

**ARABANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİNDE  
VERİM OPTİMİZASYONU**

**Tuğba Selcen NAVRUZ**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2008  
ANKARA**

Tuğba Selcen NAVRUZ tarafından hazırlanan ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİNDE VERİM OPTİMİZASYONU adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ .....

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Müh.

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Cengiz BEŞİKÇİ .....

Elektrik-Elektronik Müh., O.D.T.Ü.

Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ .....

Elektrik-Elektronik Müh., G.Ü.

Prof. Dr. M. Sezai DİNÇER .....

Elektrik-Elektronik Müh., G.Ü.

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ .....

Elektrik-Elektronik Müh., G.Ü.

Prof. Dr. Tayfun AKIN .....

Elektrik-Elektronik Müh., O.D.T.Ü.

Tarih: 28/05/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN .....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Tuğba Selcen NAVRUZ

**ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİNDE VERİM OPTİMİZASYONU**  
(Doktora Tezi)

**Tuğba Selcen NAVRUZ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**Mayıs 2008**

**ÖZET**

Son nesil güneş pillerinde hedef, yarı iletken malzemenin enerji bant aralığından daha küçük enerjiye sahip fotonların soğurulamamasından ve yüksek enerjili fotonların, termalizasyonla yok olmasından kaynaklanan kayıpların azaltılmasıdır. Bu tez çalışmasında,  $n^+ - i - p^+$  yapılı baz bölgesine yerleştirilen bir ara bant (AB) sayesinde, bant aralığından daha az enerjiye sahip fotonları da soğuran, yeni ara bant yapılı güneş pilleri (ABGP) üzerinde nümerik analizler yapılmıştır. AB, ABGP'nin çıkış gerilimini azaltmadan, foto akımının artmasını sağlamaktadır. ABGP'nin çalışma performansı, detaylı denge modeli (DDM) ve kuasi-sürüklenme-difüzyon modeli (KSDM) kullanılarak, iki farklı modelle incelenmiştir.

DDM uygulandığında, ideal şartlarda, verim,  $E_G=1,95$  eV için %63,2 ve  $E_G=1,12$  eV için %54,8 olarak bulunmuştur. Örtüşmenin ABGP performansı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Soğurma katsayıları arasında örtüşme meydana geldiğinde, ABGP veriminin hızla düştüğü görülmüştür. Bant aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonların termalizasyonla kaybolmasından kaynaklanan kayıplar da, Auger üretimi yoluyla taşıyıcı çoğullaması sayesinde, azaltılmıştır. Burada, Auger etkisi içeren dört farklı ABGP yapısı incelenmiş ve

maksimum verim, silisyumun bant genişliğine yakın bantlarda ve %70 civarında bulunmuştur.

KSDM kullanılarak; mobilitenin, etkin enerji durum yoğunluğunun ve yüksek ışık konsantrasyonundan dolayı ortaya çıkan doğrusal olmayan terimlerin (DOT), ABGP verimine etkileri araştırılmıştır. ABGP veriminin, küçük taşıyıcı mobilitesi, küçük etkin enerji durum yoğunluğu ve DOT içeren yüksek ışık konsantrasyonu değerlerinde azaldığı görülmüştür. KSDM'de, etkin enerji durum yoğunluğu  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'den  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'e düştüğünde, sadece verim azalmamış, aynı zamanda optimum AB ve optimum baz kalınlığı da değişmiştir. Yeni optimum AB ve optimum baz kalınlığı değerleri kullanıldığında ise, verimde %15 civarında bir iyileşme sağlanmıştır.

Son olarak, baz bölgesindeki elektron ve boşlukların homojen olmayan üretim ve rekombinasyonundan kaynaklanan dahili elektrik alan etkisi, KSDM kullanılarak incelenmiştir. Ara bandın, baz bölgesi boyunca yarı dolu tutulabilmesi halinde, dahili elektrik alanın, verimi değiştirmeyeceğine sonucuna varılmıştır.

