

**HİDROJENLENDİRİLMİŞ AMORF SİLİKON-KRİSTAL
SİLİKON HETEROEKLEM GÜNEŞ GÖZELERİNİN
BİLGİSAYAR MODELLEMESİ**

**COMPUTER MODELING OF HYDROGENATED
AMORPHOUS SILICON-CRYSTAL SILICON
HETEROJUNCTION SOLAR CELLS**

MELİS BİLGİÇ AKSARI

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2011

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
Prof. Dr. Necdet BAŞTÜRK

Üye (Danışman) :.....
Prof. Dr. Aynur ERAY

Üye :.....
Prof. Dr. Hüseyin Zafer DURUSOY

Üye :.....
Prof. Dr. Cafer TOPAÇLI

Üye :.....
Yrd. Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../..... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca/...../..... tarihinde kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Adil DENİZLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

HİDROJENLENDİRİLMİŞ AMORF SİLİKON-KRİSTAL SİLİKON HETEROEKLEM GÜNEŞ GÖZELERİNİN BİLGİSAYAR MODELLEMESİ

Melis Bilgiç Aksarı

ÖZ

Hidrojenlendirilmiş amorf silikon/kristal silikon (a-Si:H/c-Si) heteroeklem güneş gözeleri düşük maliyetli ve yüksek verimli göze geliştirmek için güçlü bir adaydır. Bu tip gözeler için en yüksek verime Sanyo grubu tarafından, katkılanmamış ince tabakalı heteroeklem güneş gözesi (Heterojunction with intrinsic thin layer-HIT) modeli ile ulaşılmış ve %23 değeri elde edilmiştir. Bu sebeple bu yapıdaki güneş gözeleri konusuna ilgi günden güne artmaktadır. Fakat bu tipteki gözelerin veriminin artırılabilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Modelleme çalışmaları güneş gözelerinin fiziğini anlamak ve farklı parametrelerin etkilerini belirlemek için uygun bir ortam sağlamaktadırlar.

Bu çalışmada, a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözelerinin göze başarımını (*akım-gerilim karakteristikleri* (kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi, dolum çarpanı ve verim) ve *iç veya dış kuantum verimi*) etkileyen parametreleri belirlemek amacıyla, AFORS-HET v2.4.1 (**A**utomat **F**or **S**imulation of **H**eterostructures) modelleme programı kullanılarak akım-gerilim (I-V) karakterizasyon modellemesi çalışmaları yapılmıştır. Modelleme çalışmalarında temel göze yapısı olarak saydam iletken oksit (transparent conducting oxide-TCO)/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p++)/Ag yapı kullanılmıştır. Çalışmada tüm tabakaların kalınlıklarının, c-Si(p)'deki farklı kusur düzenlenişlerinin ve kusur yoğunluklarının, a-Si:H/c-Si heteroarayüzde a-Si:H(i) tabakanın bulunmasının ve a-Si:H(p++) BSF tabakasının mobilite aralığının göze başarımına etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bunlara ek olarak, c-Si(p)'nin ışınımı alan ön yüzü ve arka yüzündeki arayüz durumları da ayrıca gözönüne alınarak etkileri incelenmiştir. Modelleme çalışmaları çinko oksit (Zinc Oxide-ZnO) ve indiyum kalay oksit (indium tin oxide-ITO) ön kontaklar için yapılmış, yüzey dokulanmasının etkisi dikkate alınmıştır. Modelleme çalışmalarında elde edilen sonuçlar literatür ile uyum içindedir.

Anahtar Kelimeler: a-Si:H/c-Si, heteroeklemler, silikon güneş gözeleri, modelleme

Danışman: Prof.Dr. Aynur ERAY, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Katıhal Fiziği Anabilim Dalı

COMPUTER MODELING OF HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON-CRYSTAL SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS

Melis Bilgiç Aksarı

ABSTRACT

The amorphous silicon/crystalline silicon (a-Si:H/c-Si) heterojunction solar cells are promising candidates for high efficient and low cost solar cells. The highest a-Si:H/c-Si heterojunction solar cell efficiency has reached is 23% by Sanyo group, with intrinsic thin layer (HIT cells). The a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells have attracted more interest by many research groups. However, further investigations are still required in understanding of device physics in order to improve conversion efficiency. Simulation studies provide a convenient way to obtain more information about device physics and to evaluate the role of various parameters in the fabrication process. In this study detailed I-V characterization simulations of heterojunction solar cells have been carried out with AFORS HET v2.4.1 (**A**utomat **F**or **S**imulation of **H**eterostructures), in order to get more insight into the factors determining the solar cell performance. In the simulation studies, the main cell structure has been chosen as TCO / a-Si:H (n) / a-Si:H (i) / c-Si (p) / a-Si:H (p++) / Ag. The influence of the all layer thicknesses, different defect configurations and defect concentration in c-Si (p) and the change of mobility gap for a-Si:H (p++) BSF layer have been also investigated. The effect of a-Si:H (i) layer, at a-Si:H/c-Si hetero-interface, on the cell performance was investigated in detail. Moreover, the interface defects at the front and back side of the c-Si (p) absorber is also considered. Models developed with ITO and ZnO contacts and effect of the texturization is also considered.

The results of these simulation studies have been found to be in good agreement with the reported studies in the literature.

Keywords: a-Si:H/c-Si, heterojunctions, silicon solar cells, simulation

Advisor: Prof.Dr. Aynur ERAY, Hacettepe University, Department of Physics Engineering, Solid State Physics Section

TEŞEKKÜR

Tez çalışması sürecimde tezim hakkında her türlü desteğini, bilgisini ve ilgisini hiç bir şekilde esirgemeyen, iyi niyeti, fedakarlığı ve sabrı ile kişisel gelişimimde, çalışma tarzımda ve hayata bakış açımında çok büyük olumlu etkisi olan tez danışmanım Prof. Dr. Aynur Eray'a,

Yardımseverliği ve güleryüzlülüğü ile hiçbir emeğini esirgemeyen Sermet Eray'a

Büyük bir sabırla, hiçbir şeyden yakınmadan, tüm kalbi ile her an yanımda olmuş, sevgisini ve desteğini hiç eksik etmemiş, hayat arkadaşım Yiğitcan Aksarı'ya

Tez sürecimde ve tüm hayatım boyunca bütün kararlarımda arkamda durmuş, her koşulda beni sonuna kadar sevmiş ve bana destek vermiş, annem Semra Bilgiç, babam Tarık Bilgiç ve kardeşim Barış Bilgiç'e,

Anlayışları, destekleri ve yardımları için ikinci ailem Mutahhar Aksarı ve Safire Aksarı'ya,

Tez çalışmamın tamamlanması için dostlukları ve yardımları ile yanımdan hiç ayrılmamış çalışma arkadaşlarım ve dostlarım Gülin Acarol, Dilek Sümer Türeli ve Recep Yalçın'a,

Hayatının son günlerinde bile bana olan inançlarını hiç kaybetmemiş, zor anlarımda bana olan inançlarını hatırlayıp sakinleşmemi ve amacımı unutmamamı sağlayan dedelerim Yusuf Arabacıoğlu ve Şadi Bilgiç'e

Ve daha ismini sayamadığım tüm dostlarım ve akrabalarıma

tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL KESİM.....	15
2.1. Güneş Gözelerinin Fiziği.....	15
2.2. a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Gözeleri.....	21
3. AFORS-HET YAZILIMI.....	32
4. MODELLEME SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	43
4.1. AFORS-HET Kütüphanesi Kullanılarak İlgili Tabakaların Seçimi.....	43
4.2. Deneysel Veriler Kullanılarak Modellenmiş c-Si(p) Tabakalar ile Yapılmış Modelleme Çalışmaları ve Sonuçları.....	49
4.3. Yayıcı Tabaka İçin En İyi Koşulların Belirlenmesi.....	59
4.4. Soğurucu Tabaka İçin En İyi Koşulların Bulunması.....	60
4.5. a-Si:H(p++) BSF Tabaka İçin En İyi Koşulların Bulunması.....	67
5. SONUÇ.....	70
KAYNAKLAR.....	73
EK-1. AFORS-HET YAZILIMINDA BULUNAN MODELLEME ÇALIŞMALARINDA KULLANILAN DALGABOYUNA KARŞI A-Si:H VE C-Si'YE AİT SOĞURMA VE DALGA SAYISI DOSYALARI İLE ZNO VE ITO'YA AİT SOĞURMA VE YANSIMA KATSAYILARI DOSYALARININ İÇERİĞİ.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Basit bir tek eklemlı güneş gözesi kesitinin çizimi	16
Şekil 2.2. Bir güneş gözesinin karanlık ve aydınlıkta I-V eğrisi	17
Şekil 2.3. İdeal bir güneş gözesinin aydınlıkta J-V eğrisi	17
Şekil 2.4. Bir güneş gözesinin eşdeğer devresi ve I-V eğrisinin şönt direnci ve seri direnç ile değişimi	19
Şekil 2.5. İdeal bir gözenin QE eğrisi	21
Şekil 2.6.a Bant aralığı yüksek n-tipi bir yarıiletken ile bant aralığı düşük p-tipi yarıiletken malzemenin yalıtık durumda bant yapısı	22
Şekil 2.7. a-Si:H(n)/c-Si(p) yapılı bir heteroeklemdede yük taşıyıcılarının hareketleri (Schulze v.d., 2010)	24
Şekil 2.8. a-Si:H(n)/c-Si(p) ve a-Si:H(p)/c-Si(n) yapılı heteroeklem güneş gözelerinde bant ofset ve bant bükülmeleri	26
Şekil 2.9. a-Si:H(p)/c-Si(n)/a-Si:H(n) yapılı bir heteroeklem güneş gözesinin bant yapısı	28
Şekil 2.10. a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p) yapılı bir heteroeklem güneş gözesinin bant yapısı	28
Şekil 3.1. AFORS-HET yazılımı içerisindeki AM 1.5 koşullarını belirten dalga boyuna karşı gelen güneş ışınımının akısı.	33
Şekil 3.2. Lambert-Beer Modeli ve Çoklu Koherent/Koherent Olmayan İç Yansıma Modelinin şematik karşılaştırması	34
Şekil 3.3. Kopuk bağ yeniden birleşmesinde yakalanma ve emisyon mekanizmaları	40
Şekil 4.1. AFORS-HET kütüphanesi ve literatürden alınan parametrelerle modellenmiş dokulandırılmamış ITO, ZnO ön kontaklı ve dokulandırılmış ZnO ön kontaklı modeller için akım yoğunluğu -gerilim grafikleri	46
Şekil 4.2. Farklı kalınlıklarda yayıcı tabaka kalınlığına sahip ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Ag ve ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Ag yapılı heteroeklem güneş gözelerinin iç kuantum verimi eğrisi (Bilgic Aksari ve Eray, 2011)	49
Şekil 4.3. c-Si(p) modellerindeki kusurların yoğunlukları ve bant aralığında konumları.	51
Şekil 4.4. a-Si:H(n) ve a-Si:H(i) tabakaların bant aralığı durum yoğunluğu grafikleri.	52
Şekil 4.5. Modelle çalışmalarının ilk aşamasında üzerinde çalışılan yapının kesit çizimi	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM EDİYOR)

Şekil 4.6. a-Si:H(p++) BSF tabakası eklenmiş heteroeklem güneş gözesinin kesit çizimi.....	54
Şekil 4.7. a-Si:H(p++)'nin kusur özelliklerini gösteren durum yoğunluğu-enerji bant aralığı grafiği.....	55
Şekil 4.8. Toplam yayıcı kalınlığı ve a-Si:H(i) tabaka kalınlıklarının kısa devre akımı ve verim değerlerine etkisi	60
Şekil 4.9. Soğurucu kalınlığının ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p++)/Ag yapılı heteroeklem güneş gözelerine etkisi	61
Şekil 4.10. c-Si(p) kalınlığının 250 µm olduğu durumda c-Si(p) kusur yoğunluğunun açık devre gerilimi ve kısa devre akımına etkisi.....	62
Şekil 4.11. c-Si(p) kalınlığının 350 µm olduğu durumda c-Si(p) kusur yoğunluğunun açık devre gerilimi ve kısa devre akımına etkisi.....	63
Şekil 4.12. c-Si(p) kalınlığının 450 µm olduğu durumda c-Si(p) kusur yoğunluğunun açık devre gerilimi ve kısa devre akımına etkisi.....	63
Şekil 4.13. c-Si(p) kusur yoğunluğu ile arayüz durumlarının dikkate alınmadığı ve c-Si(p)'nin ön kısmındaki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde farklı c-Si(p) kalınlıklarında açık devre gerilimi değişimi.....	64
Şekil 4.14. c-Si(p) kusur yoğunluğu ile arayüz durumlarının dikkate alınmadığı ve c-Si(p)'nin hem ön hem de arka kısmındaki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde farklı c-Si(p) kalınlıklarında açık devre gerilimi değişimi.....	65
Şekil 4.15. c-Si(p) kusur yoğunluğu ile arayüz durumlarının dikkate alınmadığı ve c-Si(p)'nin ön kısmındaki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde farklı c-Si(p) kalınlıklarında kısa devre akımı değişimi.	66
Şekil 4.16. c-Si(p) kusur yoğunluğu ile arayüz durumlarının dikkate alınmadığı ve c-Si(p)'nin hem ön hem de arka kısmındaki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde farklı c-Si(p) kalınlıklarında kısa devre akımı değişimi.	67
Şekil 5.1. En iyi göze koşulları ile modellenmiş dokulandırılmış ZnO ve ITO ön kontaklı TCO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p++)/Ag yapılı heteroeklem güneş gözesi J-V eğrisi	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. a-Si:H(n) tabakaların modellemesinde kullanılan genel parametreler ve bant aralığı durum yoğunluğu parametreleri.	44
Çizelge 4.2 c-Si(p) tabaka modellemesinde kullanılan parametreleri	45
Çizelge 4.3. a-Si:H(i) tabakaların modellemesinde kullanılan modelleme süresince sabit tutulan genel parametreler ve bant aralığı durum yoğunluğu parametreleri.	48
Çizelge 4.4. c-Si(p) modellemesinde kullanılan parametreler.....	51
Çizelge 4.5. c-Si(p) modellemesinde kullanılan kusur parametreleri.	51
Çizelge 4.6. ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Ag yapılı ve farklı kusurlara sahip c-Si(p) modelleri ile geliştirilmiş HIT güneş gözelerinin başarımları.....	53
Çizelge 4.7. H1, H2 ve H3 kusurlarının yük taşıyıcı ömür süreleri ve yük taşıyıcı difüzyon uzunlukları.	54
Çizelge 4.8. a-Si:H(p++) BSF eklenmiş modellerin sonuçları	55
Çizelge 4.9. a-Si:H(p++) tabaka modellemesinde kullanılan parametreler ve bant aralığı durum yoğunluğu özellikleri	56
Çizelge 4.10. Arayüzlerin modellemesinde kullanılan parametreler	58
Çizelge 4.11. Arka arayüz kusur yoğunluğu değişiminin dolum çarpanı ve verim değerlerine etkisi.....	59
Çizelge 4.12. a-Si:H(p++) BSF tabaka mobilite aralığının değişimi ile iletim bantı ofseti, dolum çarpanı ve verim değerlerinin değişimi.	69

KISALTMALAR DİZİNİ

μ	Mobilite
Ag	Gümüş
a-Si:H	Hidrojenlendirilmiş Amorf Silikon
BSF	Arka Yüzey Alanı (Back Surface Field)
c	Yakalama Sabiti
c-Si	Kristal Silikon
E_c	İletim Bantı
E_f	Fermi Düzeyi
E_g	Bant Aralığı
E_U	Urbach Enerjisi
E_v	Değerlik Bantı
FF	Dolum Çarpanı (Fill Factor)
HIT	Katkılanmamış Tabakalı Heteroeklem (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer)
HWCVD	Isıtılmış Tel Kimyasal Buhar Biriktirme (Hot-Wire Chemical Vapor Deposition)
ITO	İndiyum kalay Oksit (Indium Tin Oxide)
J_{sc}	Kısa Devre Akımı (Short Current Circuit)
L	Taşıyıcı Difüzyon Uzunluğu
N_a	Alıcı Tipi Katkılama Yoğunluğu
N_c	İletim Bantı Etkin Durum Yoğunluğu
N_d	Verici Tipi Katkılama Yoğunluğu
N_v	Değerlik bandı Etkin durum yoğunluğu
PECVD	Plazma Eşlikli Kimyasal Buhar Biriktirme (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)
QE	Kuantum Verimi (Quantum Efficiency)

KISALTMALAR DİZİNİ (Devam Ediyor)

TCO	Saydam İletken Oksit (Transparent Conducting Oxide)
v	Taşıyıcı Isıl Hızı
V_{bi}	Yapı Potansiyeli
V_{oc}	Açık Devre Gerilimi (Open Circuit Voltage)
ZnO	Çinko oksit (Zinc Oxide)
ΔE_c	İletim Bantı Ofseti
ΔE_v	Değerlik Bantı Ofseti
ϵ	Dielektrik Sabiti
η	Verim
τ	Taşıyıcı Ömür süresi
ϕ	İş Fonksiyonu
χ	Duygunluk

1. GİRİŞ

Güneş gözeleri ile ilgili ilk çalışmalar 1950'lerde başlamıştır. 1960'lı yıllarda uzay araçlarının elektrik enerjisi gereksinimini karşılamak için güneş gözeleri kullanılmıştır. 1970'lerde petrol krizinin başgöstermesi ile temiz ve tükenmez enerji kaynakları, geleneksel yakıtlara alternatif olarak görülmeye başlanmış ve bununla birlikte güneş gözesi araştırmaları da hız kazanmıştır.

Fosil yakıtların tükenme aşamasına gelmesi ve çevreye olumsuz etkilerinin açık bir şekilde gözlenmeye başlanması ile 2000'li yıllarda güneş gözelerinin ticari üretimi artmış, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız uygulamaları yaygınlaşmıştır. Kullanımın daha da yaygınlaşması için göze fiyatlarının düşürülmesi büyük bir önem taşımaktadır. Göze fiyatlarını düşürmek için göze yapımında kullanılan malzeme miktarının azaltılması ve bununla birlikte aynı yüzey alanından elde edilebilecek gücün artırılması gerekmektedir (Goetzberger ve Hoffmann, 2005).

Güneş gözeleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren ve fotovoltaiik etki ile çalışan düzeneklerdir. Güneş gözeleri, üzerine düşen güneş ışığını verimli bir şekilde soğurarak güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmek için tasarlanmış yarıiletken aygıtlardır. Yarıiletken malzemenin bant aralığına eşit yada daha büyük olan fotonlar malzeme içinde soğurularak elektron-deşik çifti oluştururlar. Bu taşıyıcılar (elektronlar ve deşikler) birbirlerinden, p-n eklemine oluşturulan yapısal elektrik alan sayesinde ayrılarak yeniden birleşmeleri engellenir. Üretilen yük taşıyıcıları, metal malzemelerden yapılan ön ve arka kontaklar aracılığı ile toplanır ve böylece dış devrede bir akım oluşur.

Güneş gözelerinin üretiminde silikon, kadmiyum tellür, galyum arsenid, bakır indiyum selenid gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler ile farklı yapılarda eklemeler geliştirilerek farklı yapılarda güneş gözeleri oluşturulabilmektedir. Üzerinde yaygın olarak çalışılan bazı göze eklem çeşitleri, homoelekmler, heteroelekmler, p-i-n veya n-i-p yapılı gözeler ve çoklu eklemelerdir (Bube, 1998). Homoeleklem güneş gözeleri farklı tipte katkılanmış, bant aralığı aynı iki yarıiletkenin biraraya gelmesi ile (silikon gibi) oluşturulmaktadır. Heteroelekmler ise farklı tipte katkılanmış, bant aralığı farklı değerlerde olan, iki malzeme ile (hidrojenlendirilmiş amorf silikon ve kristal silikon, kadmiyum sülfid ve bakır indiyum diselenid gibi) eklem yapılarak hazırlanmaktadır. p-i-n veya n-i-p yapılı güneş gözeleri de p-tipi katkılanmış, katkılanmamış (i-tipi) ve n-

tipi katkılanmış aynı tipte yarıiletkenin (amorf silikon veya kadminyum tellür gibi) biraraya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Çoklueklem güneş gözeleri ise farklı bant aralığına sahip birçok yarıiletkenin biraraya getirilmesi ile hazırlanmaktadır. Bu yapıların üstünlüğü güneş spektrumunun farklı dalgaboylarını soğurabilecek malzemeler ile eklem oluşturarak gelen güneş ışınımından olabildiğince fazla yararlanabilmesidir (Sze, 1985; Bube, 1998, Goetzberger ve Hoffmann,2005).

Heteroelekmler iki farklı yarıiletkenin üstün özelliklerini biraraya getirirler. Silikon heteroeleklem güneş gözesi çeşitlerinden biri olan hidrojenlendirilmiş amorf silikon/kristal silikon (a-Si:H/c-Si) heteroelekmler, soğurucu c-Si dilim üzerine düşük sıcaklıklı işlemler sonucunda yayıcı tabaka olan a-Si:H tabakaların büyütülmesi ile oluşturulmaktadır. Optik kayıpları azaltmak ve kontak oluşturmak amacı ile gözenin ön tarafı, saydam iletken oksit (transparent conducting oxide-TCO) tabakası ile kaplanmaktadır. a-Si:H'ın düşük sıcaklıklı işlemler ile hazırlanması, c-Si'de yüksek sıcaklıklı işlemlerde oluşabilen bükülme, kusur oluşumu gibi olumsuz etkilerden kaçınılabilmesine yardımcı olmaktadır. a-Si:H tabakanın, c-Si yüzey üzerinde büyütülme süresi, yaygın-bilinen c-Si göze hazırlanma süresi ile karşılaştırıldığında, a-Si:H/c-Si heteroeleklem gözeler daha kısa sürelerde hazırlanabilmektedir. a-Si:H yarıiletkenin düşük maliyetli bir malzeme oluşu, kısa sürede ve düşük sıcaklıklarda c-Si yüzeyine uygulanabilmesi, a-Si:H/c-Si heteroeleklem güneş gözelerini yaygın-bilinen c-Si güneş gözelerine göre daha düşük maliyetli hale getirmektedir. Geniş mobilite aralığı değerine sahip olan a-Si:H tabaka, yayıcı tabaka olarak kullanıldığında gelen güneş ışınımının büyük kısmını soğurucu c-Si tabakaya geçirebilmekte yani iyi pencere özelliği göstermektedir. c-Si üzerine a-Si:H uygulayarak göze hazırlamanın bir diğer avantajı a-Si:H'un c-Si yüzeyi üzerinde yüzey pasifleştirme (*surface passivation*) sürecini gerçekleştirmesidir. Bu süreçte, a-Si:H'ta bulunan hidrojen atomları c-Si yüzeyinde bulunan kopuk bağ tipi kusurlara bağlanarak onları doyurmakta ve bu yüzey kusurlarını pasif hale getirmektedir. (Roca v.d., 2011).

c-Si'nin arka yüzüne, verimi arttırmak için **arka yüzey alanı** (Back Surface Field – BSF) uygulamaları yapılmaktadır (Bube,1998). a-Si:H/c-Si heteroelekmlerde, yüksek sıcaklıkta uygulanan Al-BSF yerine a-Si:H BSF de uygulanabilmektedir (Goetzberger ve Hoffmann, 2005; Wang v.d. 2005b). a-Si:H BSF'yi kullanarak hem istenilen etki olan arka kontak yeniden birleşmeleri azaltılabilmekte hem de c-Si'nin arka yüzeyi de pasif hale getirilmektedir. Bu tip gözeler, yüksek sıcaklık gerektiren ve daha yüksek

maliyetli, %24'e yakın verime sahip homoeckem PERL (Passivated Emitter & Rear Locally-diffused) ve PERT(Passivated Emitter & Rear Totally-diffused) gözeler (Zhao v.d., 2000) yakın verim değerlerine sahiptirler.

Heteroeckem güneş gözelerinin gelişimi ve bu konudaki son gelişmeler incelendiğinde, heteroeckem yapının ilk kez 1954 yılında, tek kristal Ge ve Si üzerine a-Si uygulanmasıyla, Bükreşli bir grup tarafından çalışıldığı bildirilmektedir (Fuhs v.d., 2006). Bu çalışmada, a-Si filmler, hidrojenlendirilme gerçekleşmeden hazırlandığından c-Si yüzey yeterli şekilde pasifleştirilememiştir (Fuhs v.d., 2006). 1974 yılında Fuhs v.d. tek kristal c-Si üzerine katkılanmamış hidrojenlendirilmiş amorf silikon (a-Si:H(i)) uygulamış, 1983 yılında ise Hamakawa v.d. a-Si/c-Si göze uygulaması yapmışlardır (Wang v.d., 2004). 1990 yılında Sanyo Electric Co.'da katkılanmış-a-Si:H/ μ c-Si(i)/c-Si yapısı ile ilk ince **katkılanmamış tabakalı heteroeckem** (heterojunction with intrinsic thin layer - **HIT**) göze uygulaması yapıldığı bildirilmiştir (Wang v.d., 2004). 1991 yılında Sanyo Electric Co. New Materials Research Center'da μ c-Si(i) yerine a-Si:H(i) uygulandığı bildirilmiştir (Wang v.d., 2004). 1994 yılında Sanyo araştırmacıları indiyum kalay oksit (Indium tin oxide-ITO) ön kontak, a-Si:H(p) yayıcı tabaka ve soğurucu c-Si(n) tabaka ile heteroeckem güneş gözesi hazırlamışlardır. Öz direnci 0,65-0,75 Ω cm ve kalınlığı 250 μ m olan, Czochralski tekniği ile üretilmiş kristal silikon (CZ c-Si) üzerine, plazma eşlikli kimyasal buhar biriktirme (plasma enhanced chemical vapor deposition -PECVD) yöntemi ile 10 nm kalınlığındaki a-Si:H(n) tabakalar hazırlayarak, %12,3 verime ulaşmışlardır (Sawada v.d., 1994). Farklı çalışma grupları Sanyo'nun bu çalışmasından yola çıkarak n tipi c-Si kullanmış ve heteroeckem güneş gözesi geliştirmişlerdir (Centurioni v.d., 2004; Iencinella, 2004; Tucci v.d., 2004; Fuhs v.d., 2006; De Wolf v.d., 2008; Hernandez-Como ve Morales Acevedo 2008, 2010; Favre v.d., 2010; Das v.d., 2010; Ghosh, 2008).

c-Si(p) dilimler, c-Si(n) dilimler ile karşılaştırıldığında hem daha düşük maliyetli hem de daha yaygın kullanılan malzemeler (Wang v.d., 2005a) olduğundan, soğurucu tabaka olarak c-Si(p) dilimi de tercih eden bir çok araştırma grubu bulunmaktadır (Schmidt v.d., 2001; Jensen v.d., 2002; Stangl v.d., 2002; 2003; Schmidt v.d., 2004; Tucci v.d., 2004; Maydell v.d., 2005a; 2005b; Maydell v.d., 2006b; Zhao v.d., 2008b; 2009; Datta v.d., 2008; 2009; Dao v.d., 2010; Wang v.d., 2010).

Tabakaların katkılama türü, yarıiletken tabakaların elektronik özelliklerini etkilemektedir. Yük taşıyıcıların elektronik özelliklerine ek olarak a-Si:H(n)/c-Si(p) veya a-Si:H(p)/c-Si(n) yapıda oluşturulan gözelerin bant bükülmeleri ve bant ofsetleri ve sonuç olarak da göze başarımlı potansiyelleri farklılık göstermektedir. Güneş gözelerinin başarımlı değerlendirilmesi genellikle **akım-gerilim karakteristikleri** (kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi, dolum çarpanı ve verim) ve **iç veya dış kuantum verimi** (internal quantum efficiency-IQE veya external quantum efficiency-EQE) ölçülerek yapılmaktadır.

a-Si:H(n)/c-Si(p) yapı ile karşılaştırıldığında, a-Si:H(p)/c-Si(n) yapıdaki c-Si azınlık bantı ofseti ve bant bükülmeleri daha yüksek olmaktadır. Aynı zamanda c-Si(n) için azınlık taşıyıcı mobilitesi daha düşüktür. Bu sebeplerle farklı gruplar a-Si:H(p)/c-Si(n) yapının a-Si:H(n)/c-Si(p) yapıya göre daha yüksek başarımlı potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir (Stangl v.d., 2001; Froitzheim v.d., 2002; Jensen v.d., 2002; Tucci v.d., 2004). Maydell vd. de çalışmalarında (2006a) a-Si:H(p)/c-Si(n) yapılu göze ile a-Si:H(n)/c-Si(p) yapılu gözenin iç kuantum verimlerini karşılaştırdıklarında, a-Si:H(p)/c-Si(n) yapının kırmızı bölge tepkisinin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözelerinde, tabakaların katkılama tipinin yanısıra tabakaların kalınlığı da göze başarımlı etkilemektedir. Yayıcı tabaka kalınlığının artışı ile birlikte gözenin mavi tepkisinin azaldığı gözlenmiştir (Stangl v.d., 2003). Sawada v.d. çalışmalarında (1994) a-Si:H(p)/c-Si(n) yapılu heteroeklem güneş gözesinde yayıcı tabaka kalınlığı arttıkça açık devre gerilimi ve dolum çarpanının sabit kaldığını, kısa devre akımının ve verimin ise artan kalınlık ile azaldığını gözlemişlerdir (Sawada v.d., 1994). Benzer sonuçlara literatürdeki diğer çalışmalarda da ulaşılmıştır (Stangl v.d., 2003; Centurioni v.d., 2004; Hernandez Como ve Morales Acevedo, 2008). Zhao vd. ön kontaktaki bant bükülmelerinin ihmal edilmediği modelleme çalışmalarında da (2008a; 2008b) yayıcı kalınlığı arttıkça verim değerinin düştüğünü gözlemişlerdir. Sawada v.d. çalışmalarında (1994) HIT yapıda, göze parametrelerini optimize etmek amacı ile a-Si:H(i) tabakanın kalınlığını arttırarak göze başarımlı etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada a-Si:H(p) yayıcı tabaka 3 nm'de sabit tutulurken, a-Si:H(i) tabakanın kalınlığı 30 nm'ye kadar çıkarılmıştır. Optimum kalınlık değerine kadar açık devre gerilimi, dolum çarpanı ve verim artış gösterip daha sonra sabit kalırken, kısa devre akımı azalma eğilimi göstermiştir (Sawada v.d.,

1994). Diğer çalışmalarda da a-Si:H(i) tabaka kalınlığının arttırıldığında artan toplam yayıcı kalınlığı ile birlikte göze karakteristiğinin bozulduğu gözlenmektedir (Ghosh v.d, 2008). İç kuantum verimi (IQE) eğrisi incelendiğinde katkılanmış a-Si:H tabakanın sabit kalınlıkta tutulduğu durum için a-Si:H(i) tabaka kalınlığı arttıkça, gözenin mavi tepkisinin azaldığını gözlenmiştir (Jensen v.d., 2002; Maydell v.d., 2005b; Zhao v.d., 2008a; 2008b; Wang v.d., 2010). Sanyo Electric Co yayıcı kalınlığının yanısıra soğurucu kalınlığının etkisini de incelemiştir. Soğurucu tabakayı olabildiğince incelterek göze maliyetlerinin düşürmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında dilim kalınlığı incelidikçe kısa devre akımının azalan ışıyım soğurması ile azaldığını ve dolum çarpanı değerinin az miktarda azaldığını, açık devre geriliminin ise sabit kaldığını belirtmişlerdir (Tsunomura v.d., 2008).

Katkılama yoğunluğu da güneş gözesi başarımını etkilemektedir. Birçok grup yayıcı tabaka katkılama yoğunluğunun artışı ile optimum bir değere kadar açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve verim değerlerinin arttığını, bu değer üstünde kısa devre akımının sabit kaldığını açık devre gerilimi ve verimin azaldığını gözlemlemişlerdir (Centurioni v.d., 2004; Maydell v.d., 2005a; 2006a; 2006b). Çalışmaların bir kısmında ise optimum katkılama değerinden yüksek değerlerde göze başarım değerlerinin düşmediğini fakat sabit kaldığını gözlenmiştir (Zhao v.d., 2008a; 2008b; Hernandez-Como ve Morales-Acevedo, 2010; Wang v.d., 2010). Yayıcı tabakanın katkılama yoğunluğu gibi soğurucu tabakanın da katkılama yoğunluğu göze başarımını etkilemektedir. Yapılan bazı çalışmalarda c-Si katkılama yoğunluğunun artışı ile (özdirencin azalması ile) açık devre geriliminin artmış olduğu gözlenmiştir (Damon-Lacoste v.d., 2006). Zhao vd. soğurucu katkılama üzerine yaptıkları modelleme çalışmasında (2009) özdirencin artışı ile optimum bir değere kadar açık devre gerilimi, dolum çarpanı ve verimin artıp daha sonra sabit kaldığını, kısa devre akımının ise azaldığını gözlemişlerdir. Aynı sonuçlar Dao vd.'nin yaptığı modelleme çalışmasında da (2010) elde edilmiştir. Dao'nun modelleme çalışmasında (2010) özdirenc azaldıkça gözenin mavi tepkisi artmış, kırmızı tepkisi ise azalmıştır. Zhao vd. ise (2009) özdirenc azladıkça mavi bölge tepkisinin de azaldığını gözlemişlerdir.

c-Si(p) soğurucunun kusur yoğunluğu göze başarımını etkileyen faktörlerden bir diğeridir. Zhao vd.'nin çalışmalarında (2009) c-Si(p) kusur yoğunluğu arttıkça açık devre gerilimi ve kısa devre akımı değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Jensen vd. de

çalışmalarında (2002) c-Si kusur yoğunluğu artışına bağlı olarak difüzyon uzunluğu azaldıkça açık devre geriliminin düşeceğini belirtmişlerdir. Ali vd. (2011) c-Si(p) kusurları üzerine yaptıkları çalışmalarında DLTS ölçümü sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Çalışmada değerlik bantının üzerinde 0,23, 0,33 ve 0,41 eV enerji değerlerinde bulunan ve sırasıyla boşluk kusurunu (vacancy defect), yarı kararlı boron-oksijen kusurunu (meta stable boron oxygen defect) ve karbon-boşluk-oksijen kompleksini (carbon-vacancy-oxygen complex) gösteren üç farklı kusur özelliğini incelemişlerdir. Sözü edilen kusurların kusur yoğunluklarını sırası ile 7×10^{11} , $2,5 \times 10^{12}$, ve $4,5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 'tür ve yakalama sabitleri sırası ile $1,94 \times 10^{-16}$, $1,65 \times 10^{-16}$, $7,2 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-2}$ 'dir. Bu kusurlar değerlik bantının 0,33 eV üstünde olan kusurun yeniden birleşme merkezi ve azınlık taşıyıcı ömür süresini azaltan bir kusur olduğunu belirlemişlerdir.

