71	0.64

resistance values.^{20,21} The FF (therefore, the PCE) may potentially be further enhanced by introducing a continuous vacuum system over the V_2O_{5-x} window layer sputtering process and the i-a-Si:H layer PECVD process. However, the doping-free solar cell displayed higher values of J_{sc} ($14.17 \text{ mA}/\text{cm}^2$) than were observed for the p-i-n configuration ($12.38 \text{ mA}/\text{cm}^2$). The improvements in J_{sc} were mainly attributed to the enhanced QE in the short wavelength region due to the wide band gap properties of the V_2O_{5-x} film,⁸ as shown in Fig. 3(c). Wide optical band gap properties are very useful in the window layers of a-Si:H solar cells.^{3,6} A wide band gap provides a high transparency, which is beneficial for tandem solar cells, because the thickness of the top a-Si:H solar cell can be reduced. This approach can improve the stable efficiency of a tandem solar cell. Figure 3(d) compares the dark currents of the doping-free a-Si:H solar cell to the corresponding currents of a conventional p-i-n-type a-Si:H solar cell. Table I also presents the shunt resistance and series resistance, determined from the data fitting.²² The series resistance of the doping-free a-Si:H solar cell exceeded that of the conventional p-i-n-type a-Si:H solar cell, indicating a lower FF in the doping-free a-Si:H solar cell. The FF and V_{oc} in our a-Si:H solar cell may potentially be further improved by implementing a continuous vacuum system over the V_2O_{5-x} sputtering and i-a-Si:H PECVD processes.^{20,21} The V_2O_{5-x} film in our study displayed a lower work function than the value reported previously.⁸

The XPS core level spectra of V_2O_{5-x} deposited under different sputtering conditions are displayed in Figs. 4(a) and 4(b). The spin-orbit split $2p_{3/2}$ and $2p_{1/2}$ peaks were observed together with the O1s line in the experimental spectrum. Charge accumulation effects in all XPS spectra were calibrated with reference to the O1s (VO_x) peak at 530.0 eV.^{23,24} The binding energy (BE) of the V2p level increased with the oxidation state of the V cation. The oxidation states of the V and O species were determined using a peak deconvolution process, and the background was subtracted using a Shirley model. The major species of the sputtered vanadium oxide thin films were found to be V^{5+} and V^{4+} . The V $2p_{3/2}$ XPS spectra were deconvoluted into V^{5+} (517.1–517.2 eV) and V^{4+} (515.8–516.0 eV).²³ The assigned binding energies of the V $2p_{3/2}$ peaks, which were characterized by different chemical environments, agreed well with the values reported previously. The oxidation states of the V_2O_{5-x} deposited under an Ar atmosphere were: 47% V^{5+} and 53% V^{4+} . The V^{5+} content increased to 73% upon the addition of 0.5 sccm O_2 . The net stoichiometries of the sputter-deposited vanadium oxide films were determined to be $\text{V}_2\text{O}_{4.53}$ and

$\text{V}_2\text{O}_{4.73}$, respectively. The higher oxidation states were related to the higher work functions of the vanadium oxide films.²⁵ The work functions of the $\text{V}_2\text{O}_{4.53}$ and $\text{V}_2\text{O}_{4.73}$ films were measured to be 5.74 and 5.78 eV, respectively. The higher work function of the $\text{V}_2\text{O}_{4.73}$ thin film deposited under 0.5 sccm O_2 and 49.5 sccm Ar led to a high V_{oc} of 0.80 V.

In summary, we developed a doped layer-free a-Si:H solar cell architecture including a V_2O_{5-x} window layer/i-a-Si:H absorber layer/LiF/Al back electrode. The large difference between the work functions of the V_2O_{5-x} layer and the LiF/Al electrode resulted in effective separation between the photogenerated carriers in the i-a-Si:H due to the establishment of a strong internal electric field. The effective separation resulted in a high V_{oc} of 0.80 V. Furthermore, the wide band gap properties of V_2O_{5-x} increased the quantum

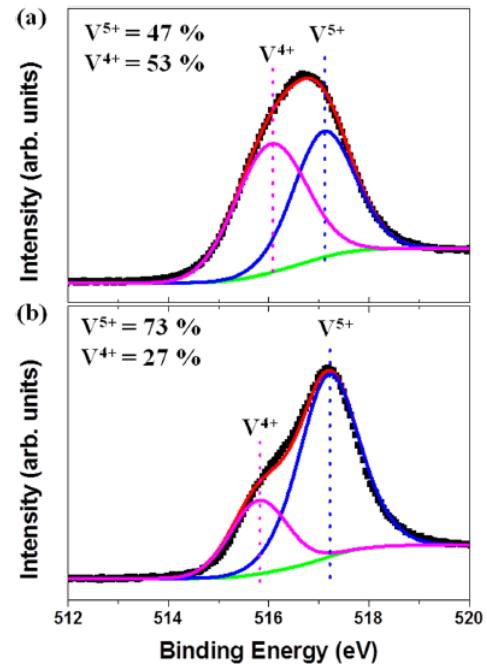


FIG. 4. XPS spectra of the V2p region for a V_2O_{5-x} layer deposited under (a) 50 sccm Ar, (b) 49.5 sccm Ar, and 0.5 sccm O_2 . The black dotted lines and green solid lines indicate the experimental data and Shirley backgrounds, respectively. Red lines indicate the fitting envelope, with blue and pink lines representing the V^{5+} and V^{4+} contributions.

efficiency in the short wavelength region relative to the efficiency of a conventional p-i-n-type a-Si:H solar cell. Optimization of the V_2O_{5-x} window layer yielded a PCE of 7.04%, which was comparable to the value typical of a-Si:H solar cells (PCE = 7.09%).