**Bilim Kodu** : 609. 0. 100

**Anahtar kelimeler** : Ara bant yapılı güneş pili, verim, soğurma, baz kalınlığı, örtüşme, ışımalı ve ışımasız rekombinasyon, Auger, mobilite, ışık konsantrasyonu, elektrik alan,

**Sayfa adeti** : 143

**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

**EFFICIENCY OPTIMIZATION IN INTERMEDIATE BAND SOLAR CELLS**  
(PhD Thesis)

**Tuğba Selcen NAVRUZ**

**GAZİ UNIVERSITY**  
**INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**  
May 2008

**ABSTRACT**

The last generation photovoltaic devices aim to tackle the losses associated with the non absorption of below band gap photons and the thermalisation of above band gap photons to the band edges. In this thesis, numerical analysis were carried out on the new intermediate band solar cell (IBSC) that absorbs the sub-band gap photons through the intermediate band (IB) inserted inside the base region of  $n^+i-p^+$  structure. IB increases the photocurrent of the IBSC without decreasing the output voltage. The operation performance of IBSC has been investigated by two different mathematical models that are the detailed balance model (DBM) and the quasi-drift-diffusion model (QDDM), respectively.

Maximum efficiency was obtained as 63,2% for  $E_G=1,95$  eV and 54,8% for  $E_G=1,12$  eV, under ideal conditions, when DBM has been applied. The effect of overlap on the performance of IBSC has been analyzed in detail. It was seen that the efficiency was decreased sharply when the overlap existed between absorption coefficients. The losses due to the thermalisation of the above band gap photons to the band edge, have also been reduced by carrier multiplication via Auger generation. Four types of IBSC including the Auger mechanism have been investigated

and the maximum efficiency obtained was about 70% at nearly the band gap of silicon.

The effects of mobility, effective density of states and non-linearity term due to high concentration of sun light on the efficiency of IBSC have also been studied using QDDM. The efficiency has been reduced at lower mobility values of excess carriers, at lower density of states and higher sun concentration including non linearity term. When the effective density of states was reduced from  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  to  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  in QDDM, not only the efficiency of IBSC has been reduced but also the optimum IB and the optimum base width has been changed. When the new optimum IB and the optimum base width values were used, the efficiency was improved by amount of 15%.

Finally, the effect of internal electric field due to the non uniform generation of the electrons and the holes in the base region has been investigated using QDDM. It was concluded that, this internal electric field would not affect the efficiency of IBSC when the IB could be kept half filled through the base layer.

**Science Code** : 609. 0. 100

**Key Words** : Intermediate band solar cell, efficiency, absorption, base thickness, overlap, radiative and nonradiative recombination, Auger, mobility, sun concentration, electric field.

**Page Number** : 143

**Adviser** : Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok kıymetli Hocam Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ'a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim İsa NAVRUZ'a, beni bugünlere getiren ve her sıkıntıda imdadıma koşan babam Durmuş TONBUL'a, annem Rabia TONBUL'a ve bir gülüşleriyle bana bütün yorgunluğumu unutturan sevgili çocuklarım Ömer Faruk NAVRUZ'a ve Zeynep NAVRUZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                      |      |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                           | iv   |
| ABSTRACT .....                                                       | vi   |
| TEŞEKKÜR .....                                                       | viii |
| İÇİNDEKİLER .....                                                    | ix   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                                           | xiii |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                             | xv   |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR .....                                       | xix  |
| 1. GİRİŞ .....                                                       | 1    |
| 2. FOTOVOLTAİK ETKİ VE FOTOVOLTAİK PİLLERİN TARİHÇESİ .....          | 3    |
| 2.1. Enerji Üretimi ve Küresel Isınma .....                          | 3    |
| 2.2. Güneş ve Güneş Enerjisi Spektrumu .....                         | 4    |
| 2.3. Fotovoltaik Pil Pazarının Dünü ve Bugünü .....                  | 8    |
| 2.4. Fotovoltaik Etki ve Fotovoltaik Pilin Çalışma Prensipleri ..... | 10   |
| 2.4.1. Fotovoltaik etki .....                                        | 10   |
| 2.4.2. Fotovoltaik pil yapısı ve eşdeğer devresi .....               | 11   |
| 2.4.3. Güneş pilinde verimliliğe etki eden faktörler .....           | 19   |
| 2.4.4. Fotovoltaik pillerin verimli kullanımı .....                  | 22   |
| 2.5. Fotovoltaik Pillerin Tarihçesi.....                             | 23   |
| 2.5.1. Birinci nesil güneş pilleri .....                             | 24   |
| 2.5.2. İkinci nesil güneş pilleri .....                              | 25   |
| 2.5.3. Üçüncü nesil güneş pilleri .....                              | 26   |