Sanyo Grubu'nun çalışmalarında (1994), c-Si yüzeyinin pasifleştirilmesini arttırmak amacı ile, a-Si:H(p) ve c-Si(n) tabakaları arasına a-Si:H(i) tampon tabaka uygulamış ve HIT gözeleri geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, 500 μm kalınlığındaki c-Si(n) soğurucu üzerine 5 nm'lik a-Si:H(i) ve 3 nm'lik a-Si:H(p) büyütmüşler ve elde ettikleri HIT yapı ile verim değerinin %14,8'e yükseldiğini gözlemlemişlerdir (Sawada v.d., 1994). a-Si:H(i) tampon tabaka kullanıldığında açık devre gerilimi, dolum çarpanı ve verim artmıştır. Farklı gruplar a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözesi uygulamalarında benzer sonuçları görmekte ve a-Si:H(i) tampon tabaka kullanmaktadırlar (Jensen v.d., 2002; Froitzheim v.d., 2002; Stangl v.d., 2002; 2003; Schmidt v.d., 2004; Maydell v.d., 2005b; Hernandez-Como ve Morales-Acevedo, 2008; 2010; Das v.d., 2010). Stangl v.d. modelleme çalışmalarında a-Si:H(n)/c-Si(p) yapıda, a-Si:H/c-Si arayüz durumlarını modellerinde dikkate almadıkları durumlarda, a-Si:H(i) kullanımı ile açık devre geriliminin değişmediğini ve kısa devre akımının arttığını gözlemlemişlerdir (Stangl v.d., 2003). Fakat arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerinde, arayüz durum yoğunluğu $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 'den yüksek olduğunda a-Si:H(i) tabakanın kullanımı ile açık devre geriliminin yükseldiğini görmüşlerdir. Ghosh v.d. (2008) a-Si:H(p)/c-Si(n) yapı kullanılan modellerinde a-Si:H(i) tabaka kullanıldığında açık devre geriliminin daha yüksek değerlere çıktığını bunun aksine kısa devre akımının azaldığını görmüşlerdir. Bu çalışmaların aksine Wang v.d. a-Si:H (n)/c-Si(p) yapıda yapılı gözelerde, a-Si:H tabakaları HWCVD (ısıtılmış tel kimyasal buhar biriktirme) ile uyguladıklarında ve c-Si yüzeyine yapılan hidrojen ön uygulamasının iyi

koşullarda yapıldığında a-Si:H(i) tampon tabaka kullanımının gerekli olmadığını belirtmişlerdir (Wang v.d., 2005a). Benzer bir gözlem Damon-Lacoste v.d. tarafından yapılmış (2006), pm-Si(i) tampon tabaka kullandıklarında açık devre geriliminin ihmal edilecek boyutlarda arttığını gözlemlemişlerdir. Jensen v.d ise soğrucu c-Si(p) dilimler yüksek kaliteli olduğunda a-Si:H(i) tabaka kullanımının göze başarımını etkilemediğini belirtmişlerdir (Jensen v.d., 2002). Centurioni vd.'nin çalışmalarında (2004) 30 nm a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n) yapılı örneklerinde a-Si:H(i) tabaka kullanımının açık devre gerilimini azalttığını belirtmişler ve cam üzerine iyi kaliteli a-Si:H(i) uygulamak için kullanılan hazırlama koşullarının a-Si:H/c-Si göze uygulamaları için uygun olmadığını açıklamışlardır. a-Si:H(i) tabakayı uygularken c-Si üzerinde büyümenin epitaksiyel olarak başladığını görmüşlerdir. Bu sebeple a-Si:H(i) tabaka yerine tamamen epi-Si özellikleri gösteren epi-Si(i) tabaka uygulamışlardır. Wang vd. de çalışmalarında kristalliğin a-Si:H(i) tabaka boyunca yayılıp katkılanmış a-Si:H ile temas etmesi durumunda göze başarımına olumsuz etkisi olacağını belirtmişlerdir (Wang v.d., 2005a). Centurioni vd.'nin çalışmalarında (2004) olduğu gibi tampon tabaka malzemesi için epi-Si(i) (Iencinella 2004; Dao v.d.,2010) kullanan ve daha farklı olarak olarak μ c-Si(i) (Iencinella, 2004; Dao v.d., 2010), pm-Si(i) (Damon-Lacoste v.d., 2006; Datta v.d., 2008; 2009) gibi malzemeler üzerine çalışan gruplar da bulunmaktadır. Bunun yanı sıra HIT yapıda a-Si:H(i) tampon tabaka kullanıp yayıcı tabaka olarak da epi-Si (Stangl v.d., 2002), μ c-Si (Stangl v.d., 2002; Goldbach v.d., 2006), nc-Si (Xu v.d., 2006), SiC_x (Ferre v.d., 2006), a-SiC (Tucci v.d., 2004) gibi farklı malzemeler kullanılabilmektedir. Bazı çalışmalarda ise hem yayıcı hem tampon olarak a-SiO:H kullanılmıştır (Fujiwara v.d, 2009).

Verim arttırmak için yapılan araştırmalarda vurgulanan diğer bir etken de, HIT yapıya BSF tabakası eklenmesidir. Sawada v.d. çalışmalarında (1994) HIT yapıya BSF olarak a-Si:H(n) tabaka kullanıldığında ve c-Si yüzey dokulandırması (texturization) yapıldığında verimi %19,5 olarak elde etmişlerdir. Bu uygulama sonucu açık devre gerilimi, kısa devre akımı, dolum çarpanı ve verim değerleri yükselmiştir. a-Si:H BSF'nin düşük sıcaklıkta uygulanabilen bir malzeme olması ve verimi artırma potansiyelinin olması nedeniyle birçok grup a-Si:H BSF kullanmaktadır (Stangl v.d., 2003; Schmidt v.d., 2004; 2007; Tucci v.d., 2004, Maydell v.d., 2005a; Fuhs v.d., 2006; Maydell 2006a; Conrad 2006; Wang v.d., 2005b; 2006; Ghosh, 2008; Hernandez-Como ve Morales-Acevedo, 2008; 2010; Dao v.d., 2010;). Maydell vd. a-

Si:H(p) BSF kalınlığının etkisini incelemişler (2006a) ve a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si(p) yapılı gözede a-Si:H(p)'nin kalınlığı arttıkça açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve verim değerlerinin arttığını belirlemişlerdir. Fakat en uygun değerden daha yüksek değerlerde seri direnç artacağından seri direncin artmaya başladığı kalınlığa kadar BSF tabaka kalınlığının arttırılabileceğini belirtmişlerdir. Bu tabakanın katkılanması arttırıldığında açık devre gerilimi ve dolum çarpanı ve verim değerinin belli bir değere kadar arttığı daha sonra sabit kaldığı, kısa devre akımının ise hiç değişmediği gözlenmiştir (Zhao v.d., 2008a). Sawada v.d. çalışmalarında (1994) farklı bir BSF kullanarak c-Si soğurucu tabakanın iki yüzüne de HIT yapı uygulamışlar ve arka kontak olarak yüksek yansıtıcılığa sahip metal malzeme kullanmışlardır. Sonunda dokulandırılmış c-Si soğurucu ile ITO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n)/Metal yapıya sahip 1 cm^2 boyutunda, 644 mV açık devre gerilimi, 39,4 mA/cm² kısa devre akımı, %79 dolum çarpanı değerine sahip bir göze geliştirmişlerdir. Bu göze, %21 verime sahip, o dönemin 200°C altında üretilmiş, en yüksek verimli gözesi olmuştur (Sawada v.d., 1994). Sanyo grubu bu modellerini seri üretime sokmuş ve 1997 yılında %17,3 verimli 100 cm² yüzey alanına sahip, "HIT Power 21" adı ile modül şeklinde markete sunmuştur. 2000 yılında bu gözenin tasarımını yerden yansıyan güneş ışınımını da alacak şekilde değiştirip, TCO/a-Si:H(p/i)/c-Si(n)/a-Si:H(i/n)/TCO yapılı hale getirmişlerdir. Bu göze 100,5 cm² alanına sahip 200 µm kalınlıklı, 1 Ωcm CZ c-Si(n) dilim kullanılarak hazırlanmıştır. "HIT Power Double" adı ile seri üretimine başlamışlar ve %18,3 verim ile markete sunmuşlardır (Sakata v.d., 2000).

Farklı gruplar hem c-Si(n) hem de c-Si(p) dilim kullanılmış gözelerde a-Si:H(i/p,n) BSF'lerin Al-BSF'ye göre daha yüksek açık devre gerilimi verdiğini görmüşlerdir (Wang v.d., 2005b; Page v.d., 2006). Page vd.'nin çalışmalarında (2006) a-Si:H(i/p) BSF'nin kullanıldığı durumlarda, Al-BSF'nin kullanıldığı durumlara göre gözenin iç kuantum veriminin kırmızı bölge tepkisi daha yüksek çıkmıştır. Benzer sonucu a-Si:H(i/n) BSF kullandıkları durumlarda da gözlemişlerdir (Page v.d., 2006). Fakat Wang vd. (2004) c-Si(p) kullanılan örneklerde a-Si:H(i/p) BSF kullanımının çok uygun olmadığı, geniş bant aralıklı a-Si:H(i) tampon tabakanın değerlik bantındadeşiklerin taşınmasını engellediğini belirtmişlerdir. Bazı gruplar çalışmalarında BSF malzemesi olarak µc-Si (Centurioni v.d., 2004; Goldbach v.d., 2006; Voz 2006; Dao v.d., 2010), a-SiC:H/a-Si:H (Datta v.d., 2008; 2009; 2010) gibi malzemeler de önermişlerdir.

Wang v.d. yaptıkları çalışmada (2008) HWCVD ile hazırladıkları TCO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(i)/a-Si:H(p) yapılı heteroeklem güneş gözelerinde arka kontak olarak ITO ve titanyum (Ti) kullanımının gözenin açık devre gerilimini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Fakat c-Si'nin arka tarafındaki a-Si:H(p) tabakanın kalınlığı arttırdıklarında ve Ti arka kontak kullandıklarında ITO kontak da olmaksızın aynı açık devre gerilimine ulaşılabilceğini belirtmişlerdir.

2005 yılında Sanyo Electric Co. laboratuvarlarında hazırlama koşullarının iyileştirilmesi ile 100,3 cm² boyutunda 712 mV açık devre gerilimi, 3,837A kısa devre akımı, %78,7 dolum çarpanı, %21,5 verim değerlerine ulaşmışlardır (Taguchi v.d., 2005a). 2006 yılında ise 100,4 cm² alanında, 718 mV açık devre gerilimi, 3,852 A kısa devre akımı, %79 dolum çarpanı ve %21,8 verim değerlerini elde ettiklerini duyurmuşlardır (Maruyama v.d., 2006). 2008 yılında 100,5 cm² alanlı TCO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(p)/TCO yapılı heteroeklem güneş gözelerinde 725 mV açık devre gerilimi, 39,09 mA kısa devre akımı, %79,1 dolum çarpanı ve %22,3 verim değerine ulaşmışlardır. Bu değere ulaşmak için c-Si yüzey temizliğine, yüksek kaliteli a-Si:H(i) uygulamaya ve c-Si yüzeye ısı zarar vermemeye dikkat ettiklerini vurgulayarak, bu sayede açık devre geriliminin yükseldiğini, belirtmişlerdir. Bunun yanısıra iyi bir TCO malzemesinin soğuruculuğunu azaltarak ve yük taşıyıcı mobilitasını artırarak, kısa devre akımını da yükseltmişlerdir (Tsunomura v.d., 2008).

Literatürdeki çalışmaların bazılarında ön ve arka kontaktaki bant bükülmelerinin de etkisi incelenmiştir. TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p) yapısı için ön kontakta, ön kontak iş fonksiyonu arttıkça, 4,1 eV olarak verilen kritik bir değer altında tüm değerler sabit iken bu değerden büyük değerlerde kısa devre akımı sabit kalmış, açık devre gerilimi, dolum çarpanı ve verim azalmıştır (Froitzheim v.d., 2002; Stangl v.d., 2003; Zhao v.d., 2008a; Dao v.d., 2010). Bu yapıda iş fonksiyonu 4,3 eV'tan büyük olarak seçildiğinde, sabit katkılama altında yayıcı tabaka kalınlığı arttırılırsa göze veriminin başta arttığını daha sonra azaldığını gözlenmiştir. (Stangl v.d., 2003; Zhao v.d., 2008a; 2008b). TCO/a-Si:H(p)/c-Si(n) yapısı incelendiğinde ise 5,1 eV'luk kritik bir değer üstünde TCO iş fonksiyonu arttıkça göze verimi de artmıştır (Zhao v.d., 2008b; Hernandez-Como ve Morales-Acevedo, 2008; 2010). Aynı zamanda TCO iş fonksiyonu artışı ile birlikte yayıcı tabaka katkılanma oranı da arttığında, başarımlar değerleri yükselmiştir. Bu yapıda da 5,1eV değeri altında, sabit katkılama oranı için, yayıcı tabaka kalınlığı arttırılırsa göze başarımının başta arttığını daha sonra

azaldığını gözlenmiştir (Zhao v.d., 2008b). HIT yapılarında ön kontaklar kullanıldığında a-Si:H(i)'nin oldukça ince tutulması gerektiği belirlenmiştir (Zhao v.d., 2008a; 2008b). a-Si:H(p)/TCO arka kontakta TCO iş fonksiyonu artışı kısa devre akımı ve açık devre gerilimi hariç tüm göze başarımları değerlerini etkilemiştir. Tabakanın kalınlığı arttıkça iş fonksiyonunun 5,4 eV'tan küçük olduğu durumlarda, dolum çarpanı ve verim başta yükselirken sonra sabit kalmıştır (Zhao v.d., 2008a)

a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözelerinde arayüz yeniden birleşmesi göze başarımlarını büyük miktarda etkilemektedir (Datta v.d., 2008; 2009). c-Si'nin güneş ışınımını alan ön kısmındaki arayüz durum yoğunluğu $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ - $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ değerlerinden yüksek olduğunda göze başarımlarının olumsuz etkilendiği gözlenmiştir (Stangl v.d., 2003; Gudovskikh v.d., 2004; Taguchi v.d., 2005b; Maydell v.d., 2005a; Conrad v.d., 2006; Maydell 2006b; Datta v.d., 2008; 2009; 2010). Hernandez-Como ve Morales Acevedo c-Si(n) kullandıkları modelleme sonuçlarında (2008) arayüz durum yoğunluğu 1×10^{10} 'dan $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 'e çıktığında verim değerinin azaldığını görmüşlerdir. Aynı grup, bir diğer çalışmalarında da benzer sonuçlar elde etmişlerdir (Hernandez Como ve Morales-Acevedo, 2008; 2010). Wang v.d., c-Si(p) soğurucu kullandıkları modelleme çalışmalarında, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}/\text{eV}$ 'den yüksek arayüz durum yoğunluğuna sahip olduğu modellerde kısa devre akımının ve açık devre geriliminin düştüğünü görmüşlerdir (Wang v.d., 2010). Datta vd., çalışmalarında (2008; 2009; 2010) c-Si(p)'nin arka kısmında bulunan arayüzdeki durum yoğunluğu $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ve üzerine çıktığı zaman, açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve dolum çarpanı değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Arayüzdeki durum yoğunluğunun daha düşük değerleri için, arka arayüz durum yoğunluğu arttıkça açık devre gerilimi ve kısa devre akımı sabit kalmış fakat dolum çarpanı ve verim değerleri düşüş göstermiştir (Datta v.d., 2008; 2009; 2010). N türü c-Si dilim kullanılan heteroeklem yapı durumlarda ise arka tarafta bulunan kusurların artışı göze başarımlarını etkilememiştir (Datta v.d., 2010). Arayüz kusurlarının ve arayüzdeki durumların göze başarımları üzerinde büyük etkisi olduğu belirlendiğinden ve arayüzlerin göze başarımlarını nasıl etkilediğinin tam anlaşılamamasından dolayı, arayüzün yapısını ve doğasını anlayabilmek adına farklı bir çok çalışma yapılmıştır (Laades v.d., 2004; Gudovskikh v.d., 2004; Tosolini v.d., 2004; Schaffarzic v.d., 2005; Olibet v.d., 2007; De Wolf v.d., 2008; Favre v.d., 2010; Tardon ve Brüggemann, 2010; Das v.d., 2010). Yük taşıyıcıları sadece a-Si:H/c-Si arayüzlerde değil, yapı içinde ve kontaklarda da

yeniden birleşme yapabilmektedirler. Bu nedenle, yük taşıyıcılarının yapı içindeki hareketlerini ve yeniden birleşme mekanizmalarını anlamak için de ayrıca çalışmalar yapılmıştır (Guosh v.d., 2008; Leendertz v.d., 2010; Schulze v.d., 2010).

a-Si:H/c-Si heteroeklemlerde oluşan bant bükülmeleri ve bant ofsetleri arayüz yeniden birleşmelerini ve yük taşıyıcılarının hareketlerini etkilemektedirler. Azınlık taşıyıcısı bant ofsetleri a-Si:H/c-Si arayüzde yüksek bir değere sahip ise yük taşınımının etkilendiği belirlenmiştir (Stangl v.d., 2001; Wang v.d., 2010). a-Si:H(p)/c-Si(n) yapılı gözelerde değerlik bantı ofseti değeri arttıkça gözenin başarımlı değerlerin düştüğü gözlenmiştir fakat en ciddi düşüş dolum çarpanı ve ona bağlı olarak verimde gözlenmiştir. Yayıcı tabakanın aktivasyon enerjisinin yüksek olduğu durumlarda başarımlı değerleri değerlik bantı ofsetinden daha çok etkilenmişlerdir (Datta v.d., 2010). Wang vd.'nin çalışmalarında (2010) a-Si:H(n)/c-Si(p) yapılı göze modellerinde, a-Si:H(i) tabaka olmadığı durumlarda, iletim bantı ofseti arttıkça (0,45 eV'a kadar) açık devre gerilimi, dolum çarpanı ve verim artmıştır. a-Si:H(i) içeren HIT göze modellerinde ise iletim bantı ofseti artarken açık devre gerilimi ve verim az miktarda artmıştır. Datta vd. çalışmalarında (2010) iletim bantı ofsetinin 0,3 eV olduğu değere kadar açık devre gerilimi ve kısa devre akımında artış görmüşlerdir. Aynı çalışmada c-Si(p)/a-Si:H(p) arka arayüzde değerlik bantı ofseti değeri arttıkça açık devre gerilimi sabit kalırken, dolum çarpanı ve verim ani bir şekilde düşmüştür. Kısa devre akımı ise bu değerlerin yüksek olduğu değerlerde düşmüştür. a-Si:H(p) aktivasyon enerjisinin yüksek olduğu durumlarda bu etki daha belirgin hale gelmiştir. Maydell vd. çalışmalarında (2005a) n/p yapılı örneklerinde iletim bantı ofseti 0,15 eV olduğunda, arayüz kusur yoğunluğu $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ değerinden az iken kusur yoğunluğu artışı ile açık devre gerilimi değişmemiştir. 5×10^{10} ile $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ arasında olan kusur yoğunluğu değerleri için ise açık devre gerilimi azalmıştır. İletim bantının 0,45 eV olduğu durumda ise açık devre gerilimindeki düşüş kusur yoğunluğunun $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ değerinde başlamıştır.

Son yıllarda etkisinin incelenmeye başladığı bir diğer konu yüzey dokulanmasıdır. Göze ya da c-Si soğurucu tabakaya giren ışınlam miktarını arttırmak amacı ile TCO veya c-Si yüzeyleri piramit şeklinde dokulandırılmaktadır. Wang v.d. çalışmalarında (2005b) ITO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Al-BSF yapılı örneklerinde, dokulanmış c-Si(p) ile dokulanmamış örnekleri karşılaştırmışlar ve dokulanmanın açık devre gerilimini etkilemediğini görmüşlerdir. Çalışmalarında c-Si(n/p) üzerine HWCVD tekniği ile a-

Si:H(p/n)/a-Si:H(i) yayıcı tabaka ve arkasına yine HWCVD tekniği ile a-Si:H(i)/a-Si:H(n/p) BSF tabaka uygulamışlardır. a-Si:H BSF'li dokulanmış c-Si(p) kullanılan örneklerinde açık devre gerilimi ve dolum çarpanı için dokulanmamış örneklere göre daha düşük değerler elde edilirken, kısa devre akımı ve verim değerleri yüksek çıkmıştır (Wang v.d., 2008). Dokulanmış c-Si(n) dilim kullanılmış örneklerde ise dolum çarpanı da daha yüksek ölçülmüş fakat açık devre gerilimi oldukça düşük çıkmıştır. Bu sonucun, dokulandırılmış yüzeylerin temizliğinin zorluğu nedeniyle ortaya çıktığını belirtmişlerdir (Wang v.d., 2008).

Göze maliyetlerini azaltmak için kuşkusuz c-Si(p) soğurucu kalınlığının inceltilmesi gerekmektedir. Göze maliyetini azaltmak için bir diğer yöntem de daha az maliyetli bir soğurucu tabaka malzemesi seçmektir. Bu amaçla Maydell vd. Almanya çapında bir çalışma (2005b) yapmışlar ve pahalı olan tek kristal silikon dilimler yerine daha uygun fiyatlı çoklu kristal silikon (mc-Si) ve “*edge-defined film-fed grown*” tekniği ile hazırlanmış EFG-Si soğurucu tabaka ile silikon heteroeklem güneş gözesi yapmayı amaçlamışlardır. Aynı zamanda gözenin güneş ışınımını almayan yüzü için farklı arka taraf (rear side) denemeleri yapmışlardır. a-Si:H(n)/c-Si(p) yapıları gözelerde difüze edilmiş arka bölge (rear side) kullanıldığında ve a-Si:H(p) kullanıldığında açık devre gerilimi sırası ile 635 ve 634 mV olarak ölçülmüştür. Stuttgart Üniversitesi tarafından hazırlanan difüze edilmiş ön taraf ile a-Si:H(i,p)/ μ c-Si(p)/TCO arka taraflı örnekte ise 678 mV açık devre gerilimi ve %21 verim elde etmişlerdir. Farklı soğurucu malzeme kullandıkları örneklerde ise 1 cm² a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p) yapıları gözede %17,1, a-Si:H(p)/c-Si(n)/a-Si:H(n) %18,2, 10 cm² a-Si:H(n)/mc-Si(p) yapıları örneklerinde %12,9 ve a-Si:H(n)/EFG-Si(p)/a-Si:H(p) yapıları örneklerinde %12,7 verim değerine ulaşmışlardır (Maydell v.d., 2005b).

Verimi arttırmak adına son yıllarda farklı yaklaşımlar içeren çalışmalar da yapılmaktadır. Lu v.d. çalışmalarında (2007a) düşük sıcaklık (200°C'nin altında) ile uygulanabilen birbirine geçmiş arka kontak (interdigitated back contact-IBC) yapı uygulaması denemişlerdir. Bu yapıda c-Si yüzeyi pasifleştirmek amacı ile c-Si(n) dilimin ön yüzüne a-Si:H(i) uygulanmış, arka yüzüne ise birbirine temas etmeyen a-Si:H(p) ve a-Si:H(n) tabakalar yanyana uygulanmış, a-Si:H'ların da yüzeyine kontak uygulanmıştır. Bu yapı ile 1,32 cm² alana sahip %11,8 verim değerine ulaşmışlar, basit heteroeklemlere yakın bir değer olan 602 mV açık devre gerilimi elde etmişlerdir. PC1D yazılımı ile yapılan modellemeler ile arka yüzeydeki katkılanmış a-

Si:H'lar üzerine a-Si:H(i) tabaka koyduklarında açık devre geriliminin 702 mV değerine yükseldiğini hesaplamışlardır. (Lu v.d., 2007a). Aynı yıl Lu v.d. Setaurus Device yazılımı ile IBC heteroeklem güneş gözesinin yüzey yeniden birleşme hızının 10 cm/s değerine geldiğinde %22 verime ulaşabileceğini görmüşlerdir (Lu v.d., 2007b). Diouf v.d. yaptıkları çalışmada (2009) ATLAS 2-D yazılımı ile IBC heteroeklem güneş gözelerinde optimizasyon çalışması yapmış ve yüksek kaliteli attaş ve yüzey rekombinasyon hızının 10 cm/s olması koşulunda verimin %24'e ulaşmasını beklemişlerdir (Diouf v.d., 2009).

Sanyo, 2010 yılında piyasaya sürdükleri 240W'lık %19 verimli modülleri ile o yılın en yüksek HIT göze verimine ulaşan şirket olmasının yanısıra, a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözesi seri üretiminini de yapan tek şirkettir. Çalışmalardan görüldüğü gibi birçok çalışma grubu yüksek verim potansiyeline sahip a-Si:H/c-Si heteroeklem yapılar üzerine çalışmaktadır. Fakat Sanyo'nun elde ettiği verime şu ana dek ulaşamamıştır. Henüz, arayüzlerin ve yapının fiziğinin tam olarak anlaşılamamış olması göze verimlerini arttırmayı engellemektedir.

Modelleme çalışmaları deney yapmaksızın farklı parametrelerin göze başarımına etkilerini inceleme konusunda, en yüksek başarımı elde etmek için en uygun değerleri bulmak konusunda oldukça yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda bu güneş göze yapılarının fiziğini anlayabilmek ve bu yapılarda yenilik yapabilmek için çok önemli bir araçtır. Bu sebeple tez kapsamında AFORS-HET yazılımı kullanılarak a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözelerinin bilgisayar modellemesi yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözelerinin fiziğini anlamak ve bu gözeler için en iyi göze parametrelerinin bulunabilmesi amacıyla,

- farklı c-Si(p) kusur özelliklerinin ve kusur yoğunluğu değişiminin,
- kullanılan tüm tabakaların kalınlığının,
- a-Si:H/c-Si arayüzlerdeki kusur yoğunluğunun,
- a-Si:H(i) tampon tabaka kullanımını
- BSF tabaka kullanımının,

- BSF tabakanın mobilite aralığı değerinin değişiminin

etkileri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda yüksek göze verimlerine ulaşmak için en uygun değerler belirlenmiş, çinko oksit (zinc oxide-ZnO) ve ITO ön kontaklar ile bu değerler kullanılarak modeller geliştirilmiştir. Bu modellerde yüzey dokulanmasının etkisi de incelenmiştir.

Tezin ilk kesimi olan Giriş Kesimi'nde, literatürde yapılan çalışmaların bir özeti verilmiştir. Tezin devam eden ikinci kesiminde ise güneş gözelerinin fiziği ve giriş kısmında anlatılan parametrelerinin göze başarımına etkilerinin kuramsal açıklaması yapılacaktır. Tezin üçüncü kesiminde ise AFORS-HET yazılımı tanıtılacak ve yazılımın hesaplamaları hangi eşitlik ve koşullar için çözdüğü açıklanacaktır. Tezin dördüncü kesiminde, a-Si:H(n)/c-Si(p) yapıdaki heteroeklem güneş gözelerinde tabakaların nasıl modellendiği anlatılacak ve modelleme sonuçları verilecektir. Daha sonra en uygun koşulların belirlenmesi için parametrelerin değişiminin etkisi ve BSF a-Si:H(i) tabakaların etkisi modellemeler yardımı ile incelenecektir. Sonuç kesiminde ise çalışmadan elde edilen bulgular verilecek ve bulunmuş en uygun koşullar kullanılarak yapılan modelleme açıklanacaktır.

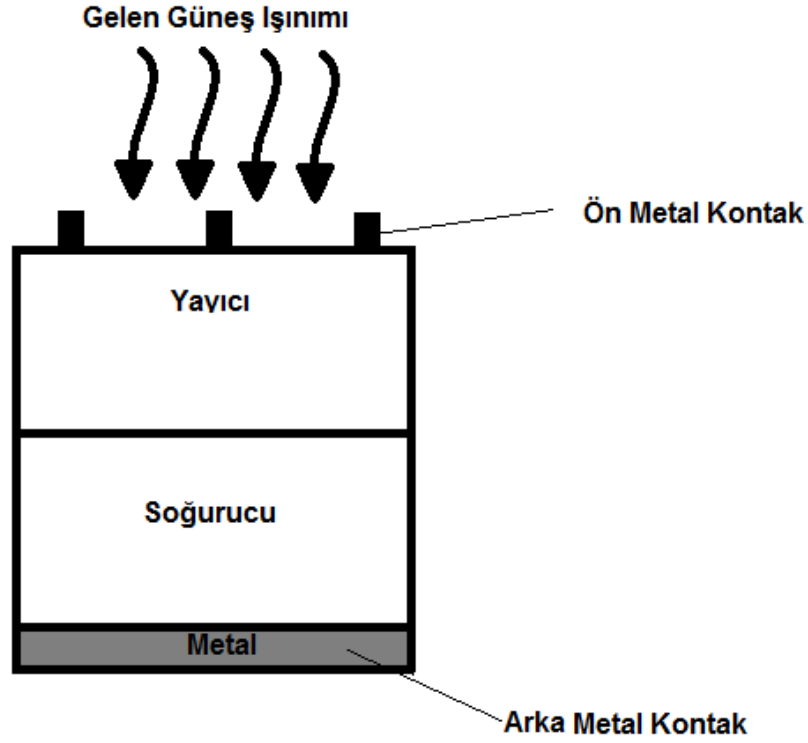
2. KURAMSAL KESİM

2.1. Güneş Gözelerinin Fiziği

Güneş gözeleri, Güneş'ten gelen ışınımı fotovoltaiik etki sayesinde doğrudan elektrik enerjisine çeviren elektronik devre elemanlarıdır. Göze üzerine ışınım düştüğünde kullanılan yarıiletkenin bant aralığından yüksek enerjiye sahip fotonlar malzeme tarafından soğurulur. Bu soğurma sonucunda serbest elektron ve deşikler oluşur. Serbest elektron ve deşiklerin ayrılarak dış devreye yayılmasını sağlamak amacıyla göze içinde bir elektrik alan oluşturmak için p-n eklemi kullanılmaktadır. Pratik olarak bütün güneş gözeleri yarıiletken malzemelerden üretilen bir *p-n* ekleminden oluşur. Yarıiletken malzeme güneş spektrumunun büyük bir kısmını soğurabilecek özellikte olmalıdır. Bir güneş gözesi temel olarak yayıcı tabaka, soğurucu tabaka ve kontaktardan oluşmaktadır. Basit bir tek eklemli güneş gözesi kesitinin çizimi Şekil 2.1'de görülmektedir. p-n eklemine bulunan yarıiletkenlerden yayıcı tabaka görevini üstlenecek yarıiletken pencere özelliği göstermelidir. Pencere özelliği malzemenin olabildiğince az ışınım soğuran malzeme özellikleri göstermesidir. Pencere özelliği gösteren yayıcı tabakadan geçen güneş ışınımı soğurucu tabakaya gelir ve soğurucu tabakada soğurulur. Fotonun soğurulmasından sonra oluşan elektron-deşik çiftleri eklem bölgesinde üretilir. Eklem içinde oluşan elektrik alan n-türü bölgeden p-türü bölgeye doğru olduğundan, elektrik alanı elektronları aniden n-türü bölgeye deşikleri de p-türü bölgeye sürükler. Eklem bölgesinden sürüklenen taşıyıcılar, vardıkları bölgelerde, özellikle eklem kenarlarında, çoğunluk taşıyıcılarının konsantrasyonunu artırırılar. Daha sonra bu aşırı fazla çoğunluk taşıyıcıları eklemde öteye yayılırlar. Eklem her iki yanında çoğunluk taşıyıcılarının sayısının artması ile eklem her iki yanında gerilim farkı oluşur, ya da dış devrede akım gözlenir. Bu akım eklem bölgesinde üretilen elektron-deşik çiftlerinin sayısı ile doğru orantılıdır. Fotoakımı arttırmak için eklem boyunca daha fazla sayıda foton soğurulmalıdır.

Güneş gözelerinin başarımlarını değerlendirmesi genellikle **akım-gerilim karakteristikleri** (kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilim, dolum çarpanı ve verim) ve **iç veya dış kuantum verimi** ölçülerek yapılmaktadır. Bir güneş gözesinin aydınlık ve karanlık koşullarda akım-gerilim (I-V) eğrisi Şekil 2.2'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi aydınlık koşullarında I-V eğrisi koordinat sisteminin dördüncü

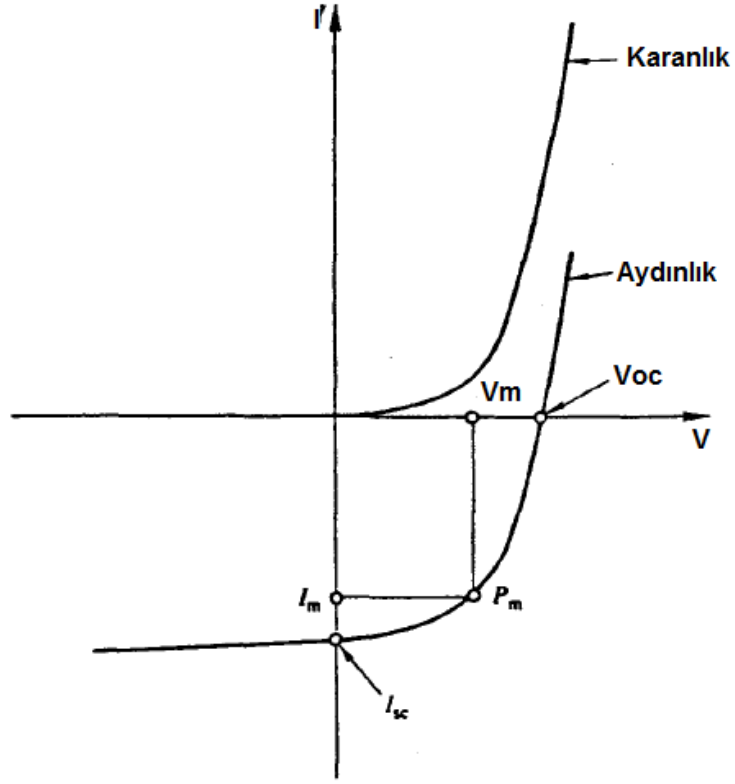
bölgesine kaymaktadır. I-V eğrisinin kayma miktarı kısa devre koşulları altında gelen ışınım sonucu üretilen akım miktarı yani kısa devre akımı kadar olacaktır.