- ¹D. E. Carlson, *J. Non-Cryst. Solids* **35 & 36**, 707 (1980).
²P. Chatterjee, *J. Appl. Phys.* **76**, 1301 (1994).
³S. J. Baik, S. J. Kang, and K. S. Lim, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 122102 (2010).
⁴S. Baek, J. Lee, Y.-J. Lee, S. M. Iftiqar, Y. Kim, J. Park, and J. Yi, *Nanoscale Res. Lett.* **7**, 81 (2012).
⁵D. E. Carlson, *Sol. Energy Mater.* **3**, 503 (1980).
⁶S. I. Park, S. J. Baik, J.-S. Im, L. Fang, J.-W. Jeon, and K. S. Lim, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 063504 (2011).
⁷L. Fang, S. J. Baik, S. Y. Lim, S. H. Yoo, and K. S. Lim, *IEEE Trans. Electron Devices* **58**, 3048 (2011).
⁸M. T. Greiner, M. G. Helander, W.-M. Tang, Z.-B. Wang, J. Qiu, and Z.-H. Lu, *Nat. Mater.* **11**, 76 (2012).
⁹R. Steim, F. R. Kogler, and C. J. Brabec, *J. Mater. Chem.* **20**, 2499 (2010).
¹⁰V. Shrotriya, G. Li, Y. Yao, C.-W. Chu, and Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 073508 (2006).
¹¹K. Takanezawa, K. Tajima, and K. Hashimoto, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 063308 (2008).
¹²H. H. Liao, L. M. Chen, G. Xu, and Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 173303 (2008).
¹³S. Chen, J. R. Manders, S.-W. Tsang, and F. So, *J. Mater. Chem.* **22**, 24202 (2012).
¹⁴L.-M. Chen, Z. Xu, Z. Hong, and Y. Yang, *J. Mater. Chem.* **20**, 2575 (2010).
¹⁵M. O. Reese, M. S. White, G. Rumbles, D. S. Ginley, and S. E. Shaheen, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 053307 (2008).
¹⁶R. Winkler and S. T. Pantelides, *J. Chem. Phys.* **106**, 7714 (1997).
¹⁷S.-Y. Park, H.-R. Kim, Y.-J. Kang, D.-H. Kim, and J.-W. Kang, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94**, 2332 (2010).
¹⁸S. Krishnakumar and C. S. Menon, *Phys. Status Solidi A* **153**, 439 (1996).
¹⁹A. Eray and G. Nobile, Proceedings of the 26th EPVSEC **26**, 2519 (2011).
²⁰J. Meyer, K. Zilberberg, T. Riedl, and A. Kahn, *J. Appl. Phys.* **110**, 033710 (2011).
²¹Irfan, H. Ding, Y. Gao, C. Small, D. Y. Kim, J. Subbiah, and F. So, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 243307 (2010).
²²J.-S. Lee, I.-H. Jang, and N.-G. Park, *J. Phys. Chem. C* **116**, 13480 (2012).
²³G. Silversmit, D. Depla, H. Poelman, G. B. Marin, and R. D. Gryse, *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.* **135**, 167 (2004).
²⁴J. Mendialdua, R. Casanova, and Y. Barbaux, *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.* **71**, 249 (1995).
²⁵M. T. Greiner, L. Chai, M. G. Helander, W.-M. Tang, and Z.-H. Lu, *Adv. Funct. Mater.* **22**, 4557 (2012).

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Tülay OCAK
Doğum Yeri : Ankara
Medeni Hali : Bekar
E-Posta : ocaktulay@gmail.com
Adresi : Öveçler 2.Cad. Huzur Mah. 1160 Sok. Baloğlu Apt. No:2/10 Ankara

Eğitim

Lise : Ömer Seyfettin Lisesi
Lisans : Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği
Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi / Nanoteknoloji ve Nanotıp A.B.D
Doktora : -

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : KPDS – 84 Almanca : B1 (Orta Seviye)

İş Deneyimi

2010-Devam UET Uran Endüstri Tesisleri A.Ş.– Teklif ve İş Geliştirme Müdürü

Deneyim Alanları

Teklif Hazırlama, İş Geliştirme, Sözleşme Yönetimi, Planlama, Maliyet Kontrol

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi -

Tezden Üretilmiş Yayınlar

"Doping-free silicon thin film solar cells using a vanadium pentoxide window layer and a LiF/Al back electrode", 16 August 2013, in Applied Physics Letters (Vol.103, Issue 7)

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Solar TR – 2016 Konferans ve Sergisi'nde "SIMULATION OF a-Si:H p-i-n SOLAR CELL USING AMPS-1D" adlı sözlü sunum



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
NANOTEKNOLOJİ VE NANOTİP ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 20/09/2017

Tez Başlığı / Konusu: AMPS_1D Programı Kullanılarak Güneş Gözelerinin Bilgisayar Modellemesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler, d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 69 sayfalık kısmına ilişkin, 20/09/ 2017 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: TÜLAY OCAK
Öğrenci No: N10228075
Anabilim Dalı: Nanoteknoloji ve Nanotıp
Programı: Nanoteknoloji ve Nanotıp - Tezli Yüksek Lisans
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

Tarih ve İmza

20.09.2017

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Aynur ERAY