**Sayfa**

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.4. Dördüncü nesil güneş pilleri .....                                             | 28 |
| 3. ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİ .....                                                | 30 |
| 3.1. ABGP Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....                                            | 30 |
| 3.1.1. ABGP'nin tarihçesi .....                                                       | 30 |
| 3.1.2. Ara bant yapılı güneş pilinin çalışması .....                                  | 32 |
| 3.2. Matematiksel Modelleme İçin Başlangıç Denklemleri .....                          | 36 |
| 3.3. Detaylı Denge Modeli .....                                                       | 42 |
| 3.3.1. Işık ile üretilen akım (fotoakım) yoğunlukları .....                           | 43 |
| 3.3.2. Işımalı rekombinasyon akım yoğunlukları .....                                  | 44 |
| 3.3.3. Dahili rekombinasyon akım yoğunlukları .....                                   | 44 |
| 3.3.4. Işımasız rekombinasyon akım yoğunlukları .....                                 | 45 |
| 3.2.5. Auger üretim ve rekombinasyon akım yoğunlukları .....                          | 46 |
| 3.3.6. Detaylı denge modelinde verim hesabı .....                                     | 47 |
| 3.4. Kuasi Sürüklenme-Difüzyon Modeli .....                                           | 48 |
| 3.4.1. Süreklilik denkleminin taşıyıcı konsantrasyonu ile<br>ilişkilendirilmesi ..... | 48 |
| 3.4.2. Taşıyıcı üretimi terimleri .....                                               | 48 |
| 3.4.3. Işımalı rekombinasyon terimleri .....                                          | 50 |
| 3.4.4. Dahili ve Işımasız rekombinasyon terimleri .....                               | 53 |
| 3.4.5. Kuasi sürüklenme-difüzyon modeline geçiş .....                                 | 55 |
| 3.4.6. Sonlu elemanlar metodu .....                                                   | 57 |
| 4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR .....                                              | 62 |
| 4.1. Detaylı Denge Modeli İle Elde Edilen Sonuçlar .....                              | 62 |