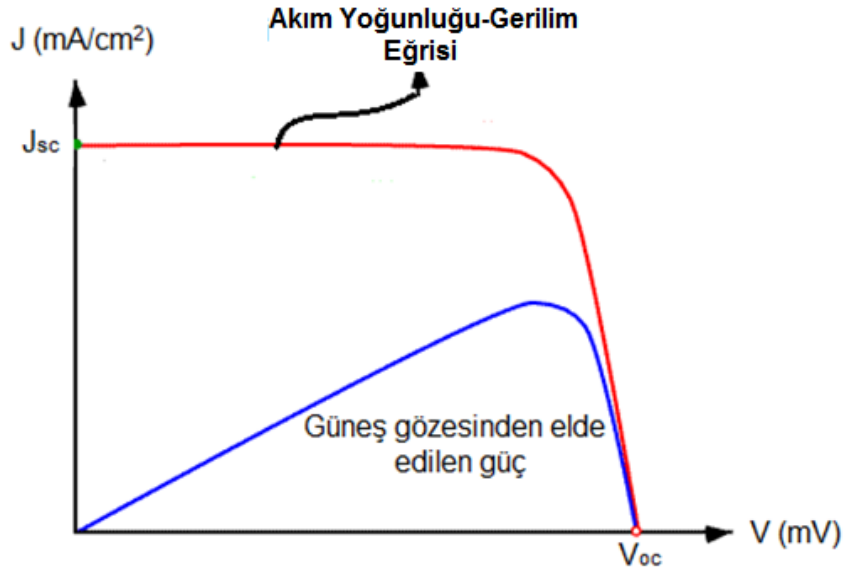
Şekil 2.1. Basit bir tek eklemlı güneş gözesi kesitinin çizimi

Bir p-n ekleminin, karanlıkta ve aydınlatma altındaki akım gerilim karakteristikleri göz önüne alındığında (Sze, 1985), gelen güneş ışınımı ile Şekil 2.2’de görüldüğü gibi güneş gözesinin I-V eğrisi, koordinat sisteminde dördüncü bölgeye kaydığından güneş gözesi çalışmalarında genellikle sadece dördüncü bölge incelenmektedir. Akım ve kısa devre akımı gözenin kesit alanına bağılı niceliklerdir. Gözeler farklı kesit alanlarında üretildiklerinden güneş gözesi çalışmalarında genellikle kesit alanından bağımsız, akım yoğunluğu bilgisi kullanılmaktadır.

Şekil 2.3.’te ideal bir güneş gözesinin aydınlıkta akım yoğunluğu-gerilim (J-V) eğrisi verilmiştir. Şekil 2.3.’te görülen eğride ulaşılabilir maksimum gücün, gerilim ve akım yoğunluğu değerinin en yüksek değerlerinde elde edildiği görülmektedir. Göze kısa devre durumundayken yük taşıyıcılarının dış devreye akışı sonucu oluşan akım kısa devre akımıdır (Short circuit current- J_{sc}). Göze açık devre durumda iken gözenin kontaktarı arasındaki potansiyel fark açık devre gerilimine (Open circuit voltage- V_{oc}) eşit olmaktadır.



Şekil 2.2. Bir güneş gözesinin karanlık ve aydınlıkta I - V eğrisi



Şekil 2.3. İdeal bir güneş gözesinin aydınlıkta J - V eğrisi

Güneş gözesi, bir diyota paralel bağlanmış bir akım kaynağı, onlara paralel şönt direnci ve seri bir direnç ile modellenenilmektedir (Bube, 1998). Gözelerin basit devre eşdeğeri Şekil 2.4'te verilmiştir.Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, ışınlm ile üretilmiş akım (I_L), devrenin güç kaynağı olarak işlev görmektedir. Diyotun üzerinden geçen akım karanlık koşulları altındaki akıma eşittir. R_s seri direnci, R_{sh} ise şönt direncini belirtmektedir.

Aydınlatma altında p-n eklemin akım yoğunluğu

$$J = J_0 \left(e^{qV/mkT} - 1 \right) - J_L \quad (2.1.)$$

eşitliğinden türetilmektedir. Bu eşitlikte,

J ; toplam akım yoğunluğu (mA/cm^2),

J_0 ; karanlık doyum akım yoğunluğu (mA/cm^2),

q ; elektron yükü (C),

V ; uçlar arasında oluşan potansiyel farkı (V),

T ; ortam sıcaklığıdır.

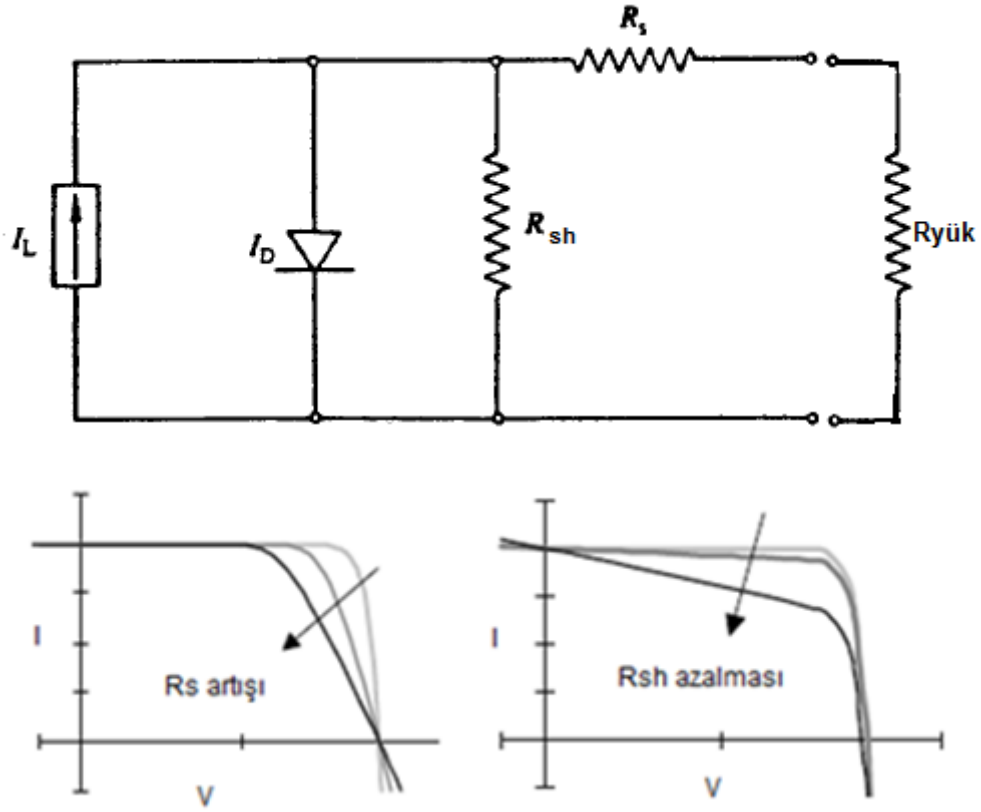
Kısa devre durumunda, gözenin uçları arasındaki potansiyel farkı sıfır olacağından kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), Eş 2.1.'den de hesaplanabileceği gibi $-J_L$ olacaktır. Açık devre durumunda ise gözeden geçen akım sıfırdır. Buna bağlı olarak açık devre gerilimi (V_{oc}),

$$V_{oc} = \frac{mkT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right) \quad (2.2.)$$

ile hesaplanabilmektedir. Açık devre gerilimini yükseltmek amacıyla katkılama yoğunluğu artırılarak nötral bölgelerdeki (uzay yük bölgesi dışında kalan bölgedeki) azınlık taşıyıcı yoğunluğu artırılabilenekte, katkılanmış bölgelerde difüzyon uzunluğu

arttırılabilmekte ve uzay yük bölgesindeki kusur yoğunluğu azaltılabilmektedir. (Nelson, 2010).

Kısa devre akımını artırmak için göze tarafından soğurulan ışıınım miktarını artırmak gereklidir. Bunun için yansıma önleyici kaplamalar ve göze giren ışıınının arka taraftan yansıyarak tekrar göze içine girmesini sağlayacak yansıtıcılığı yüksek arka kontaklar kullanılabilmektedir. Ayrıca göze malzemelerinin kalitelerini arttırarak etkin difüzyon uzunluğu arttırılabilmekte ve bu yolla kısa devre akımı yükseltilebilmektedir (Nelson, 2010).



Şekil 2.4. Bir güneş gözesinin eşdeğer devresi ve I-V eğrisinin şönt direnci ve seri direnç ile değişimi

Dolum çarpanı,

$$FF = \frac{P_m}{(I_{sc} V_{oc})} \quad (2.3.)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Eş 2.3'te kullanılan P_m (W) değeri gözeden elde edilebilecek maksimum gücü belirtir ve gözeden elde edilebilecek maksimum gerilim ve maksimum akım değerlerinin çarpımı ile hesaplanır. Dolum çarpanı (*Fill Factor-FF*), I-V eğrisinin kareliği şeklinde de açıklanabilmektedir.

Verim,

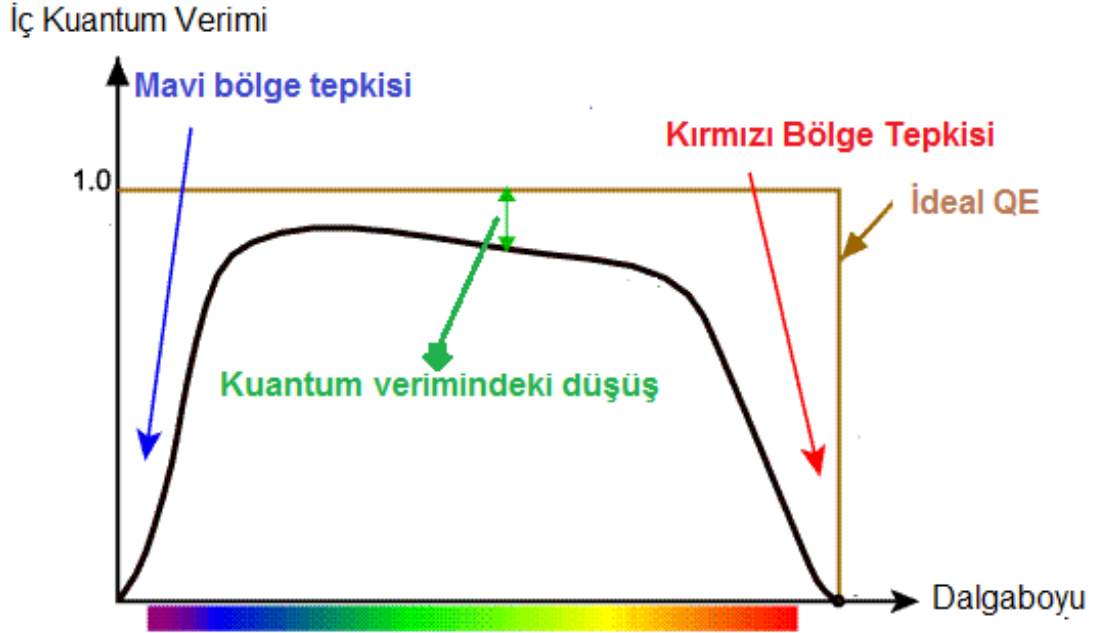
$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{giren}} \quad (2.4)$$

eşitliği ile verilir ve bu eşitlikte P_{giren} güneş gözesine gelen toplam güneş ışıdır. Açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve dolum çarpanı değerlerinin düşmesi verim (η) değerini düşürmektedir.

Dolum çarpanını ve dolaylı olarak göze verimini etkileyen bazı faktörler vardır. Bunlardan biri seri direnç etkisi (R_s) diğeride paralel direnç olarak modellenen şönt direncinin etkisidir (R_{sh}). Diğer bir deyişle, I-V eğrisi, gözenin seri direnci (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) ile değişmektedir. Paralel direnç etkisini kristal kusurları yaratırken, seri direnç etkisini yarıiletken malzemeye yapılan metal kontaklar, yarıiletken malzeme içindeki tabakaların iç dirençleri ve gözenin üst yüzeyindeki metalik parmak kontak dirençleri oluşturur. Seri direncin yüksek olması veya şönt direncinin az olması dolum çarpanını olumsuz etkilemektedir. Şekil 2.4'te seri direnç ve şönt direncinin I-V eğrisine ve dolayısı ile dolum çarpanına etkisi açıklanmaktadır. Şekil 2.4'ten görüldüğü gibi seri direncin, artışı ve şönt direncinin azalması gözenin dolum çarpanını olumsuz etkilemektedir. ***Dolum çarpanı değerini arttırmak için***; yükten arındırılmış bölgedeki “depletion region” kusurların azaltılması, ***seri direnci azaltmak için***; katkılama oranlarının artırılması, kontakların kesit alanının ve yoğunluğunun azaltılması, ***şönt direncinin büyüklüğünü arttırmak için*** ise soğurucu kalınlıklarının artırılması, arayüzlerin kalitesinin artırılması ve pasifleştirilmesi gerekmektedir (Nelson, 2010).

Kuantum verimi güneş gözesinden toplanan toplam yük taşıyıcısının gelen foton sayısına oranıdır. İdeal bir güneş gözesinin kuantum verimi eğrisi Şekil 2.5'te görülmektedir. Mavi bölgede spektral tepkinin ideal kuantum verimine göre azaldığı

görülmektedir. Bunun sebebi ön yüzeyde oluşan yeniden birleşmelerdir. Kırmızı bölgede oluşan tepki azalması ise uzun dalgalarda azalan soğurma, düşük difüzyon uzunlukları ve yetersiz arka yüzey pasifleştirilmesinden kaynaklanabilmektedir (PVCROM, 2011).



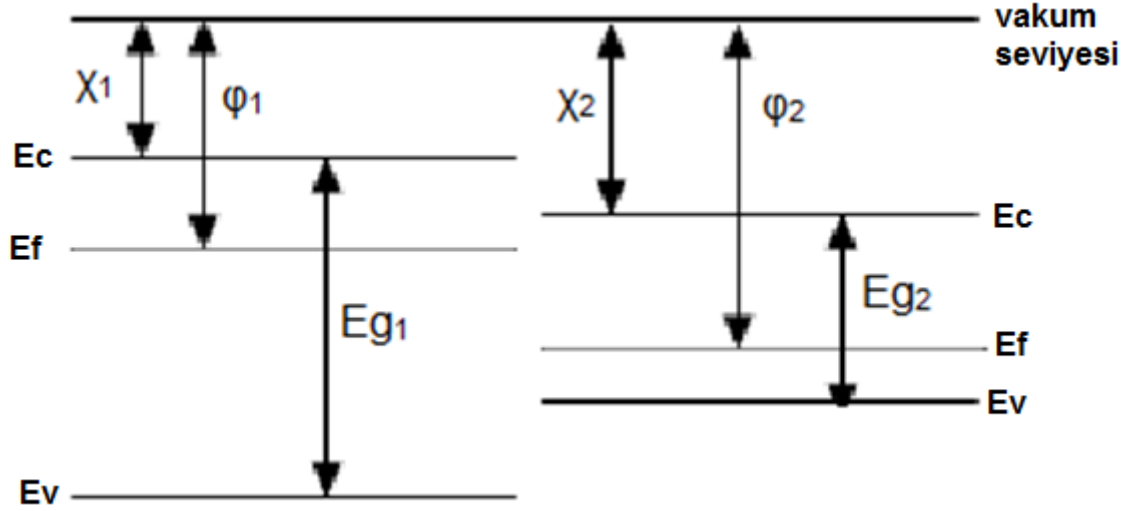
Şekil 2.5. İdeal bir gözenin QE eğrisi

2.2. a-Si:H/c-Si Heteroeklem Güneş Gözeleri

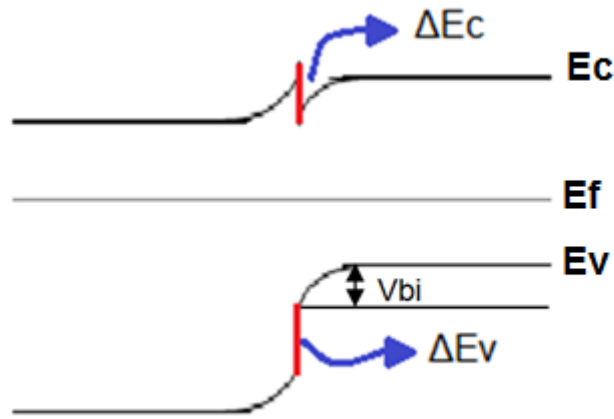
Heteroeklemler farklı tipte katkılanmış, bant aralığı farklı değerlerde olan, iki malzeme ile (hidrojenlendirilmiş amorf silikon ve kristal silikon, kadmiyum sülfid ve bakır indiyum diselenid gibi) eklem yapılarak hazırlanmaktadır. Bant aralığı yüksek n-tipi katkılanmış bir yarıiletken ile bant aralığı n-tipi katkılanmış yarıiletkenle kıyasla daha düşük olan p-tipi katkılanmış yarıiletken kullanılarak oluşturulan heteroeklemin, malzemelerin yalıtık durumdaki bant yapısı Şekil 2.6a'da, eklem oluşturulduğunda ısıtılma dengedeki bant yapısı Şekil 2.6b'de çizilmiştir.

Şekil 2.6a'da, χ ; elektron duygunluğunu, ϕ ; yarıiletken malzemenin iş fonksiyonunu, E_c iletim bantını, E_v değerlik bantını, E_f Fermi Düzeyini, E_g ise bant aralığını, 1 ve 2 alt indisleri ise yarıiletkenleri belirtmektedir. 1 ve 2 nolu yarıiletken metalurjik olarak biraraya geldiğinde Fermi düzeyleri Anderson Kuralı'na göre hizalanmaktadır

(Anderson, 1960). Şekil 2.6b’de görüldüğü gibi, hizalanma sonucunda iletim ve değerlik bantında **bant ofsetleri** oluşmaktadır. ΔE_c iletim bantı ofsetini, ΔE_v ise değerlik bantı ofsetini göstermektedir. ΔE_c ve ΔE_v , sırası ile Eş 2.5 ve Eş 2.6 ile hesaplanmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.6.a Bant aralığı yüksek n-tipi bir yarıiletken ile bant aralığı düşük p-tipi yarıiletken malzemenin yalıtık durumda bant yapısı

b. Oluşan heteroeklemin bant yapısı.

$$\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2 = \Delta \chi \quad (2.5.)$$

$$\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta \chi \quad (2.6.)$$

Eş 2.5 ve Eş 2.6 kullanılarak, iki yarıiletkenin bant aralığı farkı

$$\Delta E_g = \Delta E_c + \Delta E_v \quad (2.7.)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

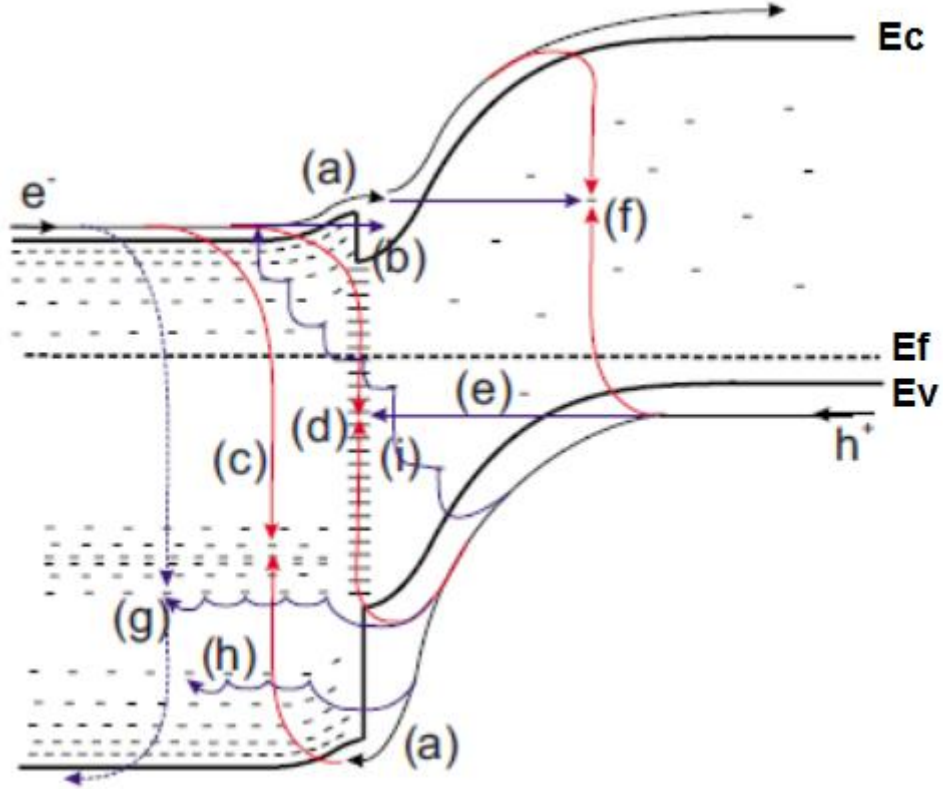
Basit a-Si:H/c-Si heteroeklemler, n ya da p tipi katkılanmış geniş bant aralıklı a-Si:H yayıcı tabaka ile daha dar bant aralıklı, a-Si:H'a göre ters tipte katkılanmış c-Si ile oluşturulmaktadır. Ön kontak tarafında, yansıma önleyici kaplama görevi görmesi için gözenin güneş ışınımı alan yüzeyine TCO uygulanmaktadır. Ayrıca yük taşıyıcılarının toplanması için gözenin arka ve ön kısmına metal elektrodlar bulunmaktadır.

İdealde güneş ışınımının a-Si:H yayıcı tarafından soğurulmaması ve yayıcıdan soğurulmaksızın geçen fotonların c-Si'de soğurulması beklenmektedir. Fakat a-Si:H yayıcı tabakada da bir miktar soğurma olmakta ve bu tabakada yaşanan soğurmanın olabildiğince engellenebilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Soğurulan fotonlar elektronların ve deşiklerin üretilmesine yol açmaktadır. Örnek olarak a-Si:H(n)/c-Si(p) yapılı bir heteroeklemde elektron ve deşiklerin olası hareket yolları Şekil 2.7'de görülmektedir. Şekilde E_c iletim bantını, E_v değerlik bantını, E_f Fermi Düzeyini göstermektedir.

Şekil 2.7'de görülen (a) ile gösterilmiş yollar yük taşıyıcılarının bant ofsetleri ve atmacıkların (spike) zorlaması ile yaptığı hareketi, (b) ile gösterilmiş yollar bant atmacıklarından tünelleme ile geçişi, (c) ise bant aralığı durumlarında gerçekleşen yeniden birleşmeleri göstermektedir. Yeniden birleşme yolları arayüz yeniden birleşmeleri (d), hacimsel yeniden birleşmeler (g-f), metal kontaklarda yaşanacak yeniden birleşmeler olarak sınıflandırılmaktadır (Iencinella v.d., 2004; Schulze v.d., 2010). Yeniden birleşme gelen güneş ışınımının ürettiği deşik ve elektronun birleşmesi ile yaşanmakta ve yeniden birleşen yük taşıyıcıları akıma katkıda bulunamamaktadır. Bu sebeple yeniden birleşmeler göze başarımını özellikle açık devre gerilimini düşürmektedir. Delfina v.d. çalışmalarında (2008) bu etkiyi,

$$V_{oc} = V_{bi} - \text{Yeniden Birleşme etkisi} \quad (2.8)$$

eşitliği ile göstermiştir (Dao v.d., 2010). Eş 2.8 yorumlandığında, yüksek açık devre gerilimi değeri elde etmek için, V_{bi} yapı potansiyelinin de önemli bir parametre olduğu görülmektedir.



Şekil 2.7. a-Si:H(n)/c-Si(p) yapılı bir heteroeklemede yük taşıyıcılarının hareketleri (Schulze v.d., 2010).

Yapı potansiyeli ısı dengede yükten arındırılmış bölge boyunca oluşmuş potansiyel farkı ya da güneş ışınımı altında sözde Fermi düzeyleri arasındaki farkı belirtmektedir. Yüksek bant bükülmesi beraberinde yüksek yapı potansiyeli getirmektedir. Yapı potansiyeli yükseldikçe c-Si soğurucuda azınlık taşıyıcıları için bir ters dönme (inversion) bölgesi oluşmaktadır. Bu bölgeye gelen çoğunluk taşıyıcıları güçlü ters dönme bölgesi sayesinde arayüze girememektedirler ve arayüz yeniden birleşmesine uğramamaktadırlar. Bu da açık devre gerilimini yükseltmektedir. Fakat bant bükülmesi ve bant ofsetleri yük taşınımını olumsuz etkileyecek büyüklüğe gelirlirse dolum çarpanı azalacaktır. Dolum çarpanı azalması, artan açık devre

gerilimi değeri ile kompanse edilemeyecek kadar büyüyecek ve göze başarımı düşecektir (Froitzheim v.d., 2002).

Açık devre geriliminin yeniden birleşmelere bağıllığı aynı zamanda Eş 2.9 ile de açıklanabilir. Yeniden birleşmelerin artması difüzyon uzunluğunun ve taşıyıcı ömür süresini (τ) azalmasına yol açacaktır. Eş 2.9'a göre taşıyıcı ömür süresi azaldıkça doyum akımı da artmaktadır (Sze, 1985). Doyum akımının artması da Eş 2.2'ye göre açık devre gerilimini azaltmaktadır.

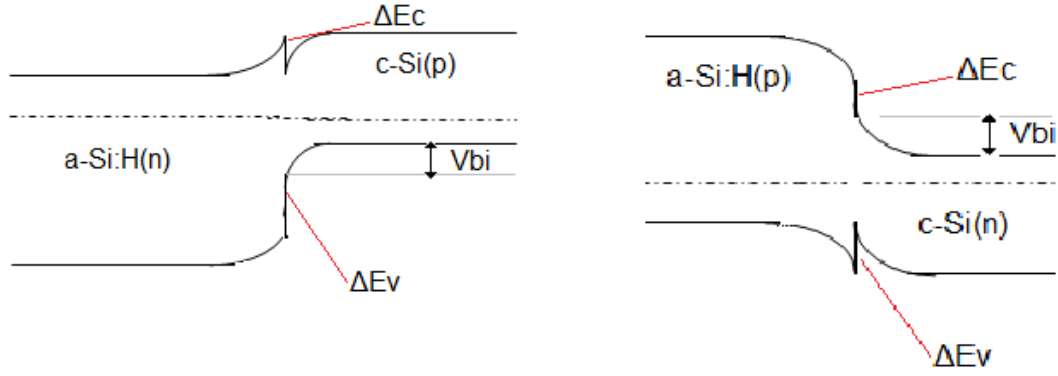
$$J_0 = qA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_d} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_a} \right) \quad (2.9)$$

Eş 2.9'da q yükü (C), A kesit alanını (cm^2), D_n ve D_p sırası ile elektron ve deşik difüzyon sabitini (cm^2/s), τ_n ve τ_p sırası ile elektron ve deşik ömür süresini (s), n_i intrinsik yük taşıyıcı miktarını (cm^{-3}), N_a ve N_d sırası ile alıcı ve verici tipi katkılama yoğunluğunu (cm^{-3}) tanımlamaktadır.

Basit a-Si:H/c-Si heteroeklemlerde yük taşıyıcılarının hareketi bant süreksizliğinden oldukça etkilenebilmektedir. c-Si soğurucudaki azınlık atmacık kenarındaki bant ofseti çok büyükse, yükler bant ofsetin yarattığı potansiyel kuyusunda birikmektedirler (accumulation). Birikme sonrasında gelen diğer azınlık taşıyıcıları biriken taşıyıcılar tarafından itilmekte ve ters bir difüzyon oluşmaktadır. Oluşan ters difüzyon c-Si soğurucu içerisinde yeniden birleşmelere yol açmakta bu durum da göze başarımını olumsuz etkilemektedir (Datta v.d., 2010).

Şekil 2.8'de a-Si:H(n)/c-Si(p) ve a-Si:H(p)/c-Si(n) yapılı basit heteroeklem güneş gözelerinin bant yapısı görülmektedir. n/p yapı ile p/n yapı, bant ofsetler açısından karşılaştırılırsa p/n yapıda c-Si (n) azınlık taşıyıcısı deşikler için oluşan bant ofseti (ΔE_v) değeri, n/p yapıda c-Si (p) azınlık taşıyıcısı elektronların karşılaştığı bant ofseti değerinden (ΔE_c) daha yüksek olarak elde edilmektedir (Stangl v.d. 2001). Yüksek azınlık taşıyıcı bant ofseti beraberinde yüksek bant bükülmesini getirecektir. Artan bant bükülmesi ile birlikte önceden de belirtildiği gibi arayüz yeniden birleşmesi

engellenecektir. Bunun sonucu olarak bant ofsetler açısından incelendiğinde p/n yapı n/p yapıya göre daha yüksek başarımlı potansiyeline sahip olmaktadır.

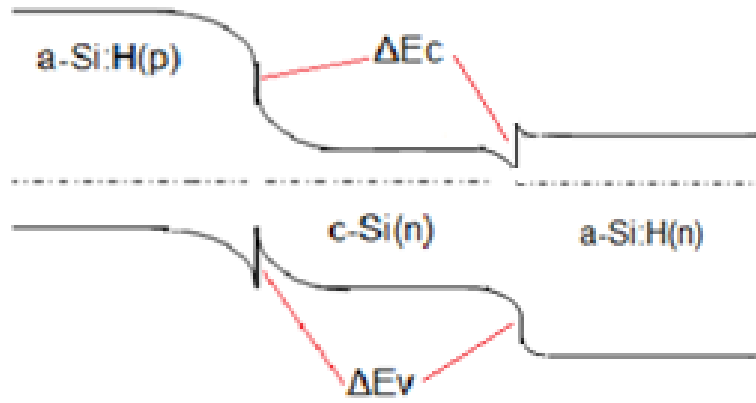


Şekil 2.8. a-Si:H(n)/c-Si(p) ve a-Si:H(p)/c-Si(n) yapıları heteroeklem güneş gözelerinde bant ofset ve bant bükülmeleri

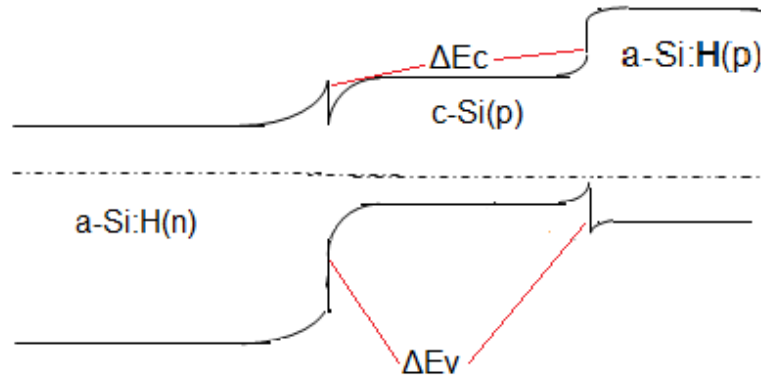
p/n yapı ile n/p yapı karşılaştırılması yapılmak istendiğinde bir tek bant ofsetlerinin etkisi incelenmemelidir. Aynı zamanda yayıcı ve soğurucu tabakadaki azınlık taşıyıcılarının mobilitesi de bu yapılarda farklı değerler almakta ve göze başarımlı potansiyelinde farklılıklar yaratmaktadır. Soğurucudaki azınlık taşıyıcı mobilitesi p/n yapıda (yaklaşık $450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$), n/p yapıya göre (yaklaşık $1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) daha düşüktür. c-Si'deki azınlık taşıyıcı mobilitesi yüksekse bu taşıyıcıların arka kontakta yeniden birleşme olasılığı daha yüksek olmakta ve açık devre gerilimi daha düşük olmaktadır. Bunun yanında yayıcı mobiliteleri incelendiğinde p/n yapıdaki azınlık taşıyıcı mobilitesi (yaklaşık $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$), n/p yapıdaki azınlık taşıyıcı mobilitelerinden (yaklaşık $5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) daha yüksektir. Bu sayede p/n yapıdaki yük taşıyıcıları yüksek kusura sahip olan a-Si:H yayıcı tabakada tuzaklanmaksızın hareket edebilirler. Bu durum kısa devre akımını artırmaktadır (Stangl v.d.,2001). Bu incelemelerden de görülebileceği gibi Sanyo'nun kullandığı yapı olan p/n yapı, n/p yapıya göre daha yüksek göze başarımlı potansiyeline sahiptir.

c-Si yüzeyinde bulunan kopuk bağlar yük taşıyıcıların girebilecekleri durumlar oluşturmakta ve göze başarımlı olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple bu kusurların yük taşınımını etkilememesi için doyurulması gerekmektedir. Kopuk bağların

doğurulması işlemine pasif hale getirme-**pasivasyon** adı verilmektedir. Kopuk bağlar atomik hidrojen ile doğurulabilmektedirler (Bube, 1998). a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözelerinde c-Si üzerine katkılanmış veya katkılanmamış a-Si:H büyütülerek, hidrojen atomları kopuk bağlara bağlanabilmekte bu sayede kopuk bağlar doğurulabilmektedir. Fakat c-Si yüzey üzerinde katkılanmış a-Si:H büyütüldüğünde katkılama malzemeleri de yüzeye bağlanabilmektedirler. Bu durum da arayüzde durumlar oluşmaktadır. a-Si:H(i) tabaka kullanıldığında katkılanmış tabaka ile c-Si ayrılmakta ve katkılanma malzemelerinin etkilerinden kaçınılmaktadır (Taguchi v.d., 2005b). Bu tabakanın bir diğer etkisi şu şekilde açıklanabilir; a-Si:H(n,p)/a-Si:H(i) yayıcı tabakanın aynı kalınlıktaki a-Si:H(n,p) yayıcıya göre daha az kusur yoğunluğuna sahip olması yapıdaki yeniden birleşmeler azalmakta ve daha fazla yük taşıyıcısı kontaklardan toplanabilmektedir (Stangl v.d., 2001). Aynı zamanda yük taşıyıcıları ilk olarak katkılanmış a-Si:H'nin bant ofseti ile karşılaştıklarında hareketleri engellenebilmektedir. İnce a-Si:H(i) kullanıldığı durumlarda yük taşıyıcıları tünelleme ile a-Si:H(i) tabakadaki bir duruma yerleşebilmekte ve oradan katkılanmış a-Si:H tabakaya geçiş yapabilmektedirler. (Wang v.d., 2004). Bu kademe kademe geçiş yolu ile yüksek bant ofseti durumunda karşılaşılabilecek yük taşınımının olumsuz etkilenmesi engellenebilmektedir. Bu olumlu etki özellikle yüksek azınlık taşıyıcısı bant ofsetine sahip p/n yapıli heteroeklem güneş gözesinde gözlenmektedir (Wang v.d., 2004).