**Sayfa**

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.1. Örtüşmenin ara bant yapılı güneş pili üzerindeki etkileri.....                                                   | 63  |
| 4.1.2. Işımasız rekombinasyonun verim üzerindeki etkileri .....                                                         | 76  |
| 4.1.3. Auger mekanizmasının ara bant yapılı güneş pilinin performansı üzerindeki etkileri .....                         | 78  |
| 4.2. Kuasi-Sürüklenme-Difüzyon Modeli İle Elde Edilen Sonuçlar .....                                                    | 85  |
| 4.2.1. Sonlu elemanlar metodunun yarısürüklenme-difüzyon modeline uygulanması .....                                     | 86  |
| 4.2.2. ABGP veriminin taşıyıcı mobilitesi ve DOT ile değişimi .....                                                     | 89  |
| 4.2.3. ABGP veriminin ışık konsantrasyonu ile değişimi.....                                                             | 93  |
| 4.2.4. ABGP veriminin enerji bant genişliği ile değişimi ve DOT etkisi.....                                             | 97  |
| 4.2.5. ABGP veriminin baz kalınlığı ile değişimi .....                                                                  | 99  |
| 4.2.6. ABGP veriminin örtüşme ile değişimi .....                                                                        | 100 |
| 4.2.7. Elektrik alan etkisi .....                                                                                       | 107 |
| 4.2.8. Elektron ve boşluk mobilitelerinin birbirinden farklı olmasının ABGP verimine taşıyıcı dağılımına etkileri ..... | 117 |
| 4.3. DDM ve KSDM Sonuçlarının Karşılaştırılması .....                                                                   | 122 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                                                              | 126 |
| KAYNAKLAR .....                                                                                                         | 130 |
| EKLER .....                                                                                                             | 139 |
| EK-1. Basit Sabit Noktalı İterasyon Yöntemi [96] .....                                                                  | 140 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                          | 142 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                                                                                                                                                         | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. Farklı ışıma spektrumları için güneşten gelen ışıma miktarı .....                                                                                                                                                                                                  | 18    |
| Çizelge 2.2. Fotovoltaik pilin kısa devre fotoakımına ve karanlık akımına etki eden faktörler [15] .....                                                                                                                                                                        | 19    |
| Çizelge 4.1. $\gamma=1$ durumunda, örtüşmesiz ve örtüşmeli koşullar altında, $E_G=1,95\text{eV}$ ve $E_G=1,12\text{eV}$ için verimin ve optimum AB seviyesinin değişimi .....                                                                                                   | 66    |
| Çizelge 4.2. $\gamma=10$ durumunda, örtüşmesiz ve örtüşmeli koşullar altında, $E_G=1,95\text{eV}$ ve $E_G=1,12\text{eV}$ için verimin ve optimum AB seviyesinin değişimi .....                                                                                                  | 68    |
| Çizelge 4.3. $E_G=1,95\text{eV}$ için, $\gamma=1$ durumunda, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullar altında, örtüşmesiz ve örtüşmeli optimum AB seviyeleri kullanılarak elde edilen, maksimum kısa devre akım yoğunluğu, açık devre voltajı, doluluk faktörü ve verim değerleri ..... | 74    |
| Çizelge 4.4. $E_G=1,95$ ve $1,12$ eV için $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında, örtüşmenin farklı değerleri için (0, 0,4 ve 4 eV) etkin $\tau_{SHR}$ değerleri .....                                                                                                          | 78    |
| Çizelge 4.5. m çoğullama sayısı iken ( $m=1,2,...m_{\max}$ ), integral aralıkları ve dört pil modeline ait soğurma katsayıları .....                                                                                                                                            | 82    |
| Çizelge 4.6. Pil (a) için, $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında, 0,0,4 ve 4 eV örtüşme koşulu altında, Auger mekanizmasının verim ve optimum AB seviyesi üzerindeki etkisi .....                                                                                              | 84    |
| Çizelge 4.7. Pil (b) için, $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında, 0,0,4 ve 4 eV örtüşme koşulu altında, Auger mekanizmasının verim ve optimum AB seviyesi üzerindeki etkisi .....                                                                                              | 84    |
| Çizelge 4.8. Pil (c) için, $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında, 0,0,4 ve 4 eV örtüşme koşulu altında, Auger mekanizmasının verim ve optimum AB seviyesi üzerindeki etkisi .....                                                                                              | 85    |
| Çizelge 4.9. Pil (d) için, $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında, 0,0,4 ve 4 eV örtüşme koşulu altında, verim ve optimum AB seviyesi değerleri .....                                                                                                                           | 85    |