Şekil 2.9. a-Si:H(p)/c-Si(n)/a-Si:H(n) yapıli bir heteroeklem güneş gözesinin bant yapısı



Şekil 2.10. a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p) yapıli bir heteroeklem güneş gözesinin bant yapısı

Şekil 2.9'da a-Si:H(p)/c-Si(n)/a-Si:H(n) yapıda ve Şekil 2.10'da a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p) yapıda heteroeklem güneş gözelerinin bant yapısı görölmektedir. a-Si:H(i)/a-Si:H(p,n) yapıda BSF kullanıldığında ise a-Si:H(i) tabakanın bant aralığı a-Si:H(p,n)'den daha büyük olduğundan bant ofset değeri artmaktadır. c-Si(n) kullanılarak hazırlanan gözelerde, c-Si(n)/a-Si:H(i,n) arayüzde oluşan iletim bantı ofseti küçük olacağından çoğunluk taşıyıcısı elektronların arka kontağa geçişi için engel teşkil etmeyecektir. Fakat c-Si(p) soğurucu ile hazırlanan gözelerin çoğunluk taşıyıcısı deşikler için, zaten yüksek olan değeri bant ofseti a-Si:H(i) kullanımı ile daha da artacaktır. a-Si:H(p)'ye geçemeyen deşikler c-Si(p)/a-Si:H(i,p) arayüzde oluşan potansiyel kuyusunda birikeceklerdir. Birikme sonucu a-Si:H(p)'ye ulaşmaya çalışan deşikler itilecekler ve arka kontağa ulaşamayacaklardır (Wang v.d., 2004). Geriye doğru difüzyonları sonucu yeniden birleşmeye uğrayacaklardır. Bu durumda

özellikle dolum çarpanı ani bir şekilde düşecektir. Yük taşıyıcılarının az toplanması sonucu kısa devre akımı da azalacaktır (Datta v.d., 2010).

Göze başarımı üzerine yapılan çalışmalarda yayıcı tabakaların kalınlığı da incelenmesi gereken bir parametredir. Yayıcı tabakanın gelen ışınımı soğurmaksızın soğurucu tabakaya geçirmesi yani pencere tabaka özelliği göstermesi beklenmektedir. Bunun sebebi c-Si homoekelemlerden farklı olarak bu tabakanın yüksek kusura sahip olması ve oluşan yüklerin burada yapı yeniden birleşmesine uğramasıdır. Fakat gerçek düzeneklerde bu tabaka da bir miktar soğurma yapmaktadır. Bu sebeple bu tabaka ne kadar ince tutulursa gelen güneş ışınımını o kadar az soğuracak ve yük taşıyıcılarının büyük kısmının soğurucu tabakaya geçmesini sağlayacaktır. Yayıcı kalınlığı arttıkça a-Si:H malzeme mavi bölgesinde soğurma yapmakta ve kuantum verimi eğrisinin mavi bölgesinde azalma olmaktadır. c-Si'nin soğuracağı ışınım enerjisi azalacağından üretilen yük taşıyıcısı azalacak kısa devre akımı azalacaktır.

c-Si soğurucu tabaka kalınlığı ise göze başarımını a-Si:H yayıcı tabaka kadar etkilememektedir. Fakat bu tabakanın kalınlığı azaldığı zaman soğurulan ışınım miktarı da azalacağından gözenin kısa devre akımı düşebilmektedir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken nokta da yük taşıyıcılarının difüzyon uzunluğunun soğurucu kalınlığından daha uzun olması gerekliliğidir. Bunlara ek olarak c-Si tabaka kalınlığının azalması ile birlikte a-Si:H uygulanması sırasında sıcaklıktan dolayı bükülme yaşanabilmektedir (Tsunomura v.d., 2008). c-Si tabaka kalınlığının azaltılması göze maliyetini de azaltacağından en uygun c-Si soğurucu kalınlığını seçmek büyük önem taşımaktadır.

a-Si:H BSF tabakalarının kalınlığı ise a-Si:H yayıcı tabaka kalınlığının aksine önemsizdir. Fakat bu tabakanın kalın tutulması, yapı yeniden birleşmelerini arttıracığından ve iletkenliğini azaltacağından kalınlığının az tutulması tercih edilmektedir. Maydell vd.'nin çalışmalarında (2006a) belirttikleri gibi seri direnç baskın hale gelene kadar BSF kalınlığı arttırılabilmektedir.

Tabakaların kalınlıklarının yanısıra katkılamaasının da göze başarımına etkisi olmaktadır. Bu sebeple tabaka katkılama yoğunluklarının incelenmesinde fayda vardır. Yayıcı tabakanın katkılamaası artarsa, a-Si:H yayıcının iş fonksiyonu azalacak

ve Eş 2.10 ile uyumlu olarak c-Si bant bükülmesi artacaktır. Bu azalma sonucu Eş 2.8'e göre açık devre gerilimi de artacaktır. Maydell vd. (2006a) de çalışmalarında yüksek açık devre gerilimi elde etmek için Fermi Düzeyinin bant kenarlarına yakın olması gerektiğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda yapılan deneysel çalışmalarda yayıcı katkılama yoğunluğunun artışının a-Si:H malzemenin düzensizliğini (Urbach Enerjisini) arttırdığı gözlenmiştir (Maydell v.d., 2006a; 2006b; Conrad v.d., 2006; Schmidt v.d., 2007; Korte v.d., 2009). Bu durum arayüzdeki durumları dolayısı ile yeniden birleşmeleri arttırmaktadır. Maydell vd. de çalışmalarında yayıcı katkılama ile arayüzde kusurlar yaratılabileceğini optimum katkılama yoğunluğu değerlerinde kusur yoğunluğunun az olduğu gözlenmiştir (Maydell v.d.,2005a). Bu olumsuz etkilerin yanısıra yayıcı tabaka katkılama artış ile Fermi düzeyi bant kenarlarına yaklaşmakta yani a-Si:H içindeki yeniden birleşme merkezlerinden uzaklaşmaktadır. Bu da a-Si:H içinde gerçekleşebilecek olan yapı yeniden birleşmelerini azaltmaktadır. Tüm bu durumlar incelendiğinde yayıcı tabaka katkılama yoğunluğu için en uygun hazırlama koşullarının belirlenmesi gerekmektedir.

$$V_{bi} = |\varphi_{c-Si} - \varphi_{a-Si:H}| \quad (2.10)$$

c-Si tabakanın katkılama yoğunluğunun artması ile tabakanın öz direnci azalmakta ve buna bağlı olarak iş fonksiyonu değeri azalmaktadır. Bu azalma Eş 2.10'a göre bant bükülmesini arttırmaktadır. Bant bükülmesinin artışı önceden de bahsedildiği gibi arayüz yeniden birleşmelerini azaltmakta ve açık devre gerilimi değerini arttırmaktadır. Schaffarzik vd. de çalışmalarında (2005) c-Si(p) öz direncinin azalmasının (katkılama yoğunluğunun artmasının) bant bükülmesini arttıracak dolayısı ile arayüz yeniden birleşmelerinin baskın hale geleceğini belirtmişlerdir. Fakat c-Si katkılama yoğunluğu artışı en uygun koşullarda bir değerin üzerine çıktığında yani öz direnci uygun koşullarda bir değerin altına indiğinde yapıdaki Schokley-Read-Hall yeniden birleşmelerini arttıracak dolayısı ile göze başarımı düşecektir (Jensen v.d., 2002).

a-Si:H BSF tabakalarının katkılanması incelendiğinde ise katkılama arttıkça a-Si:H iş fonksiyonu değeri azalmakta, c-Si/BSF arayüzdeki bant bükülmesi de buna bağlı olarak artmaktadır. Bu artış sonucu eğer bant ofset değerleri önceden anlatıldığı gibi

yük taşınımını engelleyecek boyutlardaysa, bant bükülmesinin de artışı göze başarımını olumsuz bir şekilde etkilemektedir.

Gözelerde, yeniden birleşmeksizin kontaklara gelen yük taşıyıcılarının kontaklarda iyi bir şekilde toplanması için metal-yarıiletken kontaklar ohmik kontak özellikleri göstermelidirler. Metal ile n tipi katkılanmış yarıiletken kontağı göz önüne alındığında, metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan düşükse, elektronlar metalden yarıiletkene elektron akışı gerçekleştirmektedirler. Bu hareket sonucunda elektrostatik potansiyel azalmakta bu sayede metal ve yarıiletken arasında elektron hareketine karşı gelen bariyer yüksekliği de azalmaktadır. Bu azalma elektronun hareketini kolaylaştırmaktadır (Streetman ve Banarjee, 2000). Tabakaların katkılama yoğunluklarının ve kalınlıklarının etkisinden bahsederken ön ve arka kontaktaki bant bükülmelerinin etkisi de incelenmeli, kontakların ohmik olmasına dikkat edilmelidir. TCO/a-Si:H(n) kontaklar ele alındığında, TCO'nun iş fonksiyonunun, a-Si:H(n)'un iş fonksiyonundan küçük olması gerekmektedir. a-Si:H(n) iş fonksiyonu değerinin limit bir değerden daha düşük olması durumunda, ohmik kontak oluşumuda a-Si:H(n)'de yukarı dönük şekilde oluşan bant bükülmesi, aşağıya dönük olmaktadır.

3. AFORS-HET YAZILIMI

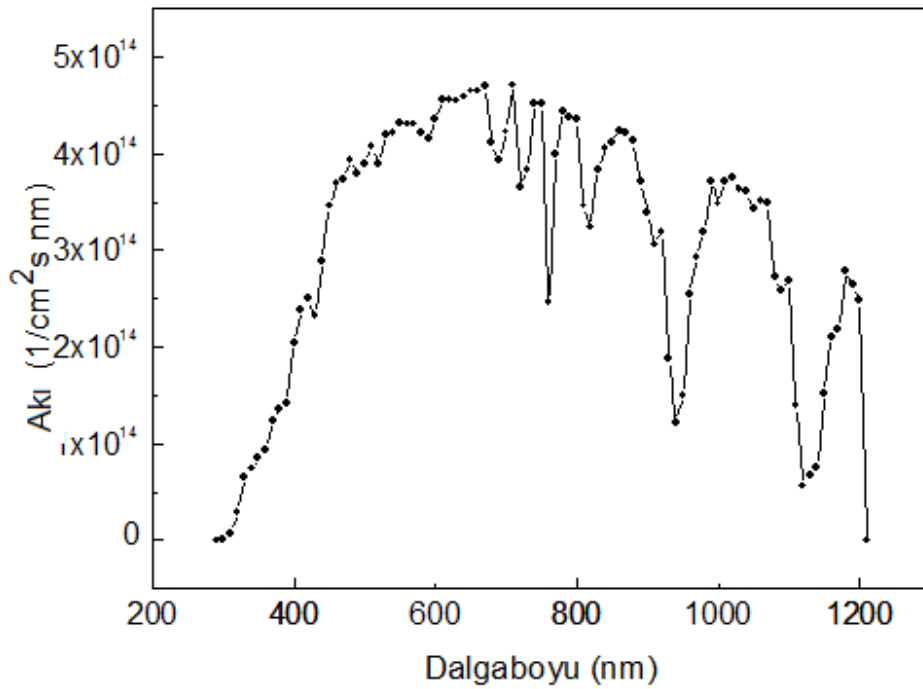
Güneş gözesi modellemelerinde kullanılmak üzere birçok yazılım geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları Pennsylvania State University’de S. Fonash ve arkadaşları tarafından geliştirilen AMPS-1D, Gent Üniversitesi tarafından geliştirilen SCAPS, Delft Üniversitesi’nde M. Zeman ve arkadaşları tarafından geliştirilen ASA, UNSW ve Sandia Laboratuvarları tarafından geliştirilmiş PC1D, Helmholtz Zentrum Berlin für Materialien und Energie tarafından geliştirilen AFORS-HET (**A**utomat **F**or **S**imulation of **H**eterostructures) yazılımıdır (Burgelman, 2004). Üniversiteler tarafından geliştirilen bu yazılımların yanısıra özel firmalar tarafından geliştirilen yazılımlar da bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak Synopsys Sentaurus Device, Silvaco Atlas, Wias Tesca, Comsol Femlab verilebilir. Tez kapsamında AFORS-HET yazılımının 2.4.1. sürümü kullanılmıştır (Stangl v.d., 2010).

AFORS-HET yazılımı çoklu tabakalı homo veya heteroeklem güneş gözelerinin ve karakterizasyon yöntemlerinin modellenmesinde kullanılan, tek boyutlu nümerik bir bilgisayar programıdır. Yazılımda, verilen bir sıcaklık için, termodinamik denge koşulu (EQ mode), kararlı durum koşulu DC (DC mode), kararlı durum koşulu AC (AC mode) ve geçici durum koşulu (TR mode) olmak üzere 4 farklı modda hesaplama yapılabilmektedir. Modelleme sonucu enerji-bant aralığı diyagramı, göze içindeki akım yoğunluğu, yük taşıyıcı yoğunluğu, yeniden birleşme hızı ve ışıınım ile yük taşıyıcısı üretimi hızı bilgileri elde edilebilmektedir. Bu bilgilerin yanısıra modellenmiş karakterizasyon deneyleri ile göze başarıımı hakkında detaylı bilgi edinilebilmektedir. AFORS-HET yazılımı ile modellenmiş gözelerle uygulanabilecek karakterizasyon yöntemleri akım-gerilim (I-V), kuantum verimi (QE), sözde kararlı fotoiletkenlik (QSSPC), empedans (IMP), admitans (ADM), kapasitans-gerilim (C-V), kapasitans-sıcaklık (C-T), kapasitans-frekans (C-f), şiddete bağımlı yüzey fotovoltajı (ID-SPV), gerilime bağımlı yüzey fotovoltajı (VD-SPV), dalgaboyuna bağımlı yüzey fotovoltajı (WD-SPV), fotoelektrolüminesanstır (PEL). Aynı zamanda birçok parametrenin değişiminin göze karakteristiklerine etkisi de yazılım tarafından hesaplanabilmekte ve gözenin doğası hakkında detaylı bilgi edinilebilmektedir.

Modelleme yapılırken ilk olarak tabakalar, araştırma kapsamına bağlı olarak arayüzler ve kontaklar tanımlanmaktadır. Daha sonra yazılım tarafından, bu veriler ile yapıya uygun bir ızgara (grid) oluşturulmaktadır.

Yazılım modellemeyi optik ve elektriksel modelleme olmak üzere iki alt grupta yapmaktadır. İlk olarak optik hesaplamalar yapılmakta daha sonra da elektriksel hesaplamalar yapılmaktadır. Hesaplamalar sonucu elde edilen konuma bağlı, enerji-bant aralığı diyagramları, göze içerisinde akım yoğunluğu, üretim ve yeniden birleşme hızları, yük taşıyıcı yoğunluğu gibi sonuçlar görselleştirilerek sunulmaktadır. Buna ek olarak karakterizasyon deneyi modellerinden elde edilen sonuçlar da görselleştirilebilmektedir.

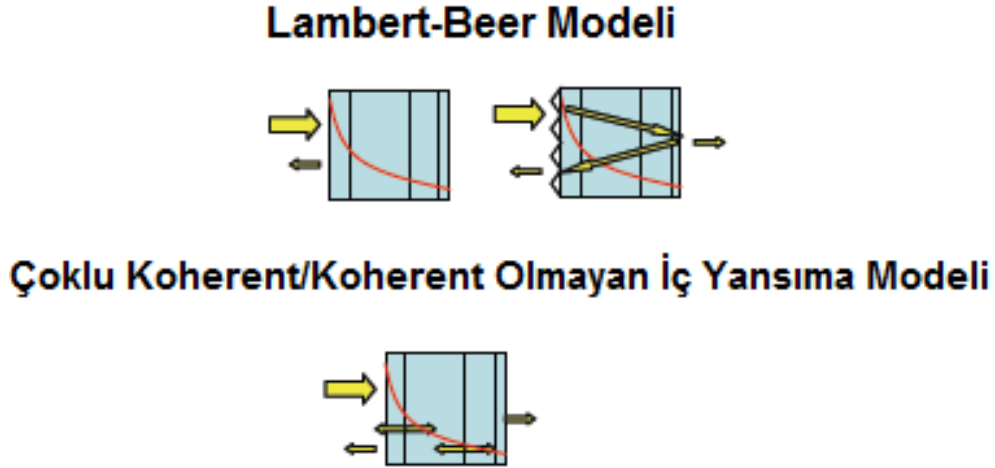
Optik modellemelerde girdi bilgisi olarak gelen güneş ışınımının dalgaboyuna bağlı akısı kullanılmaktadır. Dalgaboyuna karşı akı dosyası dışarıdan yazılıma yüklenebileceği gibi, AFORS-HET içinde bulunan ve AM 1.5 koşullarını belirleyen dosya da kullanılabilir. AFORS-HET yazılımı içerisinde bulunan AM 1.5 koşullarını tanımlayan dalgaboyuna karşı güneş ışınımı akısı grafiği Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. AFORS-HET yazılımı içerisindeki AM 1.5 koşullarını belirten dalga boyuna karşı gelen güneş ışınımının akısı.

AFORS-HET içinde optik hesaplamaları yapabilmek için iki tip optik model kullanılmaktadır. Bunlar Lambert-Beer soğurma modeli ve çoklu koherent ve koherent olmayan iç yansıma modelidir. Lambert-Beer modeli dokulandırılmış

yüzeyleri ve çoklu iç sınır yansımalarını hesaplarken koherentlik etkisini hesaba katmamaktadır. İkinci model ise koherentlik etkisini ve arayüzlerdeki yansımaları da hesaplarken bu hesabı sadece dokulandırılmamış-düzlemsel yüzeyler için yapabilmektedir. Modellerin hangi koşulların optik hesaplarını yaptığının şematik anlatımı Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Lambert-Beer Modeli ve Çoklu Koherent/Koherent Olmayan İç Yansımalar Modelinin şematik karşılaştırması

Optik modellerde dalga boyuna karşı gelen güneş ışınımı akısına ek olarak dalga boyuna bağlı yansıtıcılık, yüzey dokulandırma açısı ve iç yansımalar bilgilerinin girilmesi gerekmektedir. Ayrıca yapı parametreleri olarak tabakanın kalınlığı, dalga boyuna bağlı soğuruculuğu, kırma indisinin sanal bileşenini gösteren sönüm katsayısı (extinction coefficient) girilmektedir. Malzemelerin dalga boyuna bağlı soğurma ve yansıtma katsayıları için AFORS-HET yazılımı içerisindeki değerler kullanılabilir, dışarıdan yüklenebilir veya dalga boyundan bağımsız sabit değerler alınarak hesaplanabilir. Yazılımın içeriğinde a-Si:H, c-Si ve gümüşün (Ag) dalga boyuna bağlı kırma indisleri ve sönüm katsayıları, ITO, ZnO, malzemelerin ise dalga boyuna bağlı soğurma ve yansıtma katsayıları bulunmaktadır. Bu dosyaların içeriği EK 1’de verilmektedir. Optik hesaplamalarda kullanılacak girdi parametreleri tabakalar tanımlanırken girilebilir. Bunların yanısıra yüzey dokulanması olan yapılar için dokulanma açısı verilerek modelleme yapılabilir.

Lambert-Beer soğurma modelinde gözeye gelen ışının ileri ve geri hareketi sonucu yarıiletkende gerçekleşen soğurma hesaplanabilmektedir. Gelen ışının tabakalar içindeki hareketi esnasında normal ile yaptığı açı, Eş 3.1’de Snell Yasası ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma(\lambda) = \xi - \arcsin(\sin(\xi) \frac{1}{n(\lambda)}) \quad (3.1.)$$

Eş. 3.1’de $\gamma(\lambda)$, dalgaboyuna bağlı ışının yola devam ettiği açıyı ($^{\circ}$), ξ ışının gözeye geliş açısı ($^{\circ}$), $n(\lambda)$ ise ışınma maruz kalmış ilk yarıiletkenin dalgaboyuna bağlı kırma indisini belirtmektedir. ξ açısı yazılımda 0° ile 90° arası değiştirilebilmektedir. Bu değer 0° iken ışının (100) düzlemine paraleldir. <111> yönelimli piramitlerle dokulandırılmış yüzeye gelen ışının geliş açısı yazılımda $54,74^{\circ}$ olarak seçilmiştir. Bu değer literatürdeki <111> yönelimli c-Si piramitlere gelen ışının, geliş açısı ile uyumludur (Munoz v.d., 2009). Fakat bir yarıiletkenden farklı kırıcılık indisli başka bir yarıiletkene geçiş yaptığında $\gamma(\lambda)$ açısının değişimi yazılımda ihmal edilmiştir (Stangl v.d., 2010).

Tabakaların x konumundaki foton soğurması Eş 3.2 ile hesaplanmaktadır. Burada $k(\lambda)$ belli bir dalgaboyunda malzemenin sönüm sabitini belirlemektedir.

$$\alpha_x = 4\pi k(\lambda)/\lambda \quad (3.2.)$$

Koherent/koherent olmayan çoklu iç yansımalar modeli ile yarıiletkendeki çoklu yansımalar da hesaba katılabilmektedir. Koherent etkiyi hesaplayabilmek için gelen ışını elektromanyetik dalga olarak modellenmekte ve ek bir kompleks elektrik alan bileşeni ile hesaplanmaktadır.

Optik hesaplamalar sonucunda gözenin yansıtıcılığı, geçirgenliği ve üretim hızı ($G(x,t)$) elde edilmektedir. Elektron üretim hızı ($G_n(x,t)$) ve deşik üretim hızı ($G_p(x,t)$) **bant üstü** (super-bandgap) koşulları için yapılan hesaplamalarda kullanılmaktadır. **Bant altı** koşullarındaki $G(x,t)$ değerleri için ise elektriksel modellemelerden sonuç elde edilmektedir. **Bant üstü** koşulları gelen fotonun enerjisinin bant aralığı değerine

eşit ya da o değerden büyük olduğu durumları ifade ederken, **bant altı** koşulları gelen fotonun enerjisinin bant aralığı değerinden küçük olduğu durumlar ifade etmektedir. $G(x,t)$ değerleri hesaplanırken Eş 3.3 kullanılmaktadır. Eşitlikte $\Phi_0(x,t)$ gelen ışınının akısını (W/cm^2s), $A(\lambda)$ yarıiletkenin dalgaboyuna bağlı soğurma katsayısını, $R(\lambda)$ dalgaboyuna karşı yansıma katsayısını belirtmektedir.

$$G(x, t) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} d\lambda \Phi_0(\lambda, t) R(\lambda) A(\lambda) \alpha_x(\lambda) e^{-\frac{\alpha_x(\lambda)x}{\cos(Y)}} \quad (3.3.)$$

Optik hesaplamaların sonrasında yapılan elektrik hesaplarında Poisson eşitliği, taşıyım ve süreklilik eşitlikleri çözülmektedir. Tez çalışmasında EQ modu ve DC modu kullanılmıştır. EQ ve DC modlarında yapılan hesaplamalar zamandan bağımsız olduğundan diferansiyel denklemler zamandan bağımsız fakat konuma bağlı olan elektron yoğunluğu ($n(x)$), deşik yoğunluğu ($p(x)$) ve elektrostatik potansiyel ($\phi(x)$) için çözülmektedir. Elektriksel hesaplamalar aşamasında yazılım, tabaka modelleri için iki farklı yarıiletken modeli sunmaktadır. Bunlar standart yarıiletken ve kristal silikon yarıiletken modelleridir. Standart yarıiletken modelinde girdi parametresi olarak elektron ve deşik mobiliteleri (μ_n ve μ_p), iletim ve değerlik bantı yoğunlukları (N_c ve N_v), alıcı ve verici tipi katkılama yoğunlukları (N_a ve N_d), göreceli dielektrik sabiti ϵ_r gibi parametreler girilmelidir. Standart yarıiletken modelinde verici ($N_d(x)$) ve alıcı ($N_a(x)$) tipi katkılama yoğunlukları belirli bir x konumunda tamamen iyonize olarak kabul edilmektedir.

Poisson denklemi,

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{q} \frac{\partial^2 \phi(x, t)}{\partial x^2} = p(x, t) - n(x, t) + N_d(x) - N_a(x) + \sum_{tuzak} \rho_{tuzak}(x, t) \quad (3.4.)$$

eşitliği ile verilmektedir. Eş 3.4'te q elektron yükü, ϵ_0 ve ϵ_r mutlak ve göreceli dielektrik sabitini, $\rho_{tuzak}(x,t)$ ise yüklü kusurların yoğunluğunu belirtmektedir. $\rho_{tuzak}(x,t)$ değerini hesaplayabilmek için kusurların hangi tip kusur olduğunun yazılımda seçilmesi gereklidir. Yarıiletken bant aralığında belli bir E enerjisindeki kusur durumları ($N_{tuzak}(E)$) yüklenmiş ya da yüklenmemiş olabilmektedir. Kusurlar alıcı veya verici,

Shockley-Read-Hall (SRH) tipi kusurlar ve kopuk bağ tipi (DB) kusurlar şeklinde modellenabilmektedir. Alıcı tipi Shockley-Read-Hall kusurlar dolu ise eksi yüklenmiş, boş ise nötral olmaktadır. Verici tipi Shockley-Read-Hall kusurlar dolu ise nötral, boş ise artı yüklenmiş olmaktadır. Kopuk bağ tipi kusurlar ise boş olduğunda artı yüklü, tek dolu ise nötral, ikili dolu ise eksi yüklü olmaktadır.

Modelde çözülen diğer eşitlik, elektronlar ve deşikler için taşınım ve süreklilik eşitlikleridir ve bu eşitlikler sırası ile Eş. 3.5 ve Eş 3.6 ile verilmektedir.

$$\frac{-1}{q} \frac{\partial j_n(x, t)}{\partial x} = G_n(x, t) - R_n(x, t) - \frac{\partial n(x, t)}{\partial t} \quad (3.5.)$$

$$\frac{+1}{q} \frac{\partial j_p(x, t)}{\partial x} = G_p(x, t) - R_p(x, t) - \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} \quad (3.6.)$$

İletim bantından değerlik bantına oluşan yeniden birleşmeler ışınlı banttan banta yeniden birleşmeler (BB), Auger yeniden birleşmeleri (A), Schokley-Read-Hall yeniden birleşmeleri veya kopuk bağ yeniden birleşmeleri şeklinde olabilir. Bütün yeniden birleşme türlerinin toplam yeniden birleşme hızına etkisi Eş 3.7 ile hesaplanmaktadır.

$$R_{n,p}(x, t) = R_{n,p}^{BB}(x, t) + R_{n,p}^A(x, t) + R_{n,p}^{SRH}(x, t) + R_{n,p}^{DB}(x, t) \quad (3.7.)$$

Banttan banda yeniden birleşmelerde yeniden birleşme hızı Eş 3.8 ile hesaplanmaktadır. r^{BB} banttan banda yeniden birleşme sabitidir. E_g ise bant aralığı değerini belirtmektedir.

$$R_{n,p}^{BB}(x, t) = r^{BB}(n(x, t) p(x, t) - N_c N_v e^{-E_g/kT}) \quad (3.8.)$$

Auger yeniden birleşme hızı ise EQ veya DC modlarında Eş 3.9 ile hesaplanabilmektedir.

$$R_{n,p}^A(x, t) = [r_n^A n(x, t) + r_p^A p(x, t)] - \{n(x, t)p(x, t) - N_c N_v e^{-E_g/kT}\} \quad (3.9.)$$

Schokley-Read-Hall yeniden birleşmesinde EQ ve DC modlarında yeniden birleşme hızları elektronlar için Eş 3.10 ile, deşikleri için ise Eş 3.11 ile hesaplanmaktadır.

$$R_n^{SRH}(x, t) = \sum_{tuzak} \int dE \{ c_n^{tuzak} n(x, t) N_{tuzak}(E) f_{0,tuzak}^{SRH}(E, x, t) - e_n^{tuzak}(E, x, t) N_{tuzak}(E) f_{1,tuzak}^{SRH}(E, x, t) \} \quad (3.10.)$$

$$R_p^{SRH}(x, t) = \sum_{tuzak} \int dE \{ c_p^{tuzak} p(x, t) N_{tuzak}(E) f_{1,tuzak}^{SRH}(E, x, t) - e_p^{tuzak}(E, x, t) N_{tuzak}(E) f_{0,tuzak}^{SRH}(E, x, t) \} \quad (3.11.)$$

Eşitliklerde kullanılan N_c ve N_v sırası ile iletim ve değerlik bantı etkin durum yoğunluğudur. θ ise adım fonksiyonudur. Adım fonksiyonu $E \leq 0$ ise 1, $E > 1$ ise 0 olmaktadır. Eşitliklerde kullanılan N_{tuzak} parametresi, Schokley-Read-Hall yendien birleşmelerinde farklı enerji dağılımlarına göre yazılmaktadır. Bu enerji dağılımları nokta benzeri, sürekli, üstel olarak azalan, Gaussiyen şeklinde yazılım ile seçilebilmektedir.

- Nokta benzeri enerji dağılımı için yazılım

$$N_{tuzak}(E) = N_{tuzak}^{nokta\ tipi} \delta(E - E_{tuzak}) \quad (3.12.)$$

Eşitliğini kullanmaktadır. Bu eşitlikte kullanılan $N_{tuzak}^{nokta\ tipi}$ nokta tipi kusurların durum yoğunluğu, E_{tuzak} kusurların bulunduğu enerji, $\delta(E)$ ise delta fonksiyonudur.

- Kusurlar sabit değerli dağılım gösteriyorsa, $E^{başlangıç}$ enerjisinden $E^{bitiş}$ enerjisine kadar dağıldığı düşünülmektedir. Bu tip kusurlarda kusur yoğunluğu

$$N_{tuzak}(E) = (E_{tuzak}^{bitiş} - E_{tuzak}^{başlangıç}) N_{tuzak}^{sabit} \theta(E - E_{tuzak}^{bitiş}) \theta(E_{tuzak}^{başlangıç} - E) \quad (3.13.)$$

Eşitliği ile verilmektedir.

- Üstel olarak bant aralığına doğru azalan kusur dağılımları

$$N_{\text{tuzak}}(E) = N_{\text{tuzak}}^{c, \text{bant uzantısı}} e^{-\frac{E_c - E}{E_{\text{tuzak}}^{c, \text{bant uzantısı}}}} \text{veya} \quad (3.14.)$$

$$N_{\text{tuzak}}(E) = N_{\text{tuzak}}^{v, \text{bant uzantısı}} e^{-\frac{E - E_v}{E_{\text{tuzak}}^{v, \text{bant uzantısı}}}}$$

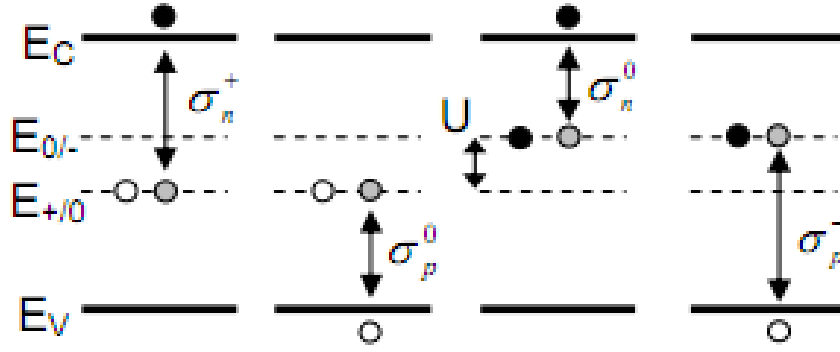
Eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Eşitlikte, $N_{\text{tuzak}}^{c, \text{uzantı}}$ ve $N_{\text{tuzak}}^{v, \text{uzantı}}$ nicelikleri iletim ve değerlik bant uzantı durumları için durum yoğunluklarını, $E_{\text{tuzak}}^{c, \text{uzantı}}$ ve $E_{\text{tuzak}}^{v, \text{uzantı}}$ ise iletim ve değerlik bantındaki Urbach enerjisini belirtmektedir.

- Bant aralığı içerisinde gaussiyen dağılmış kusurlar için kusur yoğunluğu dağılımı

$$N_{\text{tuzak}}(E) = \frac{N_{\text{tuzak}}^{\text{DB}}}{\sigma_{\text{tuzak}}^{\text{db}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E - E_{\text{tuzak}}^{\text{db}})^2}{2\sigma_{\text{tuzak}}^{\text{db}}^2}} \quad (3.15.)$$

Bağıntısı ile verilmektedir. Burada $N_{\text{tuzak}}^{\text{db}}$ toplam kopuk bağ durum yoğunluğunu, $\sigma_{\text{tuzak}}^{\text{db}}$ ise Gaussiyen dağılımın standart sapmasını göstermektedir.