**Çizelge****Sayfa**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 4.10. $E_G=1,95$ eV için $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullarda, $X=1000$ , $\mu=2000$ cm <sup>2</sup> /Vs, $N_{C,V}=10^{19}$ cm <sup>-3</sup> ve $10^{17}$ cm <sup>-3</sup> değerleri için, AB seviyesi, etkin $\tau_{SHR}$ ve verim değerleri ..... | 105 |
| Çizelge 4.11. $E_G=1,12$ eV için $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullarda, $X=1000$ , $\mu=2000$ cm <sup>2</sup> /Vs değerleri için, AB seviyesi, etkin $\tau_{SHR}$ ve verim değerleri .....                                                                   | 105 |
| Çizelge 4.12. $E_G=1,95$ eV ve $E_G=1,12$ eV için $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullarda, $X=1000$ iken, DDM ile bulunan, AB seviyesi, etkin $\tau_{SHR}$ ve verim değerleri .....                                                                            | 106 |
| Çizelge 4.13. $E_G=1,95$ eV için elektrik alan modele dahilken ve değilken hesaplanan verim değerleri .....                                                                                                                                                                                       | 112 |
| Çizelge 4.14. $X=46000$ ve DOT modele dahilken, mobilitenin farklı değerleri için DDM ve KSDM sonuçlarının karşılaştırılması...                                                                                                                                                                   | 123 |
| Çizelge 4.15. Farklı ışık konsantrasyonlarında $E_G=1,95$ eV için $N_{C,V}=10^{17}$ cm <sup>-3</sup> durumunda, DDM ve $\mu=2000$ cm <sup>2</sup> /Vs ve $\mu=200$ cm <sup>2</sup> /Vs için KSDM verim sonuçları .....                                                                            | 124 |
| Çizelge 4.16. $E_G=1,95$ eV için $N_{C,V}=10^{17}$ cm <sup>-3</sup> durumunda, DDM ve $\mu=2000$ cm <sup>2</sup> /Vs ve $\mu=200$ cm <sup>2</sup> /Vs optimum $E_G$ ve maksimum verim değerleri .....                                                                                             | 124 |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                         | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Atmosferi kirleten kaynaklar [1] .....                                                                                             | 4     |
| Şekil 2.2. Watt başına fotovoltaiik modül fiyatının yıllara göre değişimi [4] .....                                                           | 5     |
| Şekil 2.3. Güneş ışığının enerji akış diyagramı (Güç birimi TW) [9] .....                                                                     | 6     |
| Şekil 2.4. Güneş enerji spektrumu [8] .....                                                                                                   | 8     |
| Şekil 2.5. Dünyadaki toplam kurulu fotovoltaiik güç miktarının yıllara göre değişimi .....                                                    | 9     |
| Şekil 2.6. Kurulu fotovoltaiik gücün dünya ülkelerine dağılımı .....                                                                          | 10    |
| Şekil 2.7. n tipi ve p tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı .....                                                                         | 11    |
| Şekil 2.8. p-n eklem güneş pili enerji bant diyagramının,<br>(a) aydınlatılmadan önceki hali<br>(b) ışık altındaki hali .....                 | 12    |
| Şekil 2.9. Tipik bir güneş pilinin yapısı .....                                                                                               | 14    |
| Şekil 2.10. p-n eklem güneş pili için eşdeğer elektriksel devre .....                                                                         | 15    |
| Şekil 2.11. Bir güneş pili için tipik $J-V$ karakteristiği .....                                                                              | 17    |
| Şekil 2.12. AM0 spektrumu için ideal Shockley diyodunun verim-enerji bant genişliği değişimi .....                                            | 20    |
| Şekil 2.13. Çeşitli yarıiletken malzemelerde, soğurma katsayısının enerji ile değişimi .....                                                  | 21    |
| Şekil 2.14. Si (a) ve GaAs (b) için elektron ve boşluk mobilitelerinin taşıyıcı konsantrasyonu ile değişimi .....                             | 22    |
| Şekil 3.1. ABGP yapısı ve ışık altındaki enerji bant diyagramı .....                                                                          | 34    |
| Şekil 3.2. Örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullarda soğurma katsayılarının enerji ile değişimi, soğurma katsayılarının oranı<br>(a) 1, (b) 10 ..... | 35    |

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.3. P noktasında foton soğurulması ve emisyonu için açılar verilmiştir. Dahili emisyonlar isotropik, harici emisyonlar $\theta_c$ açısı ile sınırlı ve dışarıdan bir kaynaktan gelen fotonlar kırılmadan önce $\theta_s$ , kırılmadan sonra $\theta'_s$ açısı ile sınırlıdır [76]                                                                                                                              | 40    |
| Şekil 3.4. İki noktalı sonlu eleman                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 61    |
| Şekil 4.1. $\gamma=1$ durumunda, $E_G = 1,95$ eV (a) ve $E_G = 1,12$ eV (b) için örtüşmesiz koşul (sürekli çizgi), 0,4 eV (noktalı çizgi) ve 4 eV (kesikli çizgi) örtüşmeli koşul altında verimin AB seviyesi ile değişimi                                                                                                                                                                                            | 65    |
| Şekil 4.2. $\gamma=1$ durumunda, verimin örtüşme miktarı ile değişimi; $E_G = 1,95$ eV (sürekli çizgi) için (a) OV optimum IB, (b) örtüşmesiz optimum AB; $E_G = 1,12$ eV (kesikli çizgi) (c) örtüşmeli optimum AB, (d) örtüşmesiz optimum AB, kullanılarak                                                                                                                                                           | 66    |
| Şekil 4.3. $\gamma=10$ durumunda, $E_G = 1,95$ eV (a) ve $E_G = 1,12$ eV (b) için örtüşmesiz koşul (i), 0,4 eV (ii) ve 4 eV (ii) örtüşme koşulu altında verimin AB seviyesi ile değişimi                                                                                                                                                                                                                              | 69    |
| Şekil 4.4. $E_G = 1,95$ eV (sürekli çizgi) ve 1,12 eV (kesikli çizgi) için, $\gamma=1$ durumunda, verimin tepe değerinin aşağıdaki koşullarda baz kalınlığı ile değişimi:<br>(a) Örtüşmesiz koşul<br>(b) 0,4 eV örtüşmeli koşul örtüşmesiz AB kullanarak (i) ve (iii); örtüşmeli AB kullanarak (ii) ve (iv)<br>(c) 4 eV örtüşmeli koşul örtüşmesiz AB kullanarak (i) and (iii); örtüşmeli AB kullanarak (ii) and (iv) | 70    |
| Şekil 4.5. $\gamma=1$ (a) ve $\gamma=10$ (b) durumlarında $\alpha_w$ değerinin örtüşme miktarı ile değişimi                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 71    |
| Şekil 4.6. $\gamma=1$ (a) ve $\gamma=10$ (b) durumlarında, $E_G = 1,95$ eV için; örtüşmesiz koşul (sürekli çizgi), 0,4 ve 4 eV örtüşmeli koşullarda örtüşmeli optimum AB (kesikli çizgi) ve örtüşmesiz optimum AB (noktalı çizgi) kullanılarak elde edilen $J-V$ eğrisi                                                                                                                                               | 73    |

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.7. $\gamma=1$ durumunda, (a) örtüşmesiz koşulda, (b) 0,4 eV, (c) 4 eV örtüşmeli koşulda örtüşmeli optimum AB kullanılarak, (d) 0,4 eV, (e) 4 eV örtüşmeli koşulda örtüşmesiz optimum AB kullanılarak elde edilen verim-bant genişliği eğrileri .....                                                     | 75    |
| Şekil 4.8. $\gamma=1$ durumunda, örtüşmesiz (sürekli çizgi), 0,4 eV örtüşmeli (kesikli çizgi) ve 4 eV örtüşmeli (noktalı çizgi) koşullarda verimin ışımsız rekombinasyon ömür süresi ile değişimi .....                                                                                                          | 77    |
| Şekil 4.9. $E_G=1,95$ eV için, $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında, etkin $\tau_{SHR}$ değerinin örtüşme miktarı ile değişimi .....                                                                                                                                                                           | 78    |
| Şekil 4.10. Pil (a) (artılı çizgi), pil (b) (yuvarlaklı çizgi), pil (c) (yıldızlı çizgi) ve pil (d) (sürekli çizgi) için Auger üretimi/rekombinasyonunun verim- $E_G$ değişimi üzerindeki etkisi .....                                                                                                           | 81    |
| Şekil 4.11. $E_G=1,12$ eV iken pil (a) (kesikli çizgi), pil (b) (yuvarlaklı çizgi), pil (c) (yıldızlı çizgi) ve pil (d) (sürekli çizgi) için verimin AB seviyesi ile değişimi .....                                                                                                                              | 82    |
| Şekil 4.12. Pil (a) (kesikli çizgi), pil (b) (yuvarlaklı çizgi) ve pil (c) (yıldızlı çizgi) için AB enerji seviyesinin bant genişliği $E_G$ ile değişimi .....                                                                                                                                                   | 83    |
| Şekil 4.13. Verimin taşıyıcı mobilitesi ile değişimi; (a) $E_G=1,95$ eV için, $N_{C,V} 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (yuvarlak ve yıldızla gösterilen eğriler) ve $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (sürekli ve kesikli çizgiler) mertebelerinde, (b) $E_G=1,12$ eV için $N_{C,V} 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ mertebesinde ..... | 91    |
| Şekil 4.14. Taşıyıcı mobilitelerinin farklı değerleri için, kısa devre ve karanlık durumlarda, (a) elektron ve boşluk konsantrasyonlarının, (b) elektron ve boşluk akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimi .....                                                                                       | 92    |
| Şekil 4.15. $E_G=1,95$ eV için $N_{C,V}=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ durumunda verimin ışık konsantrasyonu ile değişimi .....                                                                                                                                                                                        | 95    |
| Şekil 4.16. $E_G=1,12$ eV için verimin ışık konsantrasyonu ile değişimi .....                                                                                                                                                                                                                                    | 95    |
| Şekil 4.17. $E_G=1,95$ eV için kısa devre ve karanlık elektron ve boşluk yoğunluklarının ışık konsantrasyonu ile değişimleri .....                                                                                                                                                                               | 96    |
| Şekil 4.18. $E_G=1,95$ eV için açık devre geriliminin ışık konsantrasyonu ile değişimi .....                                                                                                                                                                                                                     | 97    |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                                                                                                   | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 4.19. Enerji durum yoğunluğu $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ mertebesinde iken ABGP veriminin $E_G$ ile değişimi .....                                                                                         | 98           |
| Şekil 4.20. Enerji durum yoğunluğu $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ mertebesinde iken ABGP veriminin $E_G$ ile değişimi .....                                                                                         | 99           |
| Şekil 4.21. $E_G=1,95 \text{ eV}$ ve $E_G=1,12 \text{ eV}$ için verimin $\alpha_w$ ile değişimi .....                                                                                                          | 100          |
| Şekil 4.22. $E_G=1,95$ ve $E_G=1,12 \text{ eV}$ için, $\gamma=1$ ve $\gamma=10$ durumlarında verimin örtüşme miktarı ile değişimi .....                                                                        | 102          |
| Şekil 4.23. $E_G=1,95 \text{ eV}$ için örtüşmenin farklı değerlerinde, kısa devre ve karanlık durumlarda elektron ve boşluk yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimi .....                                 | 103          |
| Şekil 4.24. $E_G=1,95 \text{ eV}$ için örtüşmenin farklı değerlerinde kısa devre (a) ve karanlık (b) akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimleri .....                                                | 104          |
| Şekil 4.25. Elektrik alanın farklı baz kalınlıkları için değişimi (a) $E_G=1,95 \text{ eV}$ , (b) $E_G=1,12 \text{ eV}$ .....                                                                                  | 108          |
| Şekil 4.26. $E_G=1,95 \text{ eV}$ için sürüklenme akım yoğunluğu değişimi .....                                                                                                                                | 109          |
| Şekil 4.27. $E_G=1,95 \text{ eV}$ ve $1,12 \text{ eV}$ için moblitenin $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ve $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ değerlerinde, $\Delta N_{De}$ 'nin $\alpha_w$ ile değişimi .....          | 110          |
| Şekil 4.28. Kısa devre durumunda elektron ve boşlukların, farklı baz kalınlıkları için baz bölgesi boyunca dağılımları (a) Elektrik alan ihmal, (b) Elektrik alan dahil .....                                  | 111          |
| Şekil 4.29. $E_G=1,95 \text{ eV}$ için $\alpha_w=1$ iken, kısa devre, karanlık durum ve toplam elektron (a) ve boşluk (b) yoğunluğunun baz bölgesi boyunca değişimi .....                                      | 113          |
| Şekil 4.30. $E_G=1,95 \text{ eV}$ için $\alpha_w=1$ 'de elektrik alanın/sürüklenme akımının ihmal (a) ve dahil (b) edilmesi halinde difüzyon ve toplam akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimi ..... | 114          |
| Şekil 4.31. ABGP'nin toplam yükünün ( $\rho/e$ ) ve $\Delta N_{DE}$ 'nin baz bölgesi boyunca değişimleri .....                                                                                                 | 115          |