Banttın banda, Auger ve Schokley-Read-Hall yeniden birleşmelerine ek olarak bir diğer yeniden birleşme kopuk bağ (DB) yeniden birleşmesidir. Kopuk bağ yeniden birleşmelerinde dört tip yakalanma/emisyon gerçekleşmekte ve bu durumlar farklı yakalama etkin kesidi ile hesaplanmaktadır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi $E_{0/-}$ ve $E_{+/0}$ geçiş enerjileri U gibi bir korelasyon enerjisi ile ayrılmışlardır.



Şekil 3.3. Kopuk bağ yeniden birleşmesinde yakalanma ve emisyon mekanizmaları

Kopuk bağ yeniden birleşme hızı elektronlar için Eş 3.16 ve deşikler için Eş 3.17 ile hesaplanmaktadır.

$$R_n^{DB}(x, t) = \sum_{\text{tuzak}} \int dE \{ c_{n,+}^{\text{tuzak}} n(x) N_{\text{tuzak}}(E) f_{+, \text{tuzak}}^{DB}(E, x) - e_{n,0}^{\text{tuzak}}(E, x) N_{\text{tuzak}}(E) f_{0, \text{tuzak}}^{DB}(E, x) + c_{n,0}^{\text{tuzak}} n(x) N_{\text{tuzak}}(E) f_{0, \text{tuzak}}^{DB}(E, x) - e_{n,-}^{\text{tuzak}}(E, x) N_{\text{tuzak}}(E) f_{-, \text{tuzak}}^{DB}(E, x) \} \quad (3.16.)$$

$$R_p^{DB}(x, t) = \sum_{\text{tuzak}} \int dE \{ c_{p,-}^{\text{tuzak}} p(x) N_{\text{tuzak}}(E) f_{-, \text{tuzak}}^{DB}(E, x) - e_{p,0}^{\text{tuzak}}(E, x) N_{\text{tuzak}}(E) f_{0, \text{tuzak}}^{DB}(E, x) + c_{p,0}^{\text{tuzak}} p(x) N_{\text{tuzak}}(E) f_{0, \text{tuzak}}^{DB}(E, x) - e_{p,+}^{\text{tuzak}}(E, x) N_{\text{tuzak}}(E) f_{+, \text{tuzak}}^{DB}(E, x) \} \quad (3.17.)$$

Eş 3.16 ve Eş 3.17’de kullanılan e^{tuzak} değerleri farklı yüklenme durumlarındaki elektron ve deşikler için Eş 3.18 -Eş 3.21 ile hesaplanmaktadır.

$$e_{n,0}^{\text{tuzak}}(E, x) = \frac{1}{2} c_{n,+}^{\text{tuzak}} N_c e^{-(E_C - E)/kT} \quad (3.18.)$$

$$e_{p,0}^{\text{tuzak}}(E, x) = \frac{1}{2} c_{p,-}^{\text{tuzak}} N_v e^{-(E + U - E_V)/kT} \quad (3.19.)$$

$$e_{n,-}^{\text{tuzak}}(E, x) = 2 c_{n,0}^{\text{tuzak}} N_c e^{-(E_C - (E + U))/kT} \quad (3.20.)$$

$$e_{p,+}^{\text{tuzak}}(E, x) = 2c_{p,0}^{\text{tuzak}} N_V e^{-(E-E_v)/kT} \quad (3.21.)$$

Yazılımda yeniden birleşme hesabını yaparken kullanılan Eş 3.5 ve Eş 3.6'yı hesaplamak için kullanılan parametrelerin nasıl hesaplanacağı Eş. 3.7 - Eş. 3.21 arasında belirtilmiştir. Eş 3.5 ve Eş 3.6'da bir diğer bilinmesi gereken terim elektron akımı yoğunluğu ($j_n(x,t)$) ve deşik akım yoğunluğudur ($j_p(x,t)$). Elektron ve deşik akım yoğunlukları, sözde Fermi düzeylerinin oluşturduğu gradyent ile oluşmaktadır. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu için Maxwell-Boltzmann yaklaşımı yapıldığında sözde Fermi düzeyleri Eş 3.22 ve Eş 3.23 ile belirlenmektedir.

$$E_{Fn}(x, t) = E_c(x) + kT \ln \frac{n(x, t)}{N_c(x)} = -q\chi(x) + q\phi(x, t) + kT \ln \frac{n(x, t)}{N_c(x)} \quad (3.22.)$$

$$E_{Fp}(x, t) = E_v(x) - kT \ln \frac{p(x, t)}{N_v(x)} = -q\chi(x) + q\phi(x, t) - E_g - kT \ln \frac{p(x, t)}{N_v(x)} \quad (3.23.)$$

Sözde Fermi düzeyi bilgilerini kullanarak kullanarak elektron ve deşik akım yoğunluğu Eş 3.24 ve Eş 3.25 ile hesaplanmaktadır.

$$j_n(x, t) = q\mu_n n(x, t) \frac{\partial E_{Fn}(x, t)}{\partial x} \quad (3.24.)$$

$$j_p(x, t) = q\mu_p p(x, t) \frac{\partial E_{Fp}(x, t)}{\partial x} \quad (3.25.)$$

Kristal silikon modelinde de aynı hesaplamalar yapılmakta bunun yanında c-Si'deki intrinsik taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklık bağımlılığı, elektron/deşik mobilitelerinin katkılama ile değişimi, Auger yeniden birleşmesinin katkılama ile değişimi, Schokley-Read-Hall yeniden birleşmesinin sıcaklık ve katkılama ile değişimi, katkılama ile bant aralığının değişimi özelleştirilebilmektedir. Tez çalışmasında bu model kullanılmamıştır.

Yazılım elektriksel modellemeleri sadece katmanlar için değil aynı zamanda arayüzler için de yapmaktadır. Fakat tezde AFORS-HET içerisinde bulunan arayüz modelleme özelliği kullanılmamış, arayüzler standart yarıiletken modeli kullanılarak

modellenmişlerdir. Bu sebeple arayüz modelleme özelliğinde kullanılan eşitliklere burada değinilmeyecektir.

AFORS-HET'in yaptığı hesaplamalarda kullanılan sınır koşulları metal/yarıiletken kontakların oluşturduğu sınır koşullarıdır. Yalıtkan kontak, metal/yalıtkan/yarıiletken kontak gibi kontaklar da sınır koşulu olarak alınabilmektedir. Fakat bizim çalışmamızda metal/yarıiletken kontaklar kullanıldığından onlara değinilecektir. Metal/yarıiletken kontaklarda düz bant koşulu ve bantın büküldüğü durumlar için hesap yapılabilir.

AFORS-HET yazılımında modellenmiş gözelerin başarımını gözlemleyebilmek için modellemesi yapılmış karakterizasyon deneyleri kullanılabilmektedir. Bu deney modellerini kullanarak gerçek bir deney yapmaksızın üzerinde çalışılan gözenin performansı hakkında bilgi edinilebilmektedir.

I-V karakterizasyonunda yazılım her gerilim değeri için bir akım değeri hesaplamakta ve buna bağlı olarak I-V eğrisini çizmektedir. Bu modelleme karanlık ya da aydınlık koşullarında yapılabilir. Model açık devre gerilimi ve kısa devre akımını bulmakta ve dolum çarpanı ve verim değerlerini buradan hesaplamaktadır.

Kuantum verimi karakterizasyonunda ise göze belli dalgaboylarında monokromatik ışınım aydınlatılmakta ve kısa devre akımı değerindeki değişim incelenmektedir. Buradan kuantum verimi Eş 3.26 ile hesaplanmaktadır.

$$QE(\lambda) = \frac{\text{Dış devredeki elektron sayısı}}{\text{foton sayısı}} = \frac{\Delta I_{sc}^{\text{ışınım}}/q}{\text{foton sayısı}} \quad (3.26.)$$

Yazılım üç farklı kuantum verimi hesabı yapmaktadır. Bunlardan ilki dış kuantum verimi hesabıdır ve yansıyan, soğurulan ve geçirilen ışınımı da hesaba katmaktadır. İç kuantum verimi'nde ise sadece soğurulan fotonlar hesaba katılmaktadır. Bu modelde kontaklarda soğurulmuş ışınım da hesaba katılmaktadır fakat bu soğurmanın toplam akıma etkisi olmamaktadır. IQE1 ise düzeltilmiş iç kuantum verimi olarak geçmekte ve sadece yarıiletkende soğurulan ışınımı hesaplamaktadır.

4. MODELLEME SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Modelleme çalışmalarında öncelikle, AFORS-HET yazılımını ve a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözelerinin modellenmesinde kullanılan parametreleri anlamak ve irdelenmek amacı ile yazılımın kütüphanesindeki hazır örnekler incelenmiştir. AFORS-HET yazılımının kütüphanesinin incelenmesinin ardından, bu çalışmada kullanılan örnekler oluşturulmuştur. Hem AFORS-HET kütüphanesi örnekleri üzerinde, hem de daha sonra geliştirilen modellerde belli yapısal parametrelerin değişiminin göze başarımına (açık devre gerilimi, kısa devre akımı, dolum çarpanı ve verim, kuantum verimi) etkileri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda tabakalara ait en iyi koşullar için bulunmuş parametreler kullanılarak en yüksek göze verimine ulaşılmaya çalışılmıştır. Modellemeler yapılırken örnek sıcaklığı 300K'de sabit tutulmuş ve gelen güneş ışınımı AM 1.5 özelliklerine sahip olarak alınmıştır.

4.1. AFORS-HET Kütüphanesi Kullanılarak İlgili Tabakaların Seçimi

AFORS-HET kütüphanesindeki örneklerle yapılan çalışmalarda, ilk aşamada kütüphanedeki örneklerde kullanılan c-Si(p) tabaka kullanılarak a-Si:H(n)/c-Si(p) yapıya sahip basit heteroeklem güneş gözesi modellemeleri yapılmıştır. Modellerde kullanılan a-Si:H(n) tabaka için, modelleme süresince sabit tutulan genel parametreler, literatürdeki makalelerden (Zhao v.d., 2008a; 2008b; 2009; Wang v.d., 2010; Dao v.d., 2010) seçilmiştir ve bu parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir. a-Si:H(n) tabaka modellenirken kullanılan bant aralığı durum yoğunluğu parametreleri de aynı çizelgede görülmektedir.

a-Si:H tabakalar modellenirken bantın üst yarısında alıcı tipi yerleşmiş durumlar, alt yarısında ise verici tipi yerleşmiş durumlar varsayılmıştır. Alıcı ve verici tip yerleşmiş durumlar hem gaussiyen tipi kopuk bağ durumlarını (dangling bond-DB) hem de bant uzantısı durumlarını içermektedir. Bant uzantısı durumlar modellenirken yazılımdaki seçeneklerden, değerlik bant uzantısı için “*valence tail-donor*”, iletim bant uzantısı için “*conduction tail-acceptor*” kullanılmıştır. Kopuk bağ durumları modellenirken ise yazılımdaki seçeneklerden, verici tipi kopuk bağlar için “*gauss-donor*”, alıcı tipi kopuk bağlar için “*gauss-acceptor*” kullanılmıştır. Yakalama sabitleri, elektronlar ve deşikler için ayrı ayrı verilmiştir. Sigma ise gaussiyen formdaki kopuk bağ durumlarının standart sapmasını göstermektedir.

Çizelge 4.1. a-Si:H(n) tabakaların modellemesinde kullanılan genel parametreler ve bant aralığı durum yoğunluğu parametreleri.

Genel parametreler	
ϵ : Dielektrik Sabiti	11,9
χ : Duygunluk (eV)	3,9
E_g : Mobilite aralığı (eV)	1,75
N_c : İletim bandı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
N_v : Değerlik bandı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
N_d : Katkılama yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
μ_e/μ_h : Elektron ve deşik mobilite oranı	20/5
v_e, v_h : Elektron ve deşik için ısı hızı (cm/s)	1×10^7
Bant Uzantıları Durumları	
İletim bandı uzantı durumları	
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	7×10^{-17} , 7×10^{-17}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	9×10^{19}
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	0,05
Değerlik bandı uzantı durumları	
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	7×10^{-17} , 7×10^{-17}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	7×10^{19}
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	0.04
Kopuk Bağlar	
Verici Tipi	Gauss/donor
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	1×10^{-15} , 1×10^{-16}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	0,5
Sigma (eV)	0,2
Alıcı Tipi	Gauss/acceptor
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	1×10^{-16} , 1×10^{-15}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	0,7
Sigma (eV)	0,2

Modelleme parametrelerine ek olarak tüm a-Si:H tabakaların optik özellikleri AFORS-HET içerisindeki hazır a-Si:H optik özellikler dosyalarından yüklenmiştir. AFORS-HET'in kütüphanesinden alınan dalgaboyuna bağlı kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) değerleri Kesim EK-1'de, Şekil EK-1.1 ve Şekil EK-1.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2'de AFORS-HET'in kütüphanesinden alınmış c-Si(p) tabakaları için kullanılan modelleme parametreleri verilmiştir. AFORS-HET kütüphanesinden ve literatürdeki çalışmalardan alınan parametrelerde, c-Si modellenirken kusur tipi olarak nokta kusurlar seçildiğinden (Zhao v.d., 2008a; 2008b; 2009; Wang v.d., 2010; Dao v.d., 2010), bu çalışmada da c-Si(p) tabaka için alıcı tipi-nokta kusur seçeneği olan “*single acceptor*” seçilmiştir.

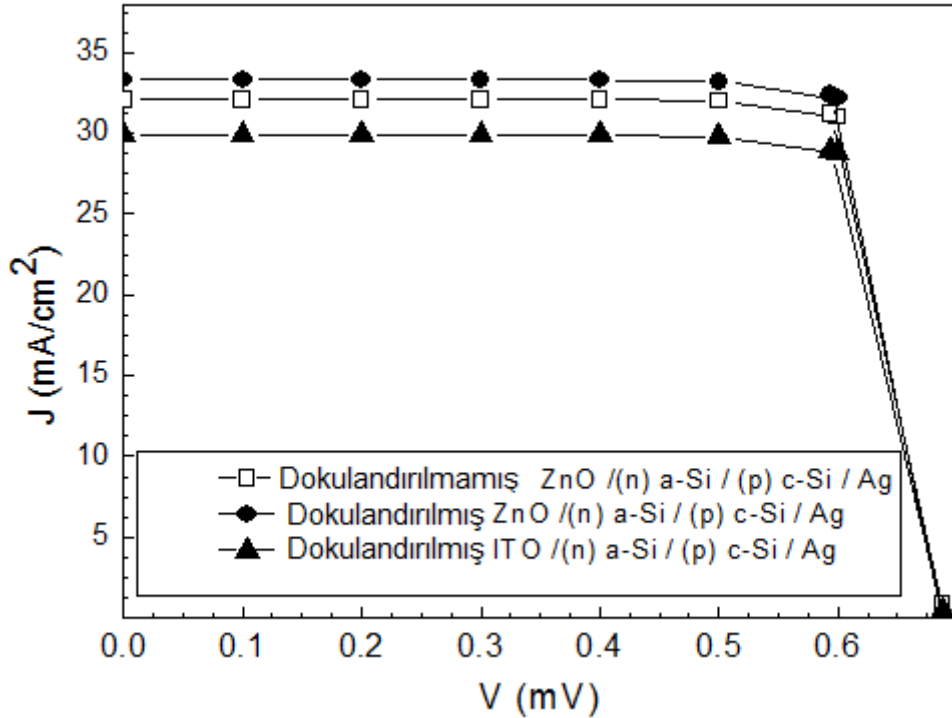
Çizelge 4.2 c-Si(p) tabaka modellemesinde kullanılan parametreleri

Genel parametreler	
d : Kalınlık (cm)	0,03
ϵ : Dielektrik Sabiti	11,9
χ : Duygunluk (eV)	4,05
E_g : Bant aralığı (eV)	1,12
N_c : İletim bantı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	$2,8 \times 10^{19}$
N_v : Değerlik bantı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	$1,04 \times 10^{19}$
μ_e/μ_h : Elektron ve deşik mobilite oranı	1350/480
N_a : Katkılama yoğunluğu (cm^{-3})	Değişken
v_e, v_h : Elektron ve deşik için ısıtılma hızı (cm/s)	1×10^7
Kusurlar	
Tipi	single/acceptor
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	1×10^{-14}
E : Enerji (eV)	0,56
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{10}

c-Si(p) tabaka modellemesinde de a-Si:H tabaka modellemesinde olduğu gibi optik özellikler AFORS-HET içeriğinde yüklenmiş ve kullanılan dalgaboyuna bağlı kırma

indisi ve sönüm katsayısı değerleri EK-1'de Şekil EK-1.3 ve Şekil EK-1.4'te verilmiştir.

Modellemenin başlangıç aşamalarında, ön ve arka metal kontaklarda yansıma kayıplarının olmadığı varsayılmış, daha sonra ön kontak olarak ITO ve ZnO'nun kullanıldığı modeller hazırlanmış, arka kontak olarak Ag kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan ITO ve ZnO için dalgaboyuna bağlı yansıma ve soğurma katsayıları, Ag için dalgaboyuna bağlı kırma indisi ve sönüm katsayısı AFORS-HET kütüphanesinden alınmıştır. Bu değerler EK 1'de, Şekil EK-1.5-1.10'da görülebilmektedir. Ayrıca, bu modellerde yüzey dokulanmasının (texturization) ve dokulanma açısının etkisi de incelenmiştir. Işınımın piramit yüzeyine geliş açısı arttıkça göze başarımında artış gözlenmesine karşın, modellemelerde AFORS-HET yazılımının içinde bulunan <111> yönelimli standart Si piramitlerin üzerine ışınım geliş açısı olan $54,74^\circ$ kullanılmıştır. Bu değer <111> yönelimli standart Si piramitlerin, (100) c-Si(p) doğrultusuna göre ışınım geliş açısını göstermektedir (Munoz v.d., 2009).



Şekil 4.1. AFORS-HET kütüphanesi ve literatürden alınan parametrelerle modellenmiş dokulandırılmamış ITO, ZnO ön kontaklı ve dokulandırılmış ZnO ön kontaklı modeller için akım yoğunluğu -gerilim grafikleri

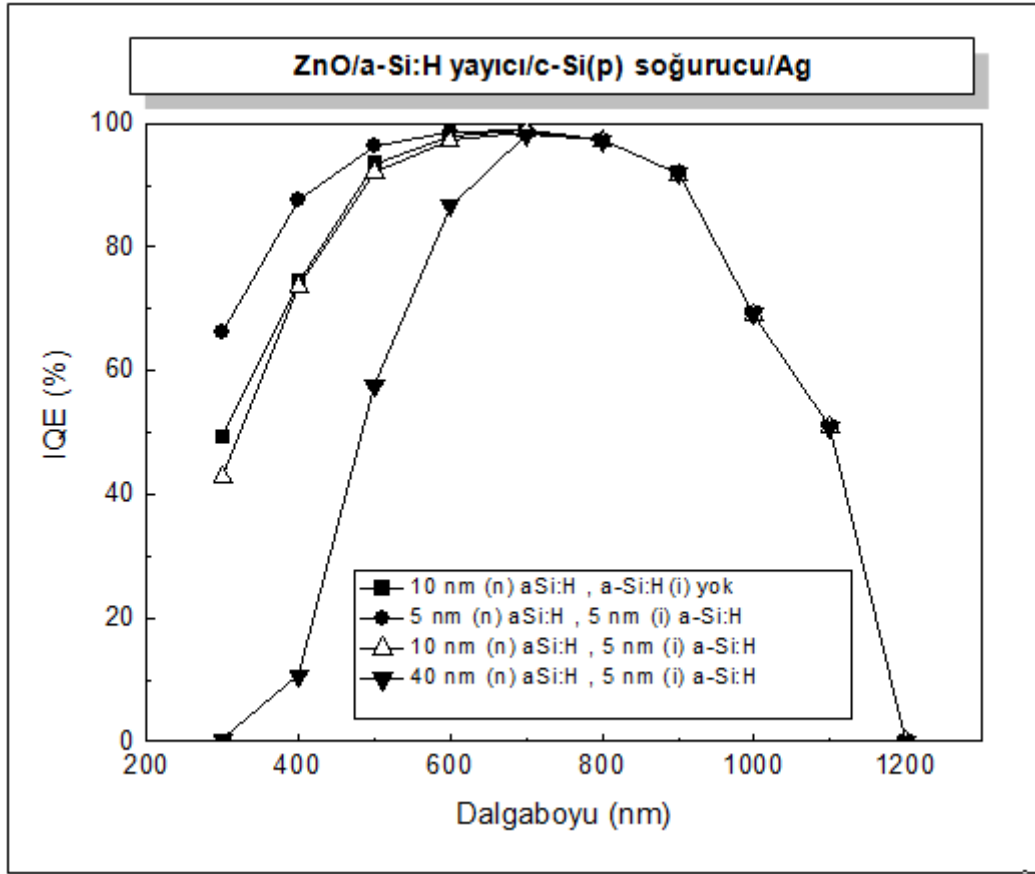
Şekil 4.1’de ITO ve ZnO dokulandırılmamış ön kontaklı ve dokulandırılmış ZnO ön kontaklı göze modellerinden elde edilen akım yoğunluğu gerilim grafikleri verilmiştir. TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Ag yapıları modellerde, ITO yerine ZnO kullanılan ve dokulandırılmış olan yapılarda daha yüksek göze başarımları değerleri elde edilmiştir. Kesim 2’de de değinildiği gibi dokulanmanın, gözenin içine giren ışınımı artırması sonucu dokulandırılmamış göze modeline göre daha yüksek kısa devre akımı ve dolaylı olarak daha yüksek göze başarımına ulaşılması beklenen bir sonuçtur.

Basit yapıdaki a-Si:H/c-Si güneş gözelerinin irdelenmesinin ardından, intrinsik a-Si:H tabakasının yapı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Ag yapıları basit heteroeklemler ve ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Ag yapıları heteroeklemler modellenerek, bu yapılarda yayıcı kalınlığının etkisi incelenmiştir. Intrinsik a-Si:H tabakası modellenirken katkılama yoğunluğu sıfır yapılmıştır ve bu tabakaya ait modelleme parametreleri Çizelge 4.3’te verilmiştir. Sonuç olarak yayıcı tabaka kalınlığı artırıldığı zaman gözenin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve verim (η) değerlerinin azaldığı gözlenmiştir (Bilgic Aksari ve Eray, 2011). Bu gözlem, Kesim 1’de de verilen literatür sonuçları ile uyumludur (Sawada v.d., 1994; Stangl v.d., 2003; Centurioni v.d., 2004; Hernandez-Como ve Morales Acevedo, 2008; Zhao v.d., 2008a; 2008b). Şekil 4.2’de oluşturulan yapılar için modelleme sonucu elde edilen, iç kuantum verimi (IQE) eğrilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Kesim 2’de anlatıldığı ve Stangl vd.’nin çalışmalarında (2003) gözledikleri gibi, yayıcı kalınlığı arttıkça gözenin mavi bölge tepkisi de azalmaktadır. Mavi tepkisinin en büyük olduğu 10 nm’lik örneklerde, a-Si:H(i) tabaka kullanılması ile, mavi bölgesinde iç kuantum verimi daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Soğurucu tabakanın parametreleri üzerine yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, öz direncin diğer bir deyişle soğurucu tabakanın katkılama miktarının önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır (Zhao v.d., 2009; Dao v.d., 2010). Modellerimizdeki c-Si(p)’nin katkılama yoğunluğu değerleri $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ile $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ arasında değiştirilmiş ve $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ katkılama yoğunluğu değeri için açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve dolum çarpanı yükselmesine bağlı olarak daha yüksek verim elde edilmiştir (Bilgic Aksari ve Eray, 2011). Bu artış literatürdeki çalışmalarla uyumludur (Zhao v.d., 2009; Dao v.d., 2010).

Çizelge 4.3. a-Si:H(i) tabakaların modellemesinde kullanılan modelleme süresince sabit tutulan genel parametreler ve bant aralığı durum yoğunluğu parametreleri.

Genel parametreler	
ϵ : Dielektrik Sabiti	11,9
χ : Duygunluk (eV)	3,9
E_g : Mobilite aralığı (eV)	1,75
N_c : İletim bandı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
N_v : Değerlik bandı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
Katkılama yoğunluğu (cm^{-3})	-
μ_e/μ_h : Elektron ve deşik mobilite oranı	20/5
v_e, v_h : Elektron ve deşik için ısı hızı (cm/s)	1×10^7
Bant Uzantıları Durumları	
İletim bandı uzantı durumları	
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	7×10^{-17} , 7×10^{-17}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	0.05
Değerlik bandı uzantı durumları	
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	7×10^{-17} , 7×10^{-17}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	0.03
Kopuk Bağlar	
Verici Tipi	Gauss/donor
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	1×10^{-15} , 1×10^{-16}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	5×10^{15}
E : Enerji (eV)	0,89
Sigma (eV)	0,13
Alıcı Tipi	Gauss/acceptor
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	1×10^{-16} , 1×10^{-15}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	5×10^{15}
E : Enerji (eV)	1,09
Sigma (eV)	0,13



Şekil 4.2. Farklı kalınlıklarda yayıcı tabaka kalınlığına sahip ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Ag ve ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Ag yapıları heteroeklem güneş gözelerinin iç kuantum verimi eğrisi (Bilgic Aksari ve Eray, 2011)

Başlangıç için yapılan modellemelerin sonucunda elde edilen en iyi koşullar için modellenmiş gözelerde %19'a yakın verim değerleri elde edilmiştir. c-Si(p) soğurucu tabaka kullanılarak yapılmış basit deneysel heteroeklem ve HIT göze çalışmaları incelendiğinde modelleme sonuçlarının gerçek sonuçlara göre çok yüksek çıktığı gözlenmiştir (Jensen v.d., 2002). Bu sebeple AFORS-HET kütüphanesindeki modellerin çok gerçekçi olmadığına karar verilerek, c-Si(p) modellemesinde kullanılan parametreler literatürden alınmıştır.

4.2. Deneysel Veriler Kullanılarak Modellenmiş c-Si(p) Tabakalar ile Yapılmış Modelleme Çalışmaları ve Sonuçları

Deneysel çalışmalarla uyumlu bir modelleme çalışması yapabilmek amacı ile, AFORS-HET kütüphanesinden alınan c-Si(p) parametreleri yerine literatürdeki

parametreler incelenmiştir. Modelleme çalışmalarının devamında, Giriş Kesimi'nde ve Kesim 2'de anlatıldığı gibi, göze başarımını arttırmak amacıyla BSF tabakası eklenmesine karar verilmiş ve bu amaçla a-Si:H(p++) tabaka modellenerek kullanılmıştır. Ayrıca, gerçek bir göze yapısına benzer yapı oluşturabilmek amacıyla, daha önce Kesim 4.1'de AFORS-HET kütüphanesi ile yapılan modelleme çalışmalarından farklı olarak, a-Si:H tabakaların c-Si üzerine büyütülmesi sırasında c-Si(p)'nin önünde ve arkasında oluşabilecek arayüz durumlarının da modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

c-Si tabakalardaki kusur durumları gözönüne alındığında, AFORS-HET yazılımının kütüphanesinde bulunan c-Si(p) modellerinde oksijen kusurları değerlik bantınının 0,55 eV üzerinde bulunmaktadır. Birçok çalışma grubu bu oksijen kusurunu içeren c-Si(p) tabakaları ile modelleme çalışmalarını yapmışlardır (Zhao v.d. 2008a; Dao v.d., 2010; Wang v.d., 2010; Stangl v.d., 2010). Son yıllarda göze çarpan bir çalışma olan Ali vd.'nin çalışmalarında (2011) DLTS ölçümleri ile, değerlik bantının üzerinde 0,23, 0,33 ve 0,41 eV enerji değerlerinde bulunan ve sırasıyla boşluk kusurunu (vacancy defect), yarı kararlı boron-oksijen kusurunu (meta stable boron oxygen defect) ve karbon-boşluk-oksijen kompleksini (carbon-vacancy-oxygen complex) gösteren üç farklı kusur özelliğini incelemişlerdir. Tez çalışmasının bu kısmında, kullanılan c-Si(p) tabakalarındaki kusurlar için, Kesim 4.1'deki çalışmadan farklı olarak, Ali vd.'nin çalışmasındaki kusur yapıları göz önüne alınarak modellemeler yapılmıştır. Bu kusurlar teker teker ve birbirinin kombinasyonu şeklinde kullanılmışlardır. Her bir kusur, oksijen kusurunda olduğu gibi “*single-acceptor*” seçeneğini kullanarak *tek ve alıcı* tipi seçilmiştir. 0,23 eV, 0,33 eV ve 0,41 eV enerji değerlerinde bulunan bu kusurlar sırası ile H1, H2 ve H3 olarak adlandırılmıştır. Oluşturulan c-Si(p) tabakalar ile basit heteroeklem ve HIT yapı modellemeleri gerçekleştirilmiştir. c-Si(p) tabaka modellenirken kullanılan parametreler Çizelge 4.4'te, kusur türleri, Çizelge 4.5'te ise kusur özellikleri verilmiştir. Şekil 4.3'te H1, H2 ve H3 kusurlarının yoğunluğu ve enerji olarak banttaki konumu görülmektedir.

a-Si:H(n) ve a-Si:H(i) tabakalar modellenirken kullanılan parametreler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.3'teki değerlerin birçoğu ile aynı kullanılmıştır. Farklı olarak, a-Si:H(n) tabakanın bant aralığı 1,72 eV alınmıştır. İyi kalitede bir tabaka seçimi için a-Si:H(i) tabakanın durum yoğunluğu olarak, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değeri kullanılmıştır. Kesim 4.1'de söz edilen en iyi koşul bulma çalışmalarında gözlemlendiği gibi, toplam yayıcı kalınlığının

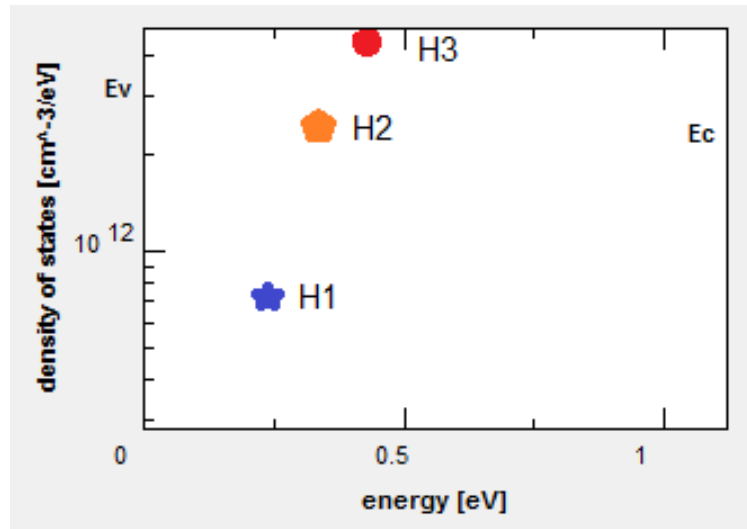
olabildiğince ince olmasına dikkat edilmiş bu sebeple 10nm'lik toplam yayıcı kalınlığı için 5nm 'lik a-Si:H(n) ve 5nm'lik a-Si:H(i) tabakaları seçilmiştir.

Çizelge 4.4. c-Si(p) modellemesinde kullanılan parametreler.

d : Kalınlık (cm)	0,045
ϵ : Dielektrik Sabiti	11,9
χ : Duygunluk (eV)	4,05
E_g : Bant aralığı (eV)	1,12
N_c : İletim bantı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	$2,8 \times 10^{19}$
N_v : Değerlik bantı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	$1,04 \times 10^{19}$
μ_e/μ_h : Elektron ve deşik mobilite oranı	1350/480
N_a : Katkılama yoğunluğu (cm^{-3})	$1,68 \times 10^{15}$
v_e, v_h : Elektron ve deşik için ısı hızı (cm/s)	1×10^7 1×10^7

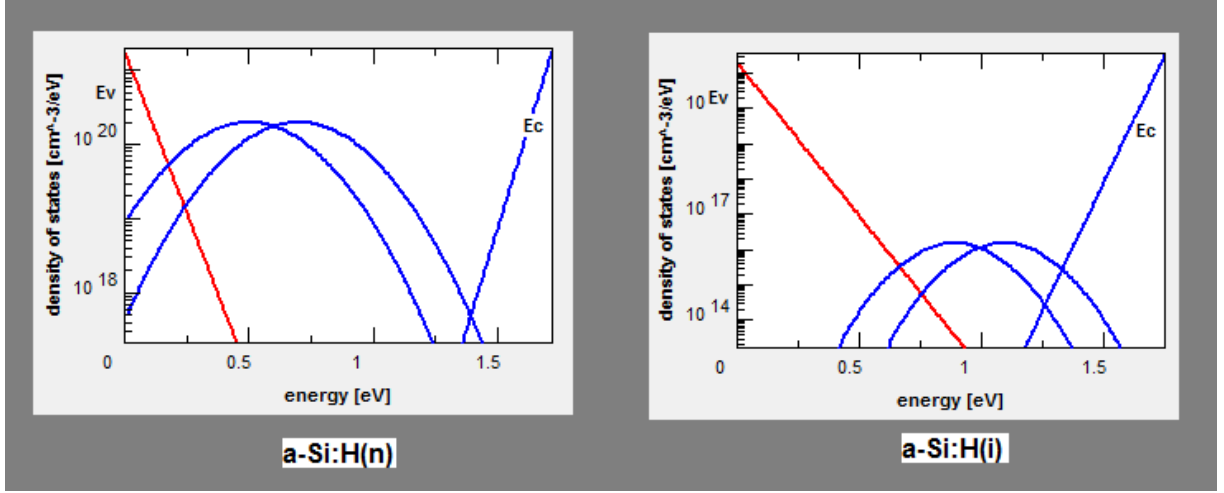
Çizelge 4.5. c-Si(p) modellemesinde kullanılan kusur parametreleri.

Parametre	H1	H2	H3
Tip	single/acceptor	single/acceptor	single/acceptor
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	$1,94 \times 10^{-16}$	$1,65 \times 10^{-16}$	$7,2 \times 10^{-18}$
E : Enerji (eV)	0,23	0,33	0,41
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	7×10^{11}	$2,5 \times 10^{12}$	$4,5 \times 10^{12}$



Şekil 4.3. c-Si(p) modellerindeki kusurların yoğunlukları ve bant aralığında konumları.