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                           | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.32. $E_G=1,95$ eV için $\mu=2000$ cm <sup>2</sup> /Vs değerinde (a) elektrik alanının değişimi, (b) sürüklenme akımının değişimi .....                                                                                                  | 116   |
| Şekil 4.33. $E_G=1.95$ eV için $\alpha_w=1$ iken kaynak [85] yöntemi ve KSDM ile bulunan sürüklenme akım yoğunluğu eğrileri .....                                                                                                               | 117   |
| Şekil 4.32. $E_G=1.95$ eV için $\alpha_w=5$ iken kaynak [85] yöntemi ve KSDM ile bulunan sürüklenme akım yoğunluğu eğrileri .....                                                                                                               | 117   |
| Şekil 4.34. $\mu_e=2000$ cm <sup>2</sup> /V ve $\mu_h=200$ cm <sup>2</sup> /V için, kısa devre durumunda elektron ve boşlukların, farklı baz kalınlıkları için baz bölgesi boyunca dağılımları .....                                            | 118   |
| Şekil 4.35. $E_G=1,95$ eV için, $\mu_e=2000$ cm <sup>2</sup> /V ve $\mu_h=200$ cm <sup>2</sup> /V durumunda, elektrik alanın baz bölgesi boyunca değişimi .....                                                                                 | 119   |
| Şekil 4.36. $E_G=1,95$ eV için, $\mu_e=2000$ cm <sup>2</sup> /V ve $\mu_h=200$ cm <sup>2</sup> /V durumunda, sürüklenme akımının baz bölgesi boyunca değişimi .....                                                                             | 120   |
| Şekil 4.37. $E_G=1,95$ eV için, $\mu_e=2000$ cm <sup>2</sup> /V ve $\mu_h=200$ cm <sup>2</sup> /V durumunda, $\alpha_w=1$ iken, kısa devre, karanlık durum ve toplam elektron (a) ve boşluk (b) yoğunluğunun baz bölgesi boyunca değişimi ..... | 121   |
| Şekil 4.38. $E_G=1,95$ eV için, $\mu_e=2000$ cm <sup>2</sup> /V ve $\mu_h=200$ cm <sup>2</sup> /V durumunda, $\alpha_w=1$ iken, difüzyon, sürüklenme ve toplam akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimi ...                            | 122   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler           | Açıklama                                                   |
|--------------------|------------------------------------------------------------|
| $K$                | Kelvin                                                     |
| $m$                | Hava kütlesi                                               |
| $\lambda$          | Dalgaboyu                                                  |
| $E_G$              | Bant aralığı (eV)                                          |
| $E_F$              | Fermi enerji seviyesi                                      |
| $\Delta n$         | Fazlalık elektron yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ )           |
| $\Delta p$         | Fazlalık boşluk yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ )             |
| $g_{op}$           | Işıkla taşıyıcı üretim hızı                                |
| $L_{e/h}$          | Elektron ve boşlukların difüzyon mesafesi                  |
| $D_{e/h}$          | Elektron ve boşlukların difüzyon katsayıları               |
| $\tau_{e/h}$       | Elektron ve boşlukların ömür süreleri                      |
| $\mu_{e/h}$        | Elektron ve boşlukların mobiliteleri                       |
| $P_i$              | Güneş pili yüzeyine gelen güç yoğunluğu                    |
| $P_m$              | Maksimum çalışma güç yoğunluğu                             |
| $\varepsilon_{CI}$ | Elektron kuasi-Fermi seviyesinin ayrılma miktarı           |
| $\varepsilon_{IV}$ | Boşluk kuasi-Fermi seviyesinin ayrılma miktarı             |
| $V_{oc}$           | Açık devre gerilimi (volt)                                 |
| $J_{sc}$           | Kısa devre foto akım yoğunluğu ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) |
| $J_o$              | Diyot kaçak akım yoğunluğu ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )     |
| $J_e$              | Elektron akım yoğunluğu ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )        |
| $J_h$              | Boşluk akım yoğunluğu ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )          |
| $R_s$              | Parazitik seri direnç (ohm)                                |