Ön kontak olarak ZnO kullanılmış ve ilk aşamada yüzey dokulanması yapılmamıştır. Arka kontak olarak ise Ag kullanılmıştır. Kullanılan a-Si:H(n) ve a-Si:H(i) tabakaların bant aralığı durum yoğunluğu grafikleri Şekil 4.4'te görülmektedir.



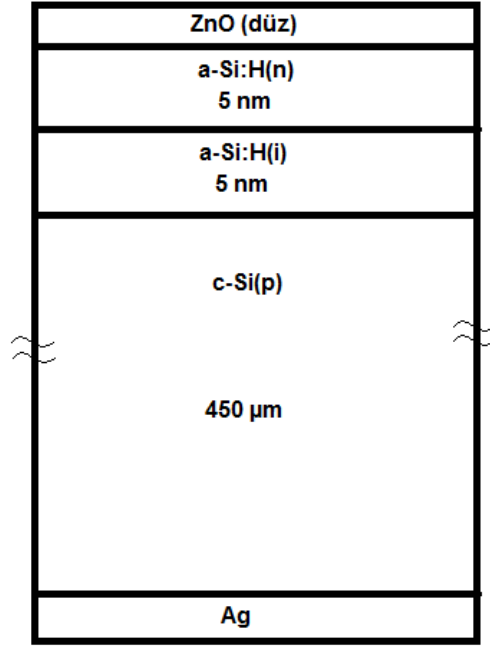
Şekil 4.4. a-Si:H(n) ve a-Si:H(i) tabakaların bant aralığı durum yoğunluğu grafikleri.

Kesit çizimi Şekil 4.5'te verilen ilk geliştirilen modeller D harfi ile isimlendirilmiş ve 3 ile 9 arası numaralandırılmıştır. D3, D4 ve D5 nolu modellerde c-Si(p) tabaka tek kusur içerirken, D6, D7 ve D8 nolu modeller iki kusurun kombinasyonunu, D9 ise üç kusuru da içermektedir.

D3 ile D9 arasındaki modeller için c-Si(p)'lerin içerdiği kusurlar ve her bir modelden elde edilen başarımlar sonuçları (V_{oc} , J_{sc} , FF, η) Çizelge 4.6'da görülmektedir. Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi H2 kusurunu içeren modeller en düşük başarımla değerine sahiptir.

Karakteristik enerjisi en yüksek olan H3 kusuru yeniden birleşme (rekombinasyon) merkezi olma olasılığı en yüksek olan kusur olmasına karşın, Kesim 3'te belirtildiği gibi yeniden birleşme hızı, yakalama sabiti ve kusur yoğunluğunun çarpımı ile doğru orantılı olduğundan (Stangl v.d., 2010), H2 kusuru etkin bir yeniden birleşme merkezi gibi davranmaktadır. Ali vd. de yaptıkları modellemelerde aynı sonucu gözlemlemişler (Ali v.d., 2011) ve H2 kusurunun etkin bir yeniden birleşme merkezi gibi davrandığını belirtmişlerdir. H1, H2 ve H3 kusurunu içeren c-Si(p) modellerinin yük taşıyıcılarının difüzyon uzunlukları ve ömür süreleri Çizelge 4.7'de verilmektedir. Çizelgede sırası

ile elektronlar ve deşikler için difüzyon uzunlukları L_n ve L_p ile, yük taşıyıcı ömür süresi ise τ_n ve τ_p ile gösterilmiştir. Çizelge 4.7'den görüldüğü gibi H2 kusrunu içeren c-Si(p) modeli en kısa yük taşıyıcı difüzyon uzunluğu ve en kısa taşıyıcı ömür süresine sahip c-Si(p) modelidir.



Şekil 4.5. Modelle çalışmalarının ilk aşamasında üzerinde çalışılan yapının kesit çizimi

Çizelge 4.6. ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Ag yapılı ve farklı kusurlara sahip c-Si(p) modelleri ile geliştirilmiş HIT güneş gözelerinin başarımlar değerleri.

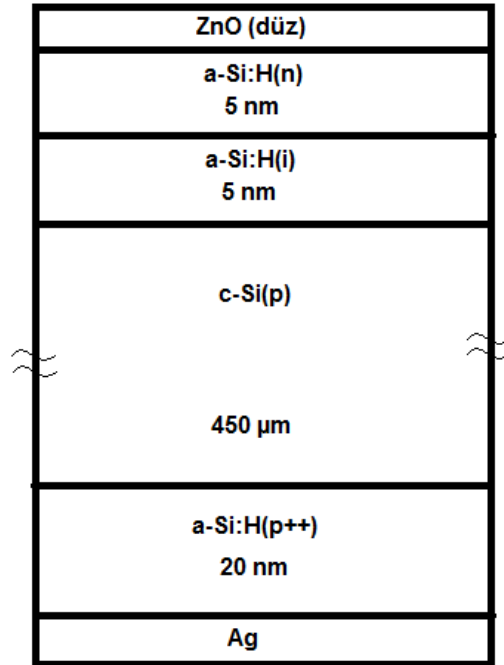
Model	c-Si(p) Kusuru	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
D3	H1	589,8	30,88	81,44	14,83
D4	H2	588,3	30,82	81,49	14,77
D5	H3	589,8	30,88	81,46	14,84
D6	H1 ve H2	588,3	30,80	81,45	14,76
D7	H1 ve H3	589,8	30,87	81,43	14,83
D8	H2 ve H3	588,3	30,81	81,47	14,77
D9	H1, H2 ve H3	588,3	30,80	81,43	14,75

Çizelge 4.7. H1, H2 ve H3 kusurlarının yük taşıyıcı ömür süreleri ve yük taşıyıcı difüzyon uzunlukları.

Kusur	τ_n (s)	τ_p (s)	L_n (cm)	L_p (cm)
H1	$7,36 \times 10^{-4}$	$7,36 \times 10^{-4}$	0,160460	0,956680
H2	$2,42 \times 10^{-4}$	$2,42 \times 10^{-4}$	0,092067	0,054898
H3	$3,09 \times 10^{-4}$	$3,09 \times 10^{-4}$	0,328507	0,195884

Modelleme çalışmasının bundan sonraki aşamalarında en düşük başarımlar değerlerini veren H2 kusurlu c-Si(p)'lerin modelleri üzerine çalışılmış ve bu modeldeki tabakalar için en uygun koşulların bulunması üzerine incelemeler yapılmıştır.

Kesim 1 ve 2'de belirtilen a-Si:H(p++) BSF tabakaların, göze başarımları üzerine olumlu etkisini nedeniyle, BSF tabakası olarak a-Si:H(p++) tabaka modellenerek, Şekil 4.6'da kesit çizimi gösterilen, ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p++)/Ag yapılı modeller incelenmiştir.

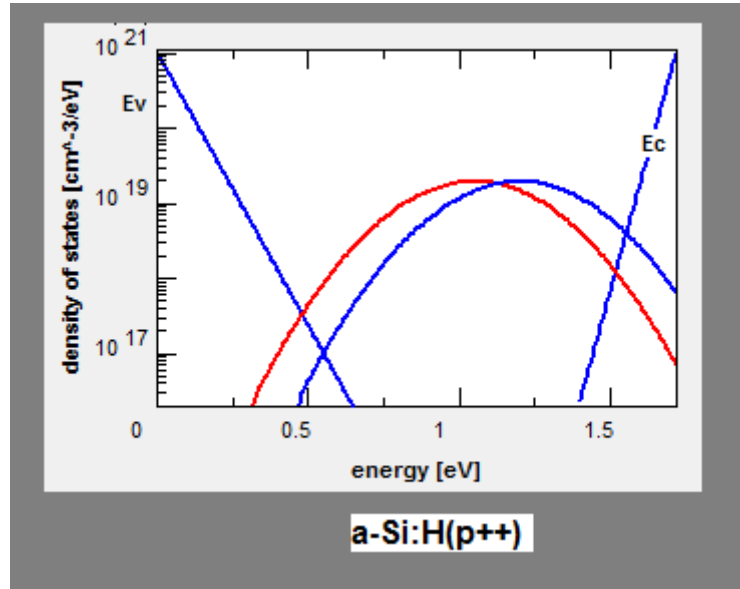


Şekil 4.6. a-Si:H(p++) BSF tabakası eklenmiş heteroeklem güneş gözesinin kesit çizimi.

BSF tabaka olarak modellenen 20nm'lik a-Si:H(p++) tabakanın elektriksel özellikleri ve bant aralığı durum yoğunluğu parametreleri Çizelge 4.9'da, bant aralığı durum yoğunluğu grafiği ise Şekil 4.7'de verilmiştir. BSF tabakanın gaussiyen kopuk bağlarının konumu a-Si:H(n) tabakaların aksine değerlik bantına yakın konumda alınmıştır. Tabaka kalınlığı çalışmanın başlarında 20 nm olarak modellenmiş daha sonra en uygun değerinin bulunması için değiştirilmiştir. BSF eklenmiş modellerin başarımları Çizelge 4.8'de verilmiştir. Literatürde de belirtildiği gibi (Dao v.d., 2010), a-Si:H(p++) BSF tabakası eklendiğinde göze başarımları artmaktadır.

Çizelge 4.8. a-Si:H(p++) BSF eklenmiş modellerin sonuçları

Model	c-Si(p) Kusuru	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
D4+BSF	H2	658,6	32,12	70,84	14,99
D6+BSF	H1 ve H2	649,2	32,08	71,27	14,84
D8+BSF	H2 ve H3	655,5	32,1	70,92	14,92
D9+BSF	H1, H2 ve H3	647,7	32,06	71,19	14,78



Şekil 4.7. a-Si:H(p++)'nin kusur özelliklerini gösteren durum yoğunluğu-enerji bant aralığı grafiği.

Çizelge 4.9. a-Si:H(p++) tabaka modellemesinde kullanılan parametreler ve bant aralığı durum yoğunluğu özellikleri

Genel parametreler	
ϵ : Dielektrik Sabiti	11,9
χ : Duygunluk (eV)	3,9
E_g : Mobilite aralığı (eV)	1,72
N_c : İletim bandı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
N_v : Değerlik bandı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{20}
N_d : Katkılama yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{19}
μ_e/μ_h : Elektron ve deşik mobilite oranı	20/5
v_e, v_h : Elektron ve deşik için ısı hızı (cm/s)	1×10^7
Bant Uzantıları Durumları	
İletim bandı uzantı durumları	
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	7×10^{-17} , 7×10^{-17}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	6×10^{19}
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	0,06
Değerlik bandı uzantı durumları	
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	7×10^{-17} , 7×10^{-17}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	3×10^{19}
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	0,03
Kopuk Bağlar	
Verici Tipi	Gauss/donor
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	1×10^{-15} , 1×10^{-16}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	$9,776 \times 10^{18}$
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	1,05
Sigma (eV)	0,2
Alıcı Tipi	Gauss/acceptor
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	1×10^{-16} , 1×10^{-15}
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	$9,776 \times 10^{18}$
E_u : Urbach Enerjisi (eV)	1,2
Sigma (eV)	0,2

BSF tabakaları ile gerçekleştirilmiş modellemelerden sonra, c-Si(p) tabakanın önünde ve arkasında bulunan arayüz tabakaları modellenmiştir. Arayüz tabakaları modellenirken hem c-Si(p) soğurucu tabakanın özelliklerini hem de a-Si:H tabakanın özelliklerini içermesine dikkat edilmiştir. Arayüzler modellenirken kullanılan parametreler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Arayüz kusurlarındaki kusur tipleri, nokta kusur ve verici tipi olarak alınmış bu sebeple yazılımda *single donor* seçeneği seçilmiştir. Kusurların özellikleri bitişiklerindeki c-Si(p) tabaka ile aynı alınmış sadece kusur yoğunluğu en uygun değeri bulmak ve arayüz kusurlarının etkisini incelemek adına $3,3 \times 10^{17}$ ile $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ arasında değiştirilmiştir. Bu değerler 3 nm olan arayüz kalınlığı ile çarpılırsa bu değerler $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ile $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ aralığına denk gelmektedir. ZnO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/a-Si:H(p++)/Ag yapılı D4 ve D6 modellerinde kusur yoğunluğu $3,3 \times 10^{17}$ ve $3,3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ değerlerinde iken göze başarımı çok etkilenmemiştir. D8 ve D9 modellerinde ise durum yoğunluğu $3,3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ değerine çıkarıldığında göze başarımında ciddi düşüşler gözlenmiştir. a-Si:H(i) kullanılmadığı durumlarda $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ değerine kadar göze başarımının etkilenmemesi literatürde de gözlenmiş bir durumdur (Stangl v.d., 2001). D8 ve D9 modellerinde başarımın $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 'ye denk gelen arayüz kusur yoğunluklarında düşmeye başlaması ise beklenen bir durumdur. Zhao vd.'nin çalışmalarında (2009) gösterdikleri gibi c-Si(p)'deki kusur yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda arayüz kusur yoğunluğu göze başarımı değerlerini daha olumsuz etkilemiştir. D8 modeli H2 ve H3 kusurlarının biraraya getirildiği modeldir. H3 kusuru diğer kusurlarla karşılaştırıldığında Çizelge 4.5'te verildiği gibi en yüksek kusur yoğunluğuna sahip kusurdur. H2 ve H3'ün kombinasyonu ile yaratılmış D8 modelinin, aynı zamanda tüm kusurların kombinasyonunu içeren en kusurlu model olan D9 modelinin D4 ve D6'ya göre daha düşük arayüz kusur yoğunluğu değerlerinde göze karakteristiğini bozması beklenmektedir. Durum yoğunluğu $3,3 \times 10^{19}$ ve $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ değerine çıktığında ise tüm modellerde göze başarım değerlerinin hepsi düşmüştür.

ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-SiH(p++)/Ag yapılı BSF'li HIT gözelerde ise arayüz durum yoğunluğu değerinin artışı göze başarımında herhangi bir değişime yol açmamıştır. Bunun sebebi HIT yapılarında kullanılan a-Si:H(i) tabakanın c-Si(p) yüzeyinde yaptığı pasifleştirmedir. Kesim 2'de anlatıldığı gibi a-Si:H(i) tabaka

arayüzdeki durumları doyurarak göze başarımının arayüz durumlarından etkilenmesini engellemiştir.

Çizelge 4.10. Arayüzlerin modellemesinde kullanılan parametreler

Genel parametreler	Ön Arayüz	Arka Arayüz
d : Kalınlık (nm)	3	3
ϵ : Dielektrik Sabiti	11,9	11,9
χ : Duygunluk (eV)	4,05	4,05
E_g : Mobilite aralığı (eV)	1,72	1,72
N_c : İletim bandı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	$2,8 \times 10^{19}$	$2,8 \times 10^{19}$
N_v : Değerlik bandı etkin durum yoğunluğu (cm^{-3})	$1,04 \times 10^{19}$	$1,04 \times 10^{19}$
μ_e/μ_h : Elektron ve deşik mobilite oranı	1350/480	1350/480
N_a : Katkılama yoğunluğu (cm^{-3})	1×10^{18}	1×10^{19}
v_e, v_h : Elektron ve deşik için ısı hızı (cm/s)	1×10^7	1×10^7
Kusurlar		
Tipi	single/donor	single/donor
c_n, c_p : Yakalama sabiti (cm^{-2})	c-Si(p)'deki kusurla aynı	c-Si(p)'deki kusurla aynı
E : Enerji (eV)	c-Si(p)'deki kusurla aynı	c-Si(p)'deki kusurla aynı
N_{tr} : Durum Yoğunluğu (cm^{-3})	Değişken	Değişken

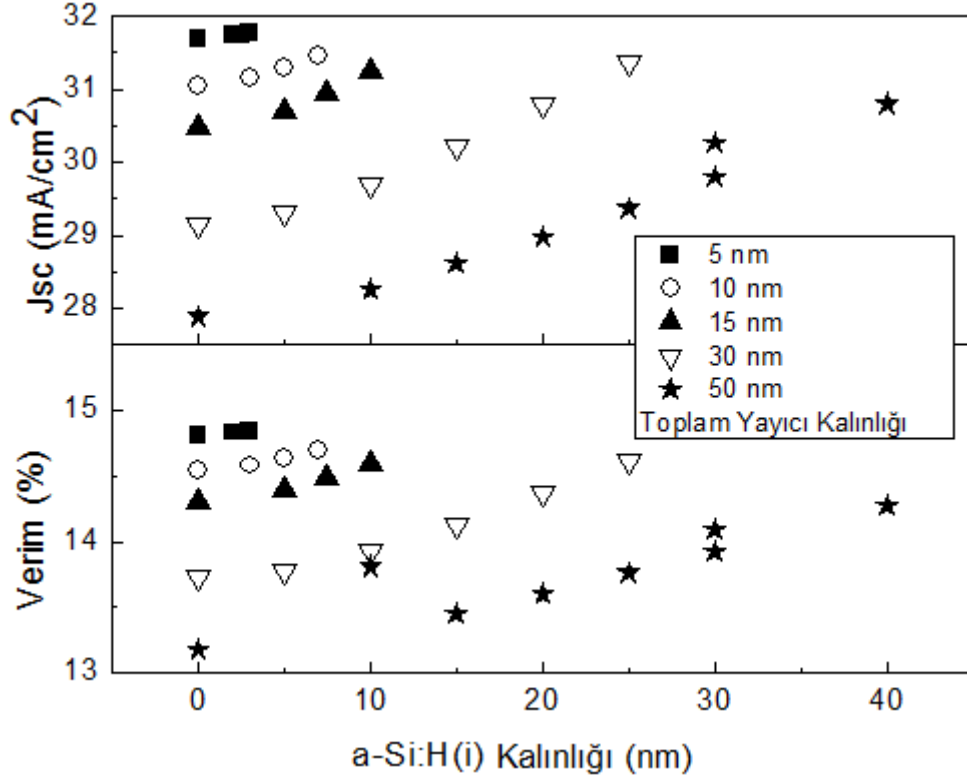
Çalışmanın devamında ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-SiH(p++)/Ag yapılı BSF'li HIT gözelerde arka arayüz durumlarının etkisi incelenmiştir. Arka arayüzlerin de durum yoğunluğu $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ve $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ arasında değiştirilmiştir. Arka arayüz durum yoğunluğunun artışı sonucu açık devre gerilimi sabit kalırken, kısa devre akımı çok az da olsa değişmiştir. Dolum çarpanı ve verim ise arka arayüz kullanıldığında ve durum yoğunluğu artırıldığında Datta vd.'nin çalışmalarında da (2008; 2009; 2010) gözlediği gibi ciddi bir şekilde azalmıştır. Arka arayüzün dolum çarpanı ve verim değerlerine etkisi Çizelge 4.11'de görülmektedir.

Çizelge 4.11. Arka arayüz kusur yoğunluğu değişiminin dolum çarpanı ve verim değerlerine etkisi.

Model	Arka Arayüz Kusur Yoğunluğu (cm^{-3})					
	Yok		$3,3 \times 10^{17}$		1×10^{20}	
	FF (%)	η (%)	FF (%)	η (%)	FF (%)	η (%)
D4	70,84	14,99	59,64	12,64	38,7	7,98
D6	71,27	14,84	62,25	12,98	39,51	8,09
D8	70,92	14,92	61,92	13,03	38,77	7,89
D9	71,19	14,78	64,43	13,38	38,85	7,8

4.3. Yayıcı Tabaka İçin En İyi Koşulların Belirlenmesi

Yayıcı tabakada en iyi koşulların elde edilmesi için ilk olarak a-Si:H(n) ve a-Si:H(i) tabakalarının kalınlıkları değiştirilmiştir. Bu değişimler yapılırken ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p++)/Ag yapılı D4 modeli kullanılmıştır. Arayüz durumlarının gözönüne alınıp modellendiği ve modellenmediği tüm yapılarda yayıcı tabaka kalınlığının artışı Kesim 4.1’de ve literatürde gözlemlendiği gibi kısa devre akımı ve verim değerlerini olumsuz etkilerken, açık devre gerilimi ve dolum çarpanı değerlerinde az bir etki göstermiştir. Arayüz durumu olmadığı durumlarda açık devre gerilimi değeri yayıcı tabakanın toplam kalınlığının 5nm olduğu durumda 658,6 mV iken 50 nm’de 654 mV’a düşmüştür. Kısa devre akımı ve verim değerlerindeki değişim Şekil 4.8’de görülmektedir. Şekil 4.8’den de gözlenebileceği gibi yayıcı tabaka kalınlığı olabildiğince ince seçilmelidir. Gerçekçi bir model yapabilmek adına modellerimizde yayıcı kalınlığı toplam 10 nm olarak alınmıştır. a-Si:H(i) tabaka kalınlığının a-Si:H(n) tabaka kalınlığından daha yüksek olduğu durumlarda göze başarımı daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum Kesim 2’de anlatıldığı gibi ve Stangl vd’nin çalışmalarında (2001) bahsettiği gibi kusur yoğunluğu daha yüksek a-Si:H(n)’e göre kusur yoğunluğu az olan a-Si:H(i)’nin daha kalın olduğu durumlarda a-Si:H(n)/a-Si:H(i) yayıcı daha az kusur içermekte ve verim daha yüksek olmaktadır.



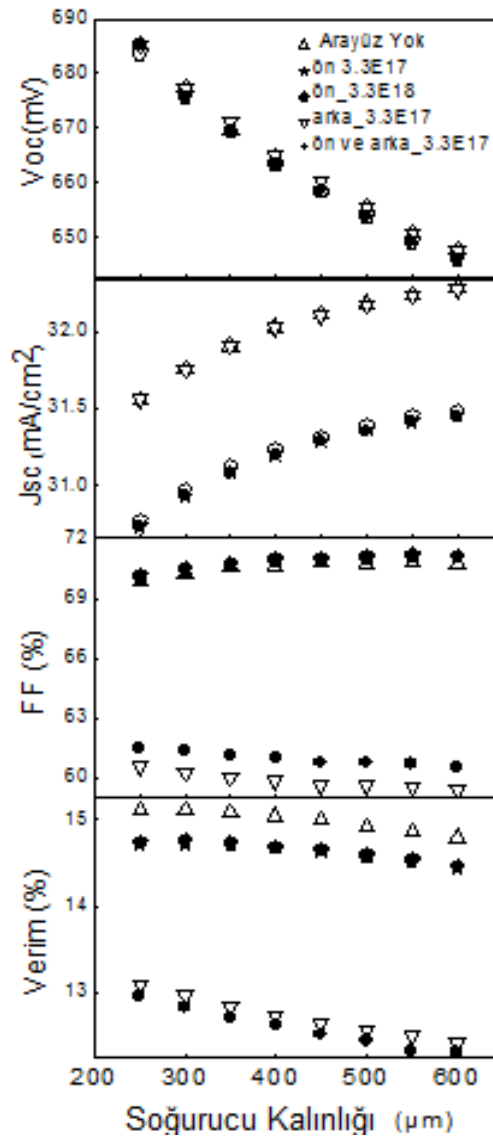
Şekil 4.8. Toplam yayıcı kalınlığı ve a-Si:H(i) tabaka kalınlıklarının kısa devre akımı ve verim değerlerine etkisi

4.4. Soğurucu Tabaka İçin En İyi Koşulların Bulunması

Soğurucu tabakanın en iyi koşulların bulunması için yapılan ilk çalışmada yayıcı tabakada olduğu gibi soğurucu tabakanın da kalınlığı değiştirilmiştir. Bu çalışma yapılırken ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p++)/Ag yapılı D4 modeli kullanılmıştır. Soğurucu tabaka kalınlığının göze başarımına etkisinin gözlenebilmesi için kalınlık 250 μm ile 600 μm arasında değiştirilmiştir. Şekil 4.9'da bu değişimin etkisi görülmektedir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi soğurucu kalınlığı arttıkça açık devre gerilimi azalmaktadır. Açık devre geriliminin azalması Kesim 2'de de anlatıldığı gibi yapı içinde alınan yolun artması ile yapı yeniden birleşmelerinin artmasına ve açık devre geriliminin buna bağlı olarak düşmesine bağlıdır. Kısa devre akımı Kesim 2'de de belirtildiği gibi kalınlığın artışı ile artan soğurma miktarı sayesinde artmıştır. Arayüz kusurunun dikkate alınmadığı modellerde ve c-Si(p) arkasında arayüz kusurunun dikkate alındığı modellerde kısa devre akımı daha yüksek elde edilmiştir. Dolum çarpanı soğurucu kalınlığı ile hemen hemen sabit kalmış, verim ise ise tüm yapılar için %1 miktarında azalma göstermiştir. En yüksek verim, dolum çarpanı gibi arayüz olmadığı durumlarda ve kusurun c-Si(p)'nin önünde olduğu durumlarda

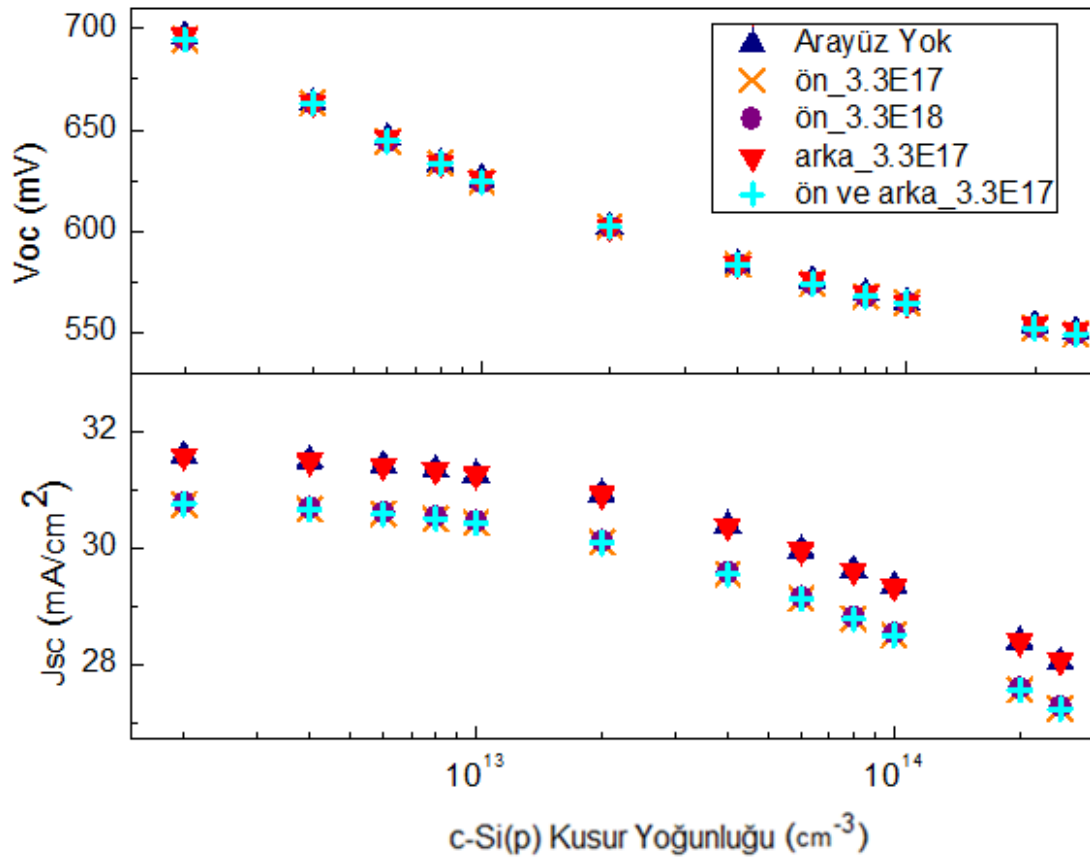
elde edilmiştir. Arka tarafta ve hem ön hem de arkada arayüz kusuru olan durumlarda dolum çarpanı ve verim değeri daha düşük çıkmıştır. Literatürde de c-Si(p)'nin arka tarafındaki arayüzün verim ve dolum çarpanını olumsuz etkilediği belirtilmiştir (Datta v.d., 2008; 2009; 2010).

c-Si(p) kalınlığında en iyi koşulu bulma çalışmalarından görülebileceği gibi verim değerleri çok değişmemiştir. Kesim 1'de de belirtildiği gibi c-Si(p) tabaka kalınlığının ince olması gereken malzeme miktarını dolayısı ile maliyeti azaltacağından üretim aşamasında daha ince dilimler ile çalışmak uygun olmaktadır (Tsunomura v.d., 2008).



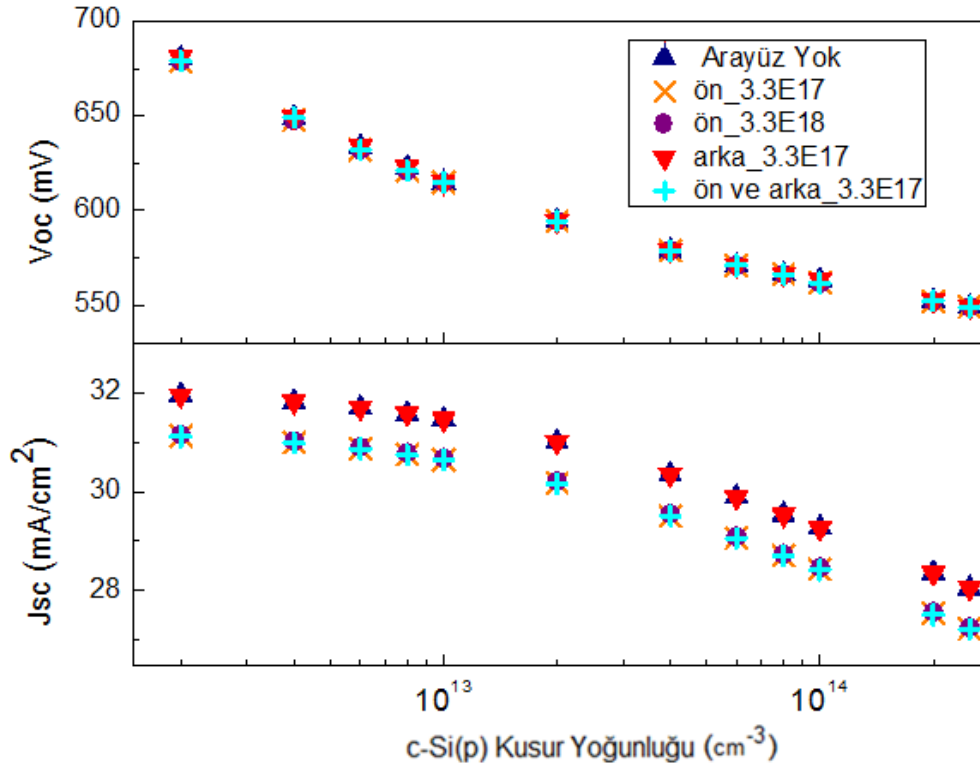
Şekil 4.9. Soğurucu kalınlığının ZnO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p++)/Ag yapıları heteroeklem güneş gözelerine etkisi

Soğurucu tabaka ile ilgili yapılan bir diğer çalışma c-Si(p)'nin kusur yoğunluğunun etkisinin gözlenmesidir. Bu etkiyi gözlemleme amacı ile c-Si(p) durum yoğunluğu $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ile $2,5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ arasında değiştirilmiştir. Bu inceleme yapılırken D4 modeli kullanılmıştır. c-Si(p) kusur yoğunluğunun arayüzdeki durumların dikkate alınlığı ve alınmadığı modellerde artışının etkisi sırası ile 250 μm soğurucu kalınlıklı göze modeli için Şekil 4.10'da, 350 μm soğurucu kalınlıklı göze modeli için Şekil 4.11'de ve 250 μm soğurucu kalınlıklı göze modeli için Şekil 4.12'de görülmektedir.

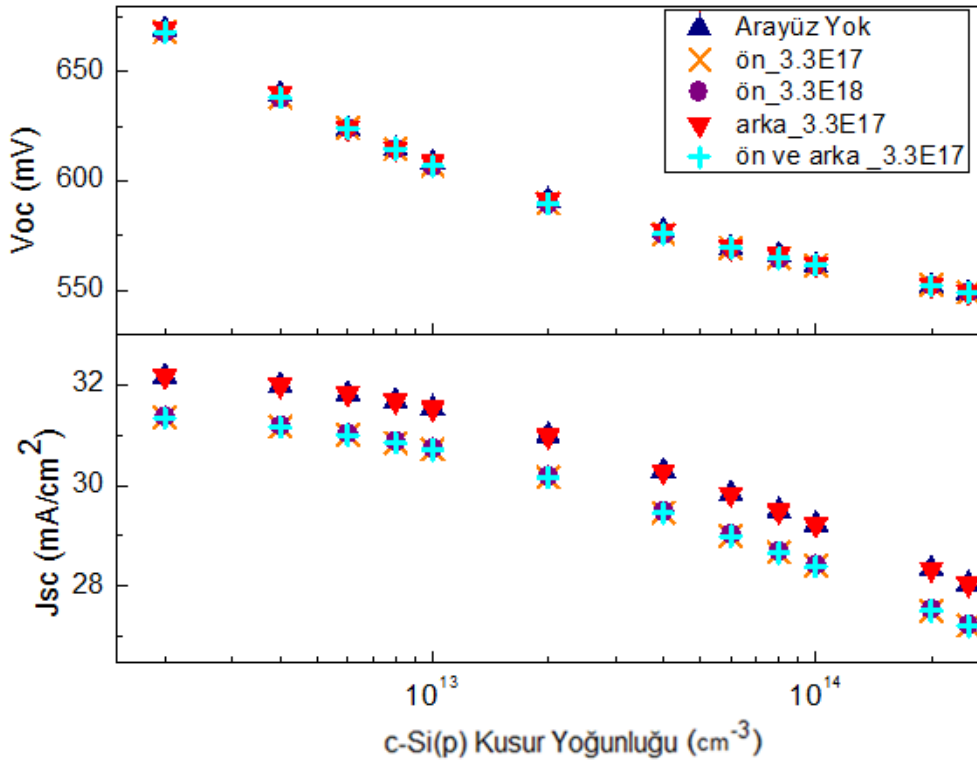


Şekil 4.10. c-Si(p) kalınlığının 250 μm olduğu durumda c-Si(p) kusur yoğunluğunun açık devre gerilimi ve kısa devre akımına etkisi

Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de görüleceği gibi c-Si(p) durum yoğunluğunun artışı açık devre gerilimi ve kısa devre akımının değerini arayüz durumlarının dikkate alındığı ve alınmadığı tüm yapılarda ve bütün soğurucu kalınlıklarında düşmüştür. Dolum çarpanı değerleri ise hemen hemen sabit kalırken verim değerleri %14 civarından %10 değerlerine inmiştir.

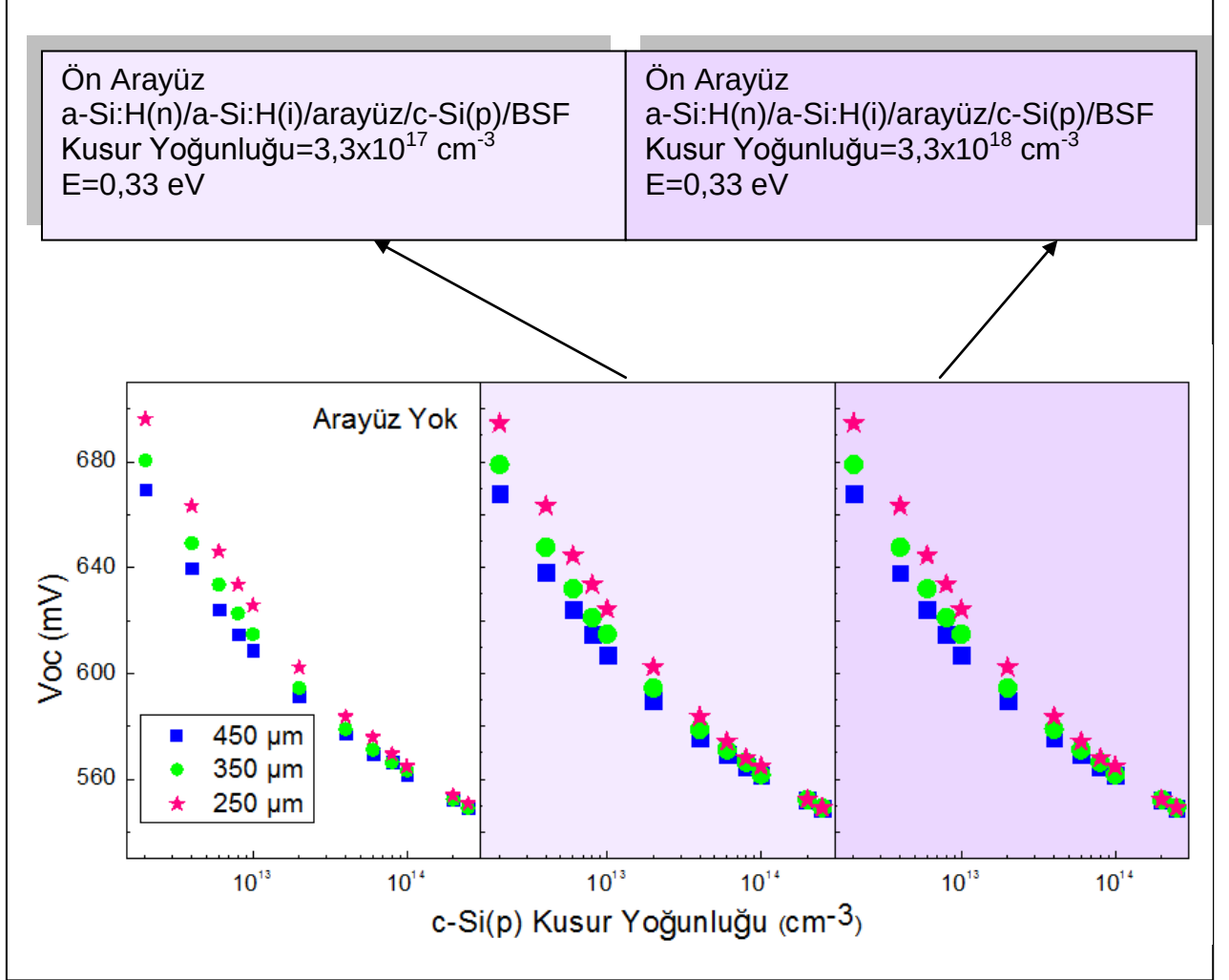


Şekil 4.11. c-Si(p) kalınlığının 350 μm olduğu durumda c-Si(p) kusur yoğunluğunun açık devre gerilimi ve kısa devre akımına etkisi



Şekil 4.12. c-Si(p) kalınlığının 450 μm olduğu durumda c-Si(p) kusur yoğunluğunun açık devre gerilimi ve kısa devre akımına etkisi

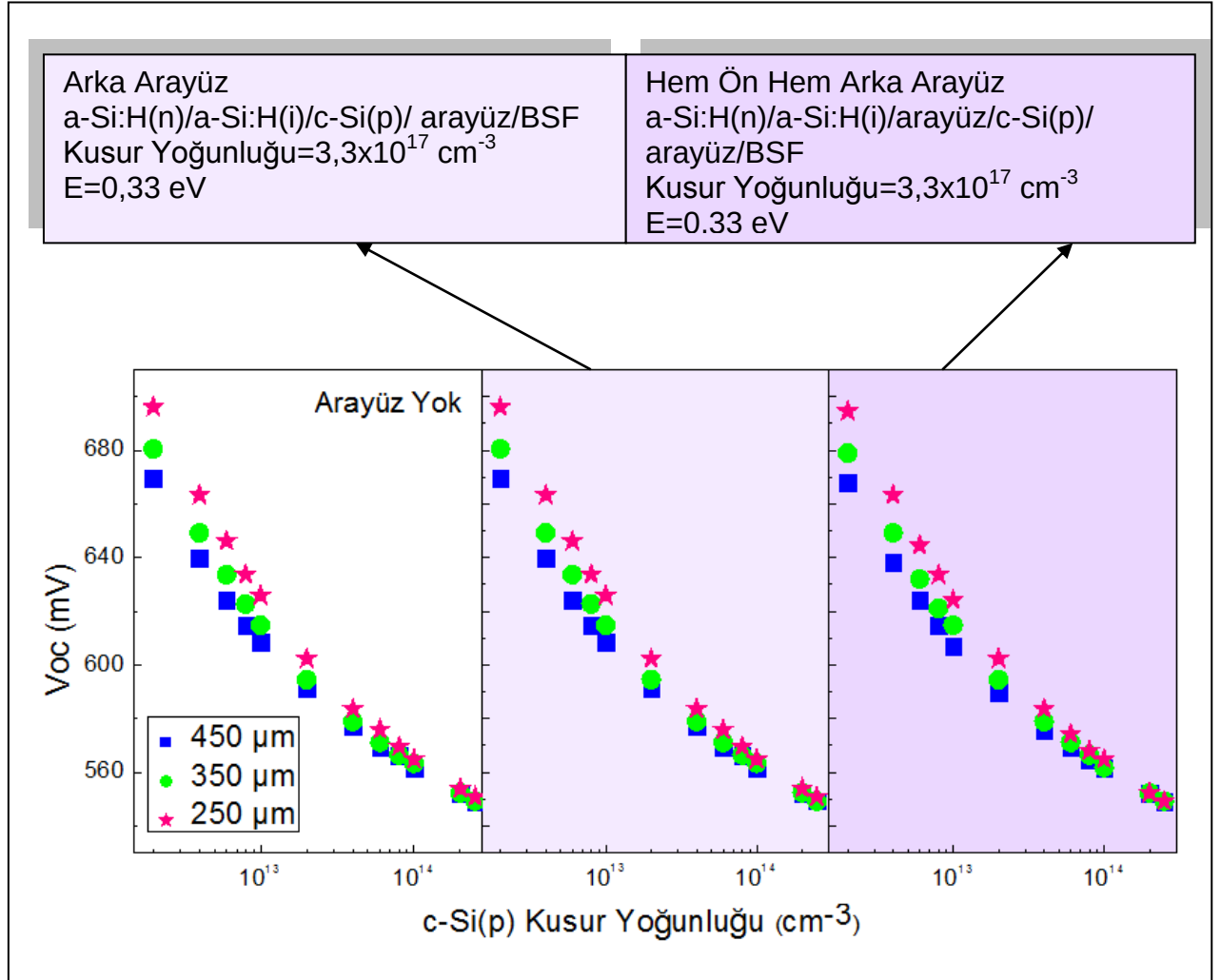
c-Si(p) kusur yoğunluğu ile 250, 350 ve 450 μm kalınlığındaki c-Si(p) soğurucu tabakalı, arayüzdeki durumların dikkate alındığı ve alınmadığı modeller için açık devre gerilimi değerlerindeki değişim Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ile verilmiştir.



Şekil 4.13. c-Si(p) kusur yoğunluğu ile arayüz durumlarının dikkate alınmadığı ve c-Si(p)'nin ön kısmındaki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde farklı c-Si(p) kalınlıklarında açık devre gerilimi değişimi.

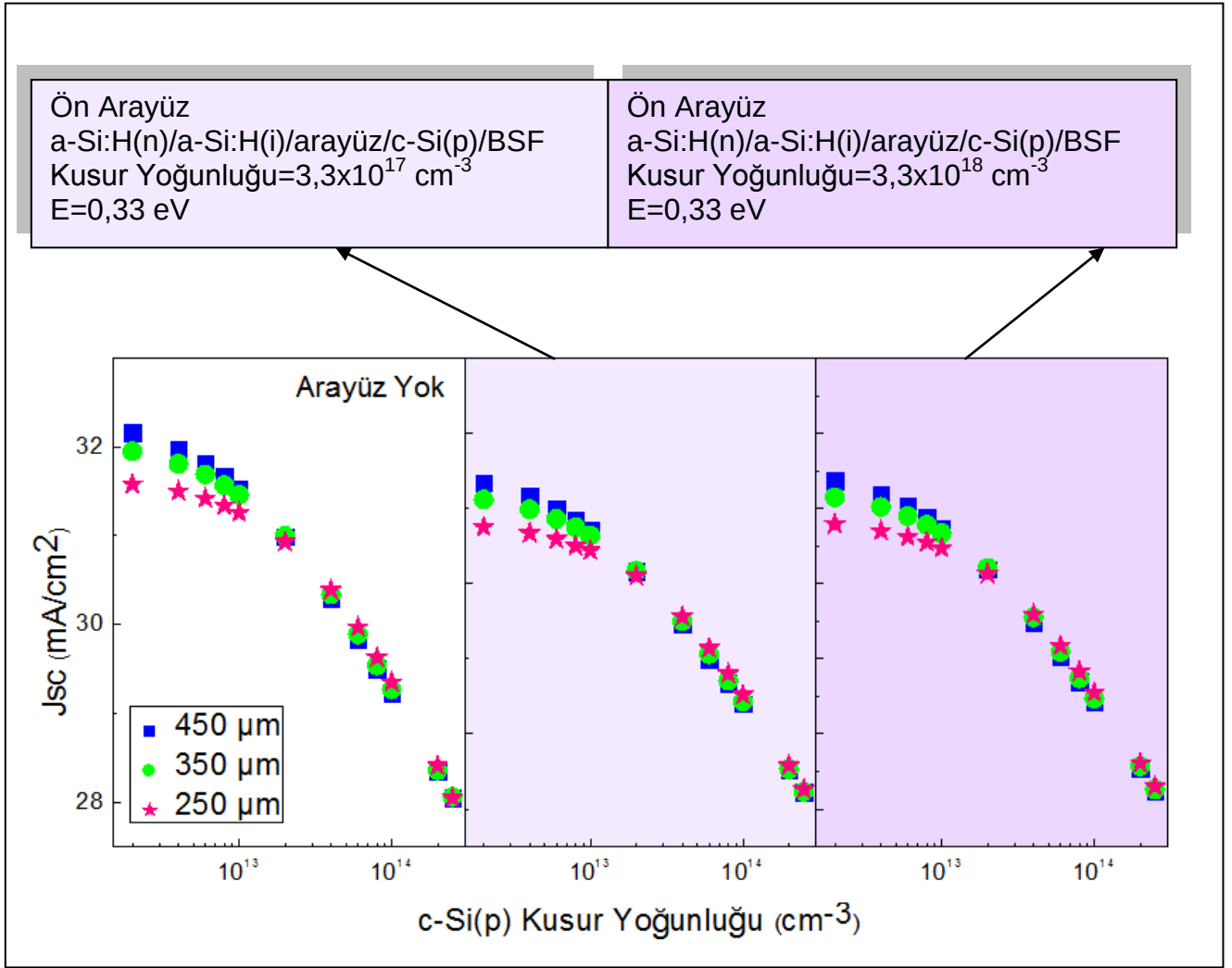
Şekil 4.13'te renklendirilmemiş alan arayüz durumlarının dikkate alınmadığı modelin, açık mor $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluğuna sahip c-Si(p) önündeki arayüzün dikkate alındığı modelin, koyu mor olan alan ise c-Si(p) önündeki $3,3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluğuna sahip c-Si(p) arayüzün dikkate alındığı modelin sonuçlarını vermektedir. Şekil 4.14'te ise renklendirilmemiş alan arayüz durumlarının dikkate alınmadığı modelin, açık mor $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluğuna sahip c-Si(p) arkasındaki arayüzün dikkate alındığı modelin, koyu mor olan alan ise c-Si(p)'nin hem önünde

hem de arkasındaki $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluğuna sahip arayüzü dikkate alan modelin sonuçlarını vermektedir.



Şekil 4.14. c-Si(p) kusur yoğunluğu ile arayüz durumlarının dikkate alınmadığı ve c-Si(p)'nin hem ön hem de arka kısmındaki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde farklı c-Si(p) kalınlıklarında açık devre gerilimi değişimi.

c-Si(p) durum yoğunluğu ile 250, 350 ve 450 μm kalınlığındaki, arayüzdeki durumların dikkate alındığı ve alınmadığı modeller için kısa devre akımı değerlerindeki değişim Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 ile verilmiştir. Şekil 4.15'te renklendirilmemiş alan arayüz durumlarının dikkate alınmadığı modelin, açık mor $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluğuna sahip c-Si(p) önündeki arayüzün dikkate alındığı modelin, koyu mor olan alan ise c-Si(p) önündeki $3,3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ durum yoğunluğuna sahip c-Si(p) önündeki arayüzün dikkate alındığı modelin sonuçlarını vermektedir.

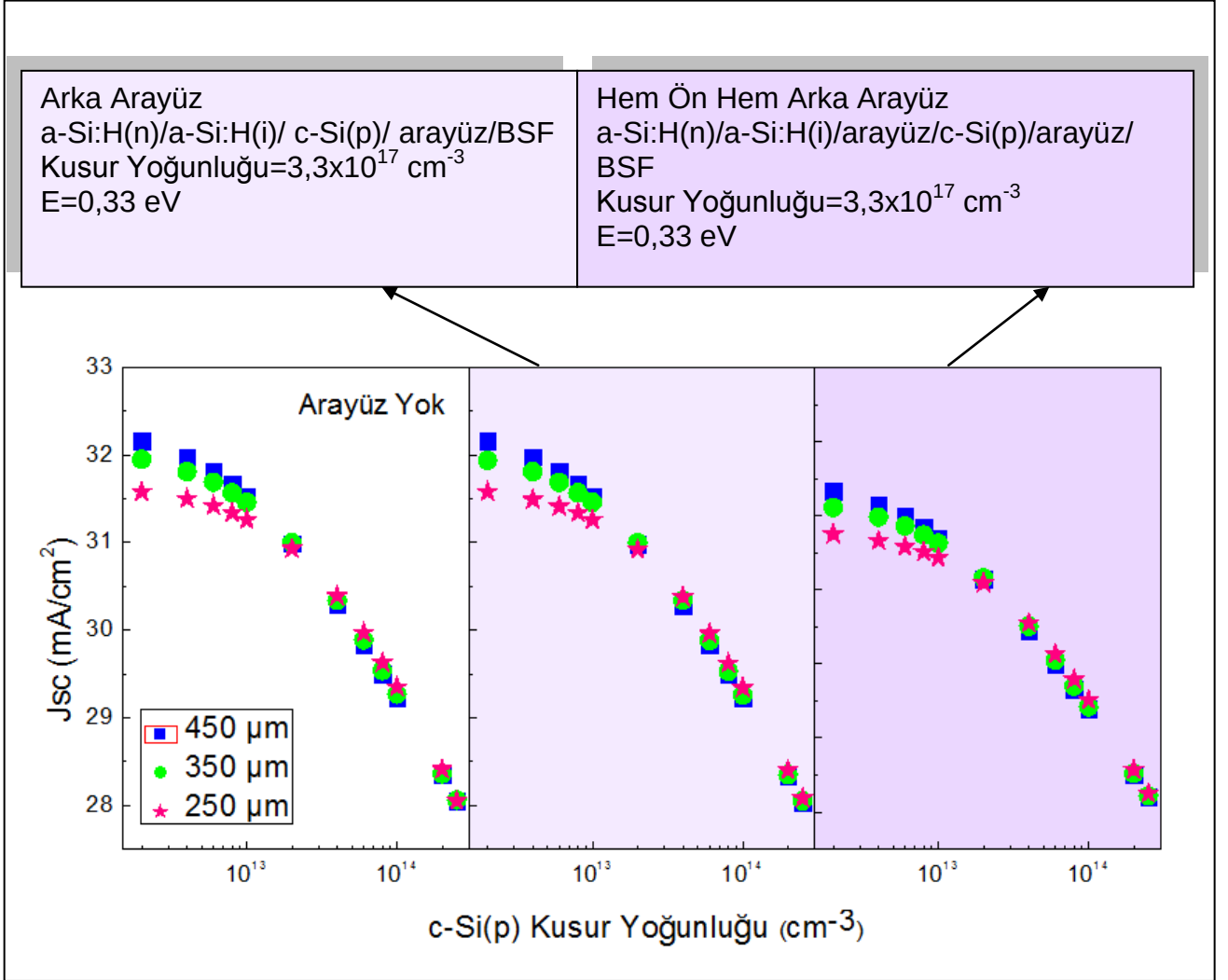


Şekil 4.15. c-Si(p) kusur yoğunluğu ile arayüz durumlarının dikkate alınmadığı ve c-Si(p)'nin ön kısmındaki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde farklı c-Si(p) kalınlıklarında kısa devre akımı değişimi.

Şekil 4.16'da ise renklendirilmemiş alan arayüz durumlarının dikkate alınmadığı modelin, açık mor $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluğuna sahip c-Si(p) arkasındaki arayüzün dikkate alındığı modelin, koyu mor olan alan ise c-Si(p)'nin hem önünde hem de arkasındaki $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluğuna sahip arayüzü dikkate alan modelin sonuçlarını vermektedir.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde c-Si(p) kalınlığı 450 μm iken açık devre gerilimi en düşük değerinde fakat kısa devre akımı en yüksek değerinde gözlenmiş, 250 μm iken ise açık devre gerilimi en yüksek kısa devre akımı en düşük değerinde gözlenmiştir.

c-Si(p) durum yoğunluğunun artışı ile birlikte c-Si(p) içindeki yeniden birleşmeler artmaktadır. Bu artış ile göze başarımlar değerlerinin düşmesi beklenmektedir.



Şekil 4.16. c-Si(p) kusur yoğunluğu ile arayüz durumlarının dikkate alınmadığı ve c-Si(p)'nin hem ön hem de arka kısmındaki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde farklı c-Si(p) kalınlıklarında kısa devre akımı değişimi.

4.5. a-Si:H(p++) BSF Tabaka İçin En İyi Koşulların Bulunması

a-Si:H(p++) BSF tabakanı en iyi koşullarının bulunması için ilk olarak BSF kalınlığı 10 nm ile 100 nm arasında değiştirilmiştir. En iyi koşulları bulmak için D4 modeli kullanılmıştır. BSF kalınlığı değişimi ile göze başarımlar parametreleri hemen hemen hiç değişmemiştir. Maydell vd.'nin çalışmalarında (2006a) belirtildiği gibi a-Si:H(p++) BSF

kalınlığı seri direnci arttırmadığı sürece kalın seçilebilmektedir. İncelediğimiz aralıkta böyle bir etkiye raslanmamıştır.

Çalışmanın devamında a-Si:H(p++) bant aralığı değerleri 1,4 ile 1,75 eV arası değiştirilmiştir. Bant aralığının değişimi sonucu göze parametrelerinin değişimi Çizelge 4.12’de görülmektedir. a-Si:H(p++) malzemenin bant aralığı değeri dolayısı ile değerlik bantı ofseti değeri arttıkça arayüz durumlarının dikkate alınmadığı ve c-Si(p)’nin önündeki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde dolum çarpanı ve verim azalmıştır. Bunun sebebi değerlik bantı ofsetinin artışı ile c-Si(p) çoğunluk taşıyıcısı olandeşiklerin Datta vd. (2010) ve Dao vd. (2010)’nin çalışmalarında belirttiği gibi BSF’ye geçememeleri ve bant kenarında birikmeleridir. Bu birikme sonucu oluşan alan gelen diğerdeşikleri de ön kontak yönünde iter. Kesim 2’de anlatıldığı gibi ters yönde bir difüzyon meydana gelir. c-Si(p)’nin arkasındaki arayüz durumlarının dikkate alındığı modellerde kısa devre akımı, değerlik bantı ofseti artışı ile artmıştır

Çizelge 4.12. a-Si:H(p++) BSF tabaka mobilite aralığının değişimi ile iletim bantı ofseti, dolum çarpanı ve verim değerlerinin değişimi.

Eg	ΔE_v	Arayüz Yok		Önde $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluklu arayüz		Önde $3,3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluklu arayüz		Arkada $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluklu arayüz		Hem önde hem arkada $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kusuryoğunluklu arayüz	
		FF (%)	$\eta(\%)$	FF (%)	$\eta(\%)$	FF (%)	$\eta(\%)$	FF (%)	$\eta(\%)$	FF (%)	$\eta(\%)$
1.4	0.13	77.65	15.65	77.6	15.24	77.6	15.26	36.13	7.18	36.74	7.11
1.5	0.23	75.21	15.75	75.34	15.33	75.34	15.35	40.15	8.45	41.02	8.38
1.6	0.33	74.48	15.75	74.61	15.34	74.61	15.36	47.28	9.99	48.21	9.93
1.65	0.38	74.32	15.72	74.45	15.31	74.45	15.32	51.37	10.89	52.5	10.82
1.68	0.41	73.86	15.62	73.83	15.22	73.83	15.23	54.12	11.47	55.29	11.39
1.72	0.45	63.71	13.47	64.11	13.21	64.1	13.22	57.49	12.19	58.69	12.09
1.75	0.48	45.01	8.96	44.91	8.81	44.91	8.82	59.53	12.62	60.71	12.51

5. SONUÇ

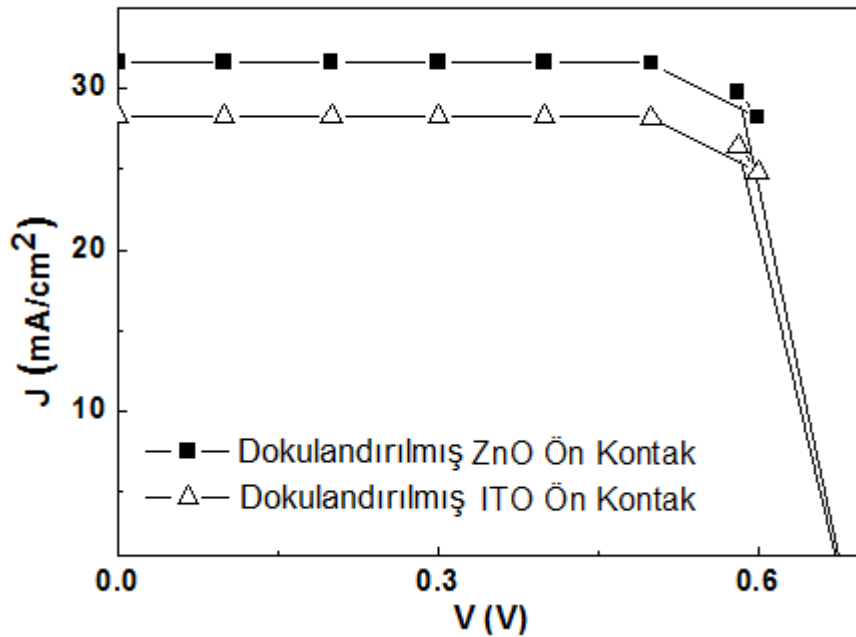
Tez çalışmasında a-Si:H(n)/c-Si(p) heteroeklem güneş gözesi modelleme çalışması AFORS-HET v2.4.1. yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında ilk olarak tabakaların modellenmesinde kullanılan parametreler belirlenmiş, daha sonra a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözesi modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde tüm tabakaların kalınlıklarının, c-Si(p) soğurucu tabakada bulunan farklı kusur özelliklerinin ve kusur yoğunluklarının, a-Si:H(p++) BSF tabaka mobilite aralığının ve ek olarak a-Si:H(n) ve c-Si(p) tabakaları arasında a-Si:H(i) tabaka kullanımının göze başarımı üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan modelleme çalışmaları sonucunda yüksek göze başarımı elde etmek için en uygun koşullar, tüm tabakalar için belirlenmiş ve irdelenmiştir. Belirlenen koşullar kullanılarak çalışmada kullanılan tabakalar için en iyi göze modelleri geliştirilmeye çalışılmıştır.

Değerlendirmeler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

- Yayıcı kalınlığının arttıkça yayıcı tabakada soğurulan ışınım artmaktadır. Bu sebeple gözenin kısa devre akımı azalmaktadır. a-Si:H(n)/c-Si(p) heteroeklem güneş gözelerinde yayıcı kalınlığı olabildiğince az olmalıdır.
- Sabit yayıcı kalınlığında, a-Si:H(n) ve c-Si(p) tabakaları arasına yerleştirilen a-Si:H(i) tabakasının kalınlığı a-Si:H(n) tabaka kalınlığından daha fazla olmalıdır. a-Si:H(i) kalınlığının a-Si:H(n)'e göre daha kalın olması ile a-Si:H(n)/a-Si:H(i) yayıcının toplam kusur yoğunluğu azalmakta ve göze verimi daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Sabit yayıcı kalınlığında a-Si:H(i)'nin, a-Si:H(n)'e göre kalınlığı arttırıldığında kısa devre akımı ve verim artmaktadır.
- c-Si(p) soğurucu tabakası ve a-Si:H(p++) BSF tabakası kalınlıkları göze başarımını pek etkilemediğinden, bu tabakaların daha ince seçilmesi ile malzeme maliyeti azaltılabilir.
- a-Si:H(n)/c-Si(p) ön arayüzde a-Si:H(i) tabaka kullanılmadığı zaman burada bulunan kusurların yoğunluğu $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerinden yüksek olduğu durumlarda göze başarımı düşmektedir.
- c-Si(p)/a-Si:H(p++) arka arayüzde bulunan kusurların yoğunluğu $3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ değerinden yüksek olduğunda dolum çarpanı ve verim azalmaktadır.

- c-Si(p)'nin önündeki arayüz durumları dikkate alındığında veya arayüz kusurları dikkate alınmadığında, c-Si(p)/a-Si:H(p++) arayüzde oluşan değerlik bant ofseti 0,45 eV değerinden yüksek olduğunda arayüzde birikendeşiklerden dolayı dolum çarpanı ve verim ani bir şekilde düşmektedir. Fakat c-Si(p)'nin arka tarafında olan arayüz durumları modellendiğinde artan bant ofseti ile dolum çarpanı ve verim artmaktadır.

Modelleme çalışmaları sonucu elde edilen en uygun koşullarla, ZnO ve ITO ön kontaklı modeller geliştirilmiş ve yüzey dokulanmasının etkisi incelenmiştir. En uygun koşullarda modellenmiş, yüzeyi dokulandırılmış, ZnO ve ITO ön kontaklı modellerden bir tanesinin J-V eğrisi Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. En iyi göze koşulları ile modellenmiş dokulandırılmış ZnO ve ITO ön kontaklı TCO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p++)/Ag yapılı heteroeklem güneş gözesi J-V eğrisi

Şekil 5.1'de görülen güneş gözesi modelinde a-Si:H(n) ve a-Si:H(i) tabakaların kalınlıkları sırası ile 3 nm ve 7nm olarak modellenmiştir. c-Si(p) kalınlığı 200 μ m olarak modellenirken, a-Si:H(p++) 70 nm olarak modellenmiştir. a-Si:H(p++) tabakanın mobilite aralığı 1,5 eV'tur. Dokulanma açısı yazılımda 54.74° değerinde seçilmiştir. ZnO ön kontaklı modelde daha yüksek kısa devre akımı elde edilmiştir.

Şekil 5.1’de verilmiş, ZnO ön kontaklı modelden elde edilen başarımlar değerleri;

$V_{oc} = 680,5 \text{ mV}$, $J_{sc} = 31,7 \text{ mA/cm}^2$, $FF = \%80,32$ ve $\eta = 17,33$ değerlerindedir.

Çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar literatürdeki sonuçlarla uyum içindedir. Modelleme yapılırken kullanılan parametreler literatürden ve deneysel verilerden alınmış, modeller gerçek örneklerin koşullarına uygun şekilde yapılmıştır. Bu sebeple elde edilen bulgular üretim sürecinde kullanılabilecek niteliktedir.

KAYNAKLAR

Ali A., Gouveas T, Hasan M.A., Zaidi S.H., Asghar M., 2011, Influence of deep level defects on the performance of crystalline silicon solar cells: Experimental and simulation study, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95, 2805-2810.

Anderson R. L., 1960, Germanium-gallium arsenide heterojunction, *IBM Journal of Research and Development*, 4, 283-287.

Bilgic Aksari M., Eray A., 2011, Optimization of a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells by Numerical Simulation, *Energy Procedia (Basılacak)*, EMRS Spring Meeting, 9-13 May 2011, Nice, France.

Bube R.H., 1998, *Photovoltaic Materials*, Imperial College Press, London, UK, p39.

Burgelman M., Verschraegen J., Degrave S., Nollet P., 2004, Modeling Thin-film PV devices, *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, Vol 12, pp 143-153.

Centurioni E., Iencinealla D., Rizzoli R., Zignani F., 2004, Silicon heterojunction solar cell: A new buffer layer concept with low-temperature epitaxial silicon, *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 51, 1818-1824.

Conrad, E. ; Korte, L. ; Maydell, K. v. ; Angermann, H. ; Schubert, C. ; Stangl, R. ; Schmidt, M., 2006, Development and optimization of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells completely processed at low temperatures. Twentyfirst European Photovoltaic Solar Energy Conference : proceedings of the international conference held in Dresden, Germany, 4 - 8 September 2006.

Damon-Lacoste J., Roca i Cabarrocas P., Chatterjee P, Veschetti Y., Gudovskikh A.S., Kleider J.P., Ribeyron P.J., 2006, About the efficiency limits of heterojunction solar cells, *Journal of non-crystalline solids*, 352, 1928-1932.

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

Das U., Hegedus S., Zhang L., Appel J., Rand J., Birkmire R., 2010, Investigation of heterointerface and junction properties in silicon heterojunction solar cells, 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, Honolulu, Hawaii.

Datta A., Damon-Lacoste J., Nath M., Roca i Cabaroccas, Chatterjee, 2009, Dominant role of interfaces in solar cells with n-a-Si:H/p- c-Si heterojunction with intrinsic thin layer, *Materials Science and Engineering B*, 159-160, 10-13

Datta A., Damon-Lacoste J.i., Roca i Cabaroccas P., Chatterjee P., 2008, Defect states on the surfaces of a p-type c-Si wafer and how they control the performance of

a double heterojunction solar cell, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, 1500-1507.

Datta A., Rahmouni M., Nath M., Boubekri R., Roca i Cabarrocas P., Chatterjee P., 2010, Insights gained from computer modeling of heterojunction with intrinsic thin layer "HIT" solar cells, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 94, 1457-1462.

De Wolf S., Olibet S., Baliff C, 2008, Stretched exponential a-Si:H/c-Si interface recombination decay, *Applied Physics Letters*, 93.

Diouf D., Kleider J.P., Desrues T., Ribeyron P.J., 2009, Study of interdigitated back contact silicon heterojunction solar cells by two-dimensional numerical simulations, *Material Science and Engineering B*, 159-160, 291-294.

Favre W., Labrune M., Dadouche F., Gudovskikh A.S., Roca i Cabarrocas P., Kleider J.P., 2010, Study of interfacial properties of amorphous silicon/n-type crystalline silicon heterojunction through static planar conductance measurements, *Physica Status Solidi C*, 7, 1037-1040.

Ferre R., Martin I., Ortega P., Vetter M., 2006, n-type emitter surface passivation in c-Si solar cells by means of antireflective amorphous silicon carbide layers, *Journal of Applied Physics*, 100.

Froitzheim A., Stangl R., Elstner L., Schmidt M., Fuhs W., 2002, Interface recombination in amorphous/crystalline silicon solar cells, a simulation study, 25th IEEE Conference, May 2002, New Orleans.

Fuhs, W., Korte, L., Schimidt, M., 2006, Heterojunctions of Hydrogenated Amorphous Silicon and Monocrystalline Silicon, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 8, 1989-1995

Fujiwara H, Kaneko T., Kondo M., 2009, Optimization of interface structures in crystalline silicon heterojunction solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93, 725-728.

Ghosh, K., 2008, Modelling of Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Hetrojunction by Commercial Simulator, Master Thesis, University of Delaware.

Goetzberger A., Hoffmann V.U., 2005, Photovoltaic Solar Energy Generation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Goldbach H.D., Bink A., Schroopp R.E.I., 2006, Thin p++ μ c-Si layers for use as back surface field in p-type silicon heterojunction solar cells, *Journal of Con-Crystalline Solids*, 352, 1872-1875.

Gudovskikh A.S., Kleider J.P., Stangl R., Schmidt M., Fuhs W., 2004, Interface properties of a-Si:H/c-Si heterojunctions investigated by admittance spectroscopy,

Nineteenth European Photovoltaic Solar Energy Conference: proceedings of the international conference held in Paris, France, 7 - 11 June 2004. Munich.

Hernandez-Como N., Morales-Acevedo A., 2008, A., Heterojunction (HIT) silicon solar cell for AMPS 1-D simulation, 5th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE 2008),

Hernandez-Como N., Morales-Acevedo A., 2010, A., Simulation of hetero-junction silicon solar cells with AMPS-1D, Solar Energy Materials and Solar Cells, 94, 62-67.

Iencinella D., 2004, Study of Amorphous and nanocrystalline silicon thin films for application as emitter layers in heterojunction solar cells, Dottorato Tezi, Università Degli Studi Di Bologna.

Jensen, N., Hausner, R.M., Bergmann, R.B., Werner, J.H., Rau, U., 2002, Optimization and Characterization of Amorphous/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells, Progress in Photovoltaics Research and Application, 10, 1-13.

Korte L., Conrad E., Angerman H., Stangl R., Schmidt M., 2009, Advances in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cell fabrication and characterization, Solar Energy Materials & Solar Cells, 93, 905-910.

Laades A., Kliefoth K., Korte L., Brendel K., Stangl R., Schmidt M., Fuhs W., 2004, Surface passivation of crystalline silicon wafers by hydrogenated amorphous silicon probed by time resolved surface photovoltage and photoluminescence spectroscopy, Proceedings of the international conference Nineteenth European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 7 - 11 June 2004. 1170-1173,

Leendertz C., Stangl R., Schulze T.F. Schmidt M., Korte L., 2010a, A recombination model for a-Si:H/c-Si heterostructures, Physica Status Solidi C, vol 7, No 3-4, pp

Lu M., Bowden S., Birkmite R., 2007b, Two dimensional modeling of interdigitated back contact silicon heterojunction solar cells, NUSOD 2007.

Lu M., Bowden S., Das U., Birkmite R., 2007a, Interdigitated back contact silicon heterojunction solar cell and the effect of front surface passivation, Applied Physics Letters, 91.

Maruyama E., Terakawa A., Taguchi M., Yodhimine Y., Ide D., Baba T., Shima M., Sakata H., Tanaka M., 2006, Sanyo's Challenges to the developments of high efficiency HIT solar cells and expansion of HIT business, IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006, May 2006, Waikoloa, HI.

Maydell K., Conrad E., Schmidt M., 2006a, Efficient silicon heterojunction solar cells based on p- and n- type substrates preprocessed at temperatures < 220°C, Progress In Photovoltaics: Research And Applications, 14, 289-295.

Maydell K.v., Schmidt M., Korte L., Laades A., Conrad E., Stangl R., Scherff M., Fuhs W., 2005a., Basic electronic properties and optimization of TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p) hetero solar cells, 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 3-7 January 2005, Lake Buena Vista, FL.

Maydell, K.v., Korte, L., Laades, A., Stangl, R., Conrad, E., Lange, F., Schmidt, M., 2006b, Characterization and Optimization of the Interface Quality in Amorphous/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells, Journal of Non-Crystalline Solids, 352, 1958-1961.

Maydell, K.v., Windgassen, H., Nositschka, W.A., Rau, U., Rostan, P.J., Henze, J., Schmidt, J., Scherff, M., Fahrner, W., Borchert, D., Tardon, S., Bruggemann, R., Stiebig, H., Schmidt, M., 2005b, Basic Electronic Properties and Technology of TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p) Heterostructure Solar Cells: A German Network Project, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain.

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

Nelson J., 2010, Physics of Solar Cells, International Center for Theoretical Physics, Winter College on Optics and Energy Ders Notları.

Olibet S., Vallat-Sauvain E., Baliff C., 2007, Model for a-Si:H/c-Si interface recombination based on the amphoteric nature of silicon dangling bonds, Physical Review B, 76.

Page, M.R.; Iwaniczko, E.; Xu, Y.; Wang, Q.; Yan, Y.; Roybal, L.; Branz, H.M.; Wang, T.H., 2006 , Well Passivated a-Si:H Back Contacts for Double-Heterojunction Silicon Solar Cells, IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on , Waikoloa, Hawaii, 7-12 May 2006, 2, 1485-1488.

PVCDROM, 2011, <http://www.pveducation.org/pvcdrom>, Erişim tarihi: 01.07.2011
Roca F., Carabe J., Jager-Waldau A., Silicon heterojunctions R&D in Europe, http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/forschung/energie/si_photovoltaik/projekte/AFORS-HET/publikationen/simulation/jan05_3.pdf, Erişim tarihi: 01.07.2011

Sakata, H.; Nakai, T.; Baba, T.; Taguchi, M.; Tsuge, S.; Uchihashi, K.; Kiyama, S., 2000, 20.7% highest efficiency large area (100.5 cm²) HITTM cell, Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 7-12.

Sawada, T., Terada, N., Tsuge, S., Baba, T., Takahama, T., Wakisaka, K., Tsuda, S., Nakano, S., 1994, High-Efficiency a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cell, First WSPEC, 5-9 December 1994, Hawaii, USA.

Schaffarzik D. ; Stangl R. ; Laades A. ; Schubert C. ; Schmidt M., 2005, Recombination analysis at the n-doped a-Si:H(n)/c-Si(p) heterojunction by means of time and intensity dependent surface photovoltage. Twentieth European Photovoltaic Solar Energy Conference : proceedings of the international conference held in Barcelona, Spain, 6 - 10 June 2005.

Schmidt M., Froitzheim A., Stangl R., Elstner L., Liefoth K., Füssel W., Fuhs W., 2001, Photocurrent analysis in TCO/a-Si:H/c-Si solar cell structures, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 22-26 October 2001, München, Germany.

Schmidt M., Korte L., Kliefoth K., Schöpke A., Laades A., Conrad E., Brendel K., Fuhs W., Scherff M., Fahrner W., 2004, Basic electronic properties of a-Si:H/c-Si heterostructure solar cells, 19th European Photovoltaic Solar energy Conference, 7-11 June 2001, Paris, France.

Schmidt, M., Korte, L., Laades, A., Stangl, R., Schubert, C., Angermann, H., Conrad, E., Maydell, K.v., 2007, Physical Aspects of a-Si:H/c-Si Hetero-junction Solar Cells, Thin Solid Films, 515, 7475–7480.

Schulze T.F., Korte L., Conrad E., Schmidt M., Rech B., 2010, Electrical transport mechanisms in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells, Journal of applied physics, vol 107.

Stangl R, Leendertz C, Haschke J. Numerical simulation of solar cell and solar cell characterization methods: the open source on demand program AFORS-HET. In: Rugescu DR, editors. Solar Energy, Vukovar, Croatia: Intech , 2010, p. 319-352.

Stangl R., Froitzheim A., Elstner L., Fuhs W., 2001, Amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells, a simulation study, 17th European PV Conference, Munich, Oct.2001.

Stangl R., Froitzheim A., Fuhs W., 2002, Thin film amorphous emitters for crystalline silicon solar cells, epitaxial, amorphous or microcrystalline?-A simulation study, European PV Conference, October 2002, Rome, Italy.

Stangl, R., Froitzheim, A., Schmidt, M., Fuhs, W., 2003, Design Criteria for Amorphous/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells, -A Simulation Study, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 12-16 May 2003, vol 2, pp 1005-1008.

Streetman B.G., Banerjee S, 2000, Solid State Electronic Devices, Prentice Hall New Jersey.

Sze S.M., 1985, Semiconductor Devices Physics and Technology, John Wiley & Sons. ISBN 0-471-87424-8.

Taguchi M., Sakata H., Yoshimine Y., Maruyama E., Terakawa Ak., Tanaka M., 2005a, An approach for higher efficiency in the HIT cells, Conference Records of the Photovoltaic Specialists Conference, 3-7 January 2005.

Taguchi M., Terakawa A., Maruyama E., Tanaka M., 2005b, Obtaining higher V_{oc} in HIT cells, Progress in Photovoltaics Research and Applications, 13, 482-488.

Tardon S., Brüggemann R., 2010, Characterization of the interface properties in a-Si:H/c-Si heterostructures by photoluminescence, Journal of Physics D: Applied Physics, 43, 1-7.

Tosolini A., Colombo L., Peressi M., 2004, Atomic Scale Model of c-Si/a-Si:H interfaces, Physical Review B, 69.

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

Tucci M., della Noce M., Bobeico E., Roca F., de Cesare G., Palma F., 2004, Comparison of amorphous/crystalline heterojunction solar cells based on n- and p-type crystalline silicon, Thin Solid Films, 451-452, 355-360.

Voz C., Munoz D., Fonrodana I., Puigdollers J., Alcubilla R., Escarre J., Bertomeu J., Andreu J., 2006, Bifacial heterojunction silicon solar cells by hot-wire CVD with open-circuit voltages exceeding 600 mV, Thin Solid Films, 511-512, pp 415-419.

Wang J.Q., Meng F.Y., Fang Z.D. Ye Q.H., 2010, Investigation of a-Si(N+)/c-Si(P) heterojunction solar cell through AFORS-HET simulation, Wiley online library. DOI 10.1002/sia.3701.

Wang, Q., Page, M.R., Iwaniczko, E., Xu, Y.Q., Roybal, L., Bauer, R., To, B., Yuan, H.C., Duda, A., Yan, Y.F., 2008, Crystal Silicon Heterojunction Solar Cells by Hot-Wire CVD, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 11-16 May 2008, San Diego, California.

Wang, T.H., Iwaniczko, E., Page, M.R., Levi D.H., Yan, Y., Branz, H.M., Wang, Q., 2005a, Effective Interfaces in Silicon Heterojunction Solar Cells, 31st IEEE Photovoltaics Specialist Conference and Exhibition, 3-7 January 2005, Lake Buena Vista, Florida.

Wang, T.H., Iwaniczko, E., Page, M.R., Wang, Q., Xu, Y., Yan, Y., Levi D.H., Roybal, L., Bauer, R., Branz, H.M., 2006, High-Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells by HWCVD, IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion of 2006, vol 2, May 2006, Waikola, Hawaii, pp 1439-1442

Wang, T.H., Page, M.R., Iwaniczko, E., Wang, Q., Xu, Y., Yan, Y., Roybal L., Levi, D., Bauer, R., Branz, H.M., 2005b, 17.5 p-type Silicon Heterojunction Solar Cells with

HWCVD a-Si:H as the Emitter and Back Contact, 2005 DOE Solar Energy Technologies Program Review Meeting, 7-10 November 2005, Denver, Colorado.

Wang, T.H., Page, M.R., Iwaniczko, E., Levi D.H., Yan, Y., Branz, H.M., Wang, Q., 2004, Toward Better Understanding and Improved Performance of Silicon Heterojunction Solar Cells, 14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules, 8-11 August 2004, Winter Park, Colorado, USA.

Xu Y., Hu Z., Diao H., Cai Y., Zhang S., Zeng X., Hao H., Liao X., Fortunato E., Martins R., 2006, Heterojunction solar cells with n-type nanocrystalline silicon emitters on p-type c-Si wafers, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352, pp 1972-1975.

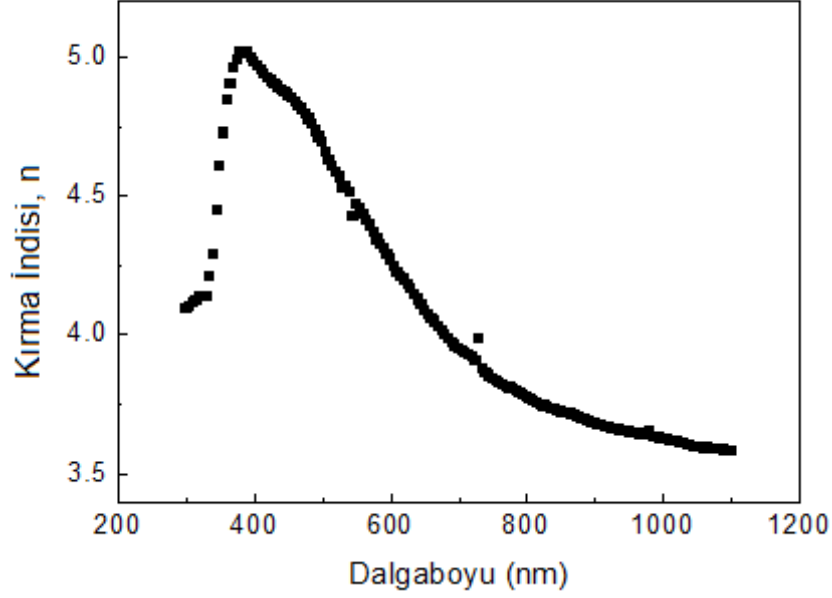
Zhao J., Wang A., Green M., 2000, 24.5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates, *Progress in photovoltaics research and applications*, vol 7, issue 6, pp 471-474.

Zhao L., Li H.L., Zhou C.L., Diao H.W., Wang W.J., 2009, Optimized resistivity of p-type Si substrate for HIT solar cell with Al back surface field by computer simulation, *Solar Energy*, 83, 812-816.

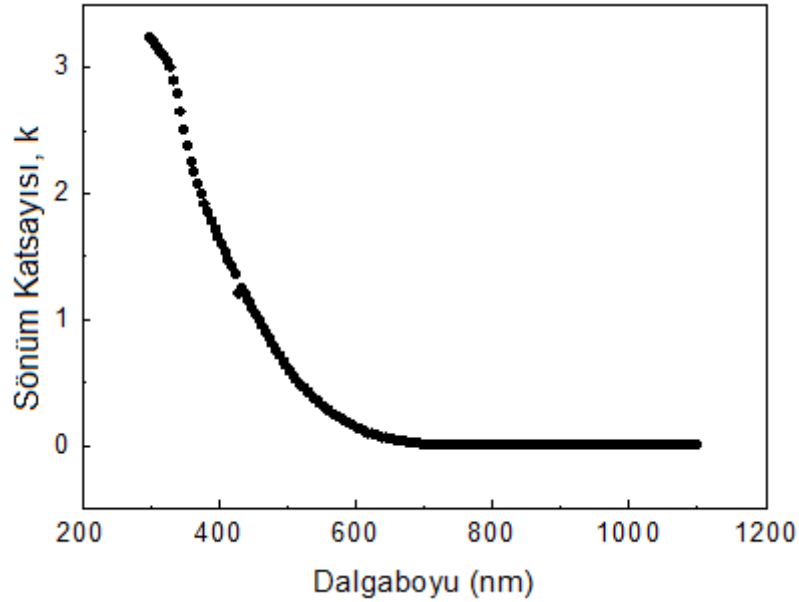
Zhao L., Zhou C.L., Li H.L., Diao H.W., Wang W.J., 2008a, Role of work function of transparent conductive oxide on the performance of amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells studied by computer simulation, *Physica Status Solidi A*, Vol 205, No 5, pp 1215-1221.

Zhao L., Zhou C.L., Li H.L., Diao H.W., Wang W.J., 2008b, Design optimization of bifacial HIT solar cells on p-type silicon substrates by simulation, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, vol 92, pp 673-681.

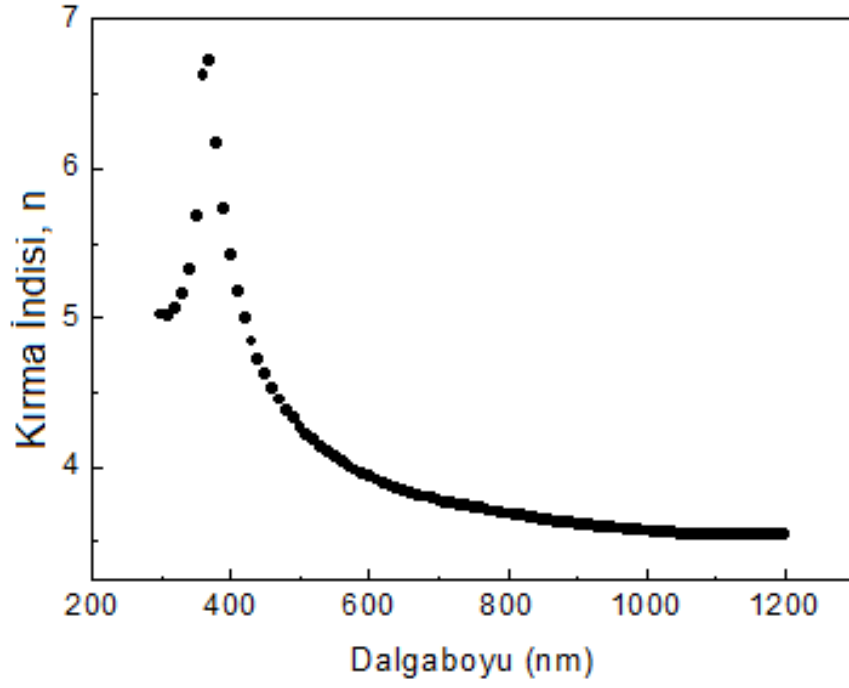
EK-1. AFORS-HET YAZILIMINDA BULUNAN MODELLEME ÇALIŞMALARINDA KULLANILAN DALGABOYUNA KARŞI a-Si:H VE c-Si'YE AİT SOĞURMA VE DALGA SAYISI DOSYALARI İLE ZnO VE ITO'YA AİT SOĞURMA VE YANSIMA KATSAYILARI DOSYALARININ İÇERİĞİ



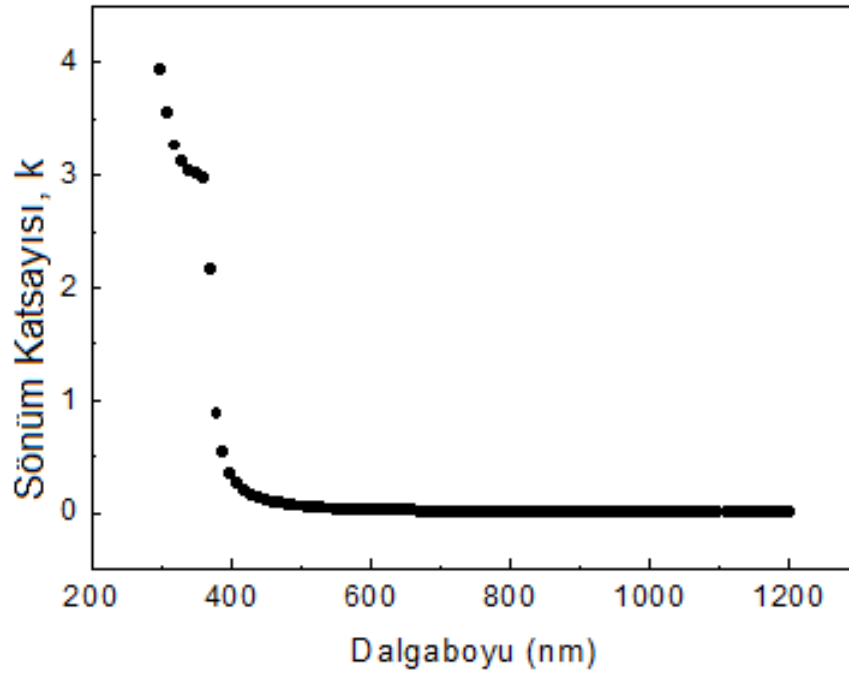
Şekil Ek-1.1. a-Si:H tabakanın AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalga boyuna bağlı kırma indisi (n) değerleri



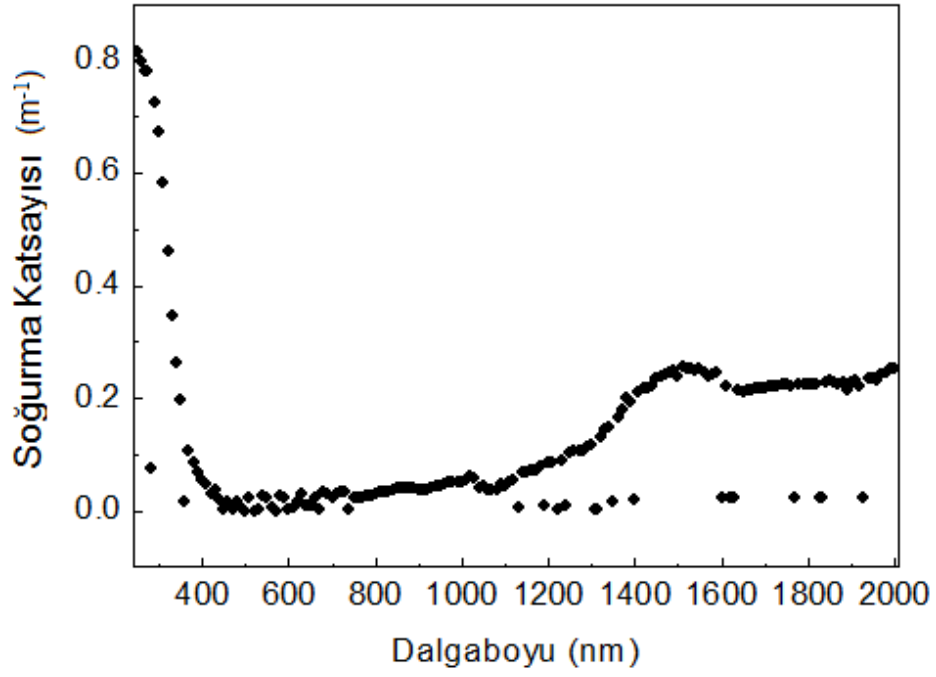
Şekil Ek-1.2. a-Si:H tabakanın AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalga boyuna bağlı sönüm katsayısı değerleri



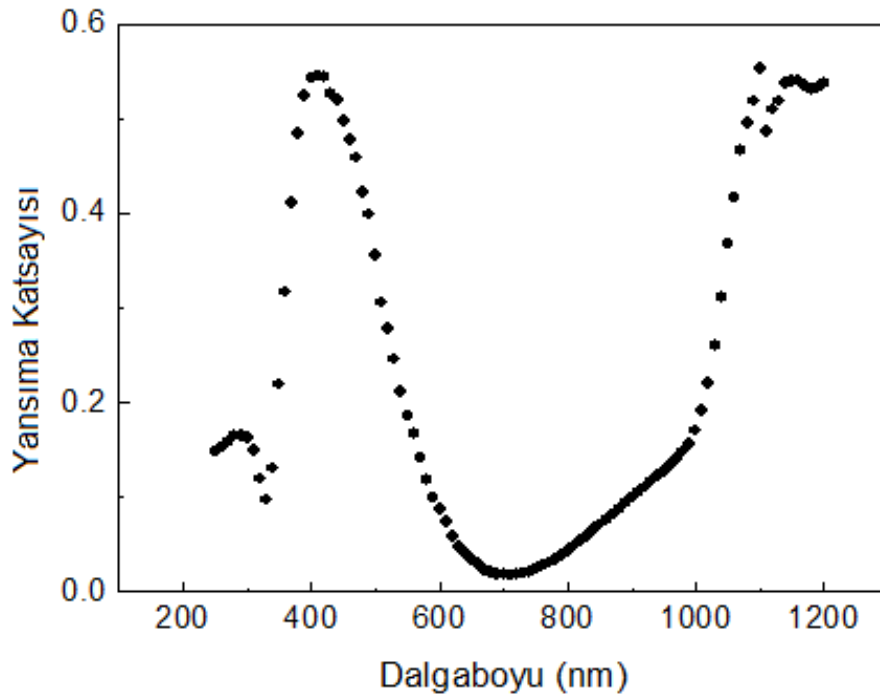
Şekil Ek-1.3. c-Si tabakanın AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalgaboyuna karşı kırma indisi değerleri



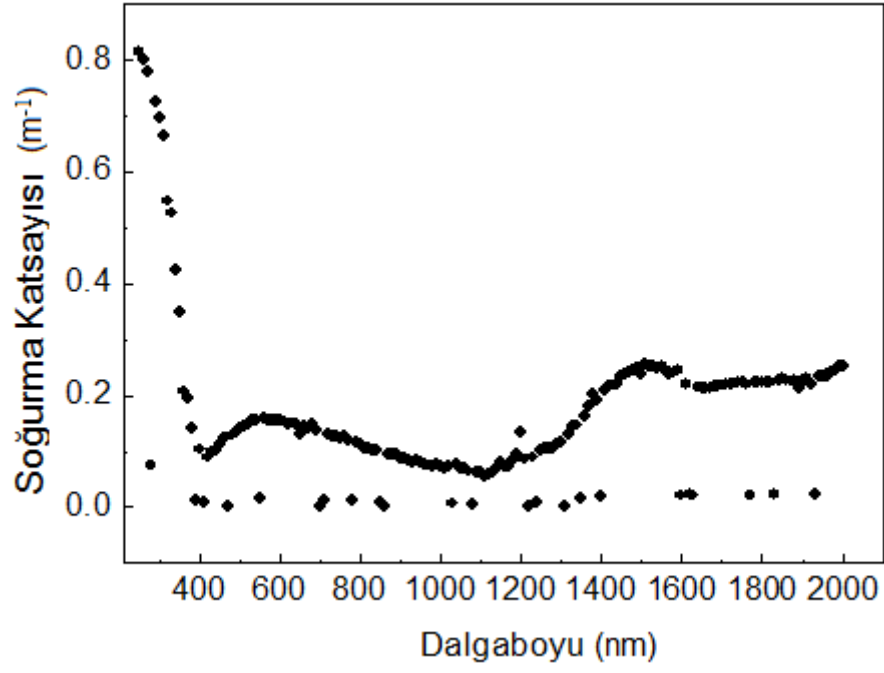
Şekil Ek-1.4. c-Si tabakanın AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalgaboyuna karşı sönüm katsayısı değerleri



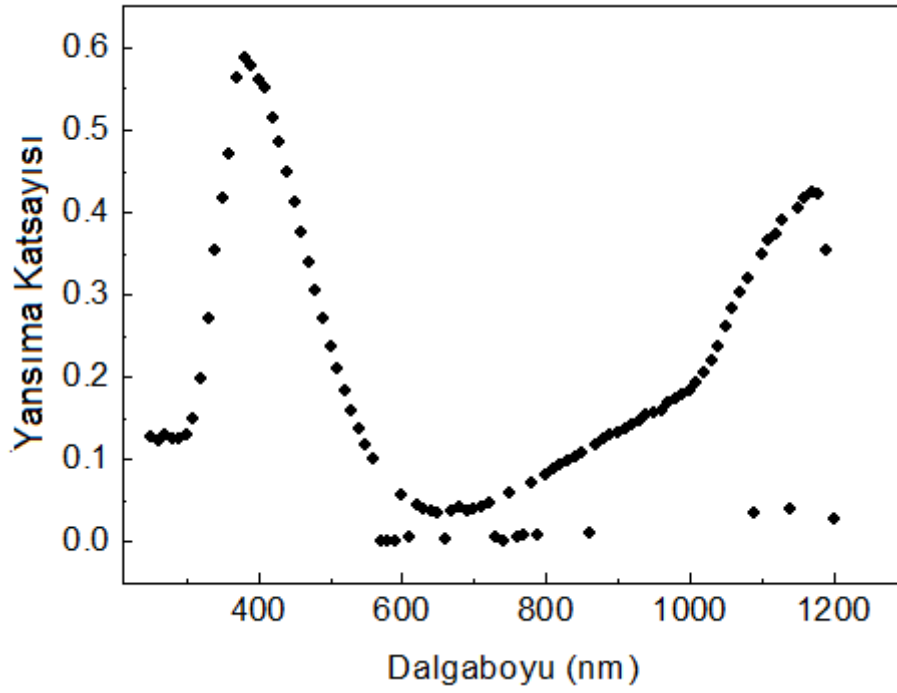
Şekil Ek-1.5. ZnO'nun AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalgaboyuna karşı soğurma katsayısı değerleri.



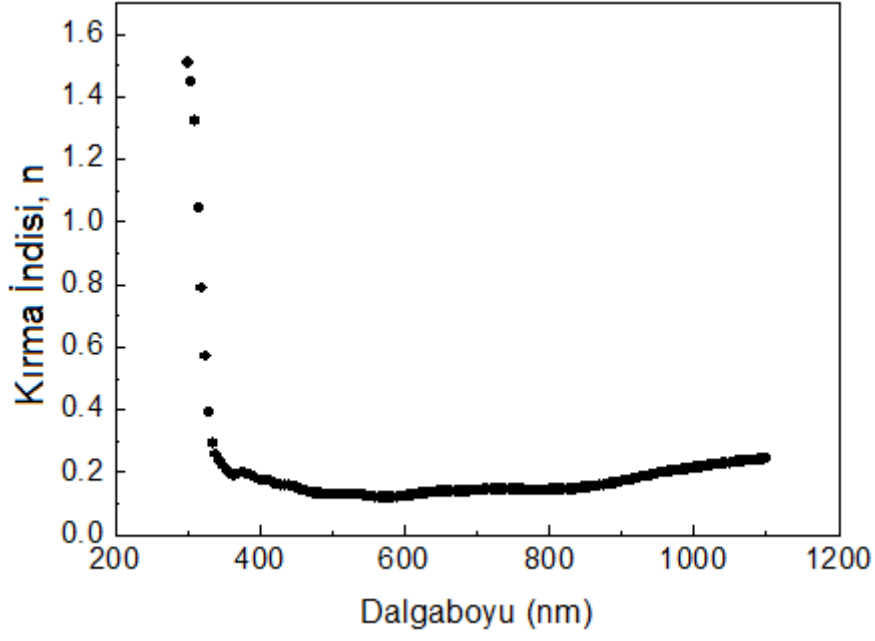
Şekil Ek-1.6. ZnO'nun AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalgaboyuna karşı yansım katsayısı değerleri.



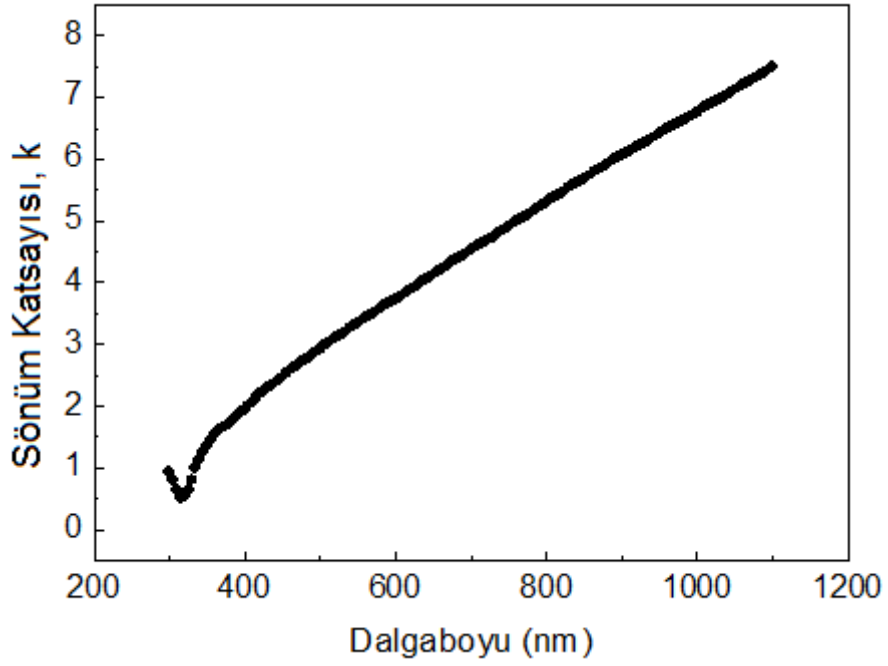
Şekil Ek-1.7. ITO'nun AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalgaboyuna karşı soğurma katsayısı değerleri.



Şekil Ek-1.8. ITO'nun AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalgaboyuna karşı yansım katsayısı değerleri.



Şekil Ek-1.9. Gümüşün AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalga boyuna bağlı kırma indisi (n) değerleri



Şekil Ek-1.10. Gümüşün AFORS-HET kütüphanesinde tanımlanmış dalgaboyuna karşı sönüm katsayısı değerleri

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Melis Bilgiç Aksarı

Doğum Yeri : Bursa

Doğum Yılı : 1985

Medeni Hali : Evli

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise : 1996-2003 Bursa Gazi Anadolu Lisesi

Lisans : 2003-2008 Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Fizik Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi:

2008-2010 108M001 No'lu Tübitak Projesi (Proje Asistanı)

Proje Adı: Yük Dağıtım Bölgelerinde Saatlik Kısa ve Uzun
Dönem Elektrik İhtiyacının Modellenmesi

2010-Halen Hacettepe Üniversitesi Yeni ve Temiz Enerji AR-UY Merkezi
(Araştırma Görevlisi)

Etkinlikler:

Şubat 2009 Winter College on Optics in Environmental Science, Düzenleyen;
The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics
(ICTP), Trieste, İtalya

Eylül 2009 International Summer School on Photovoltaics and New Concepts
of Quantum Solar Energy Conversion, Düzenleyen; Helmholtz

Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB), Hirchegg, Avusturya.

Şubat 2010 Winter College on Optics and Photovoltaics, Düzenleyen; The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, İtalya

Mart 2010 Conference on Developments in Power System Protection, Düzenleyen; The Institution of Engineering and Technology (IET), Manchester, İngiltere

Nisan2011 EMRS Spring Meeting, Bilateral Conference on Energy, Düzenleyen; European Materials Research Society (EMRS), Nice, Fransa

Yayınlar:

Bilgic Aksari M., Eray A., 2011, Modelling And Optimization Of a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells, Proceedings of the 26th EU PVSEC, Basılacak, 26th EU PVSEC, 5-9 Eylül 2011, Hamburg, Almanya.

Bilgic Aksari M., Eray A., 2011, Optimization of a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells By Numerical Simulation, Energy Procedia, Basılacak, EMRS Spring Meeting and Bilateral Conference on Energy, 9-13 Mayıs 2011, Nice, Fransa.

Girep, C.P., Bilgic, M., Aydinalp Koksall, M., and Baker, D.K., Forecasting Turkey's Long Term Peak Load Demand, 16th. International Energy and Environment Conference (ICCI), Mayıs 12-14, 2010, İstanbul.

M. Bilgic, C.P. Girep, S.Y. Aslanoglu, M: Aydinalp-Koksall, Forecasting Turkey's Short Term Hourly Load with Artificial Neural Networks, Proceedings of The 10th International Conference on Developments in Power System Protection, 29 Mart-1 Nisan 2010, Hilton Deansgate, Manchester, UK.