**Simgeler****Açıklama**

|               |                                                                                      |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_{sh}$      | Şönt direnç (ohm)                                                                    |
| $R_L$         | Yük direnci (ohm)                                                                    |
| $\eta$        | Verim                                                                                |
| $\alpha_{XY}$ | Soğurma katsayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ), XY, elektron geçişinin gerçekleştiği bantlar |
| $\varepsilon$ | Enerji (eV)                                                                          |
| $\lambda$     | Dalgaboyu (nm)                                                                       |
| $n$           | Elektron yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ )                                              |
| $p$           | Boşluk yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ )                                                |
| $P$           | Güç yoğunluğu ( $\text{W/m}^2$ )                                                     |
| $n_r$         | Kırılma indisi                                                                       |
| $\mu$         | Mobilite ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )                                                 |
| $T$           | Sıcaklık (K)                                                                         |
| $c$           | Işık hızı                                                                            |
| $h$           | Plunck sabiti                                                                        |
| $X$           | Işık konsantrasyonu                                                                  |
| $e$           | Elektron yükü ( $1,6 \times 10^{-19}$ C)                                             |
| $w$           | Baz kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )                                                      |
| $v$           | Bir moddaki foton sayısı                                                             |
| $f_{vi}$      |                                                                                      |

**Kısaltmalar****Açıklama**

|            |                                                  |
|------------|--------------------------------------------------|
| <b>TW</b>  | $10^{12}$ Watt                                   |
| <b>PW</b>  | $10^{15}$ Watt                                   |
| <b>AM0</b> | Atmosferin dışındaki güneş ışıma spektrumu       |
| <b>AM1</b> | Deniz seviyesine dik gelen güneş ışıma spektrumu |

**Kısaltmalar****Açıklama**

|             |                                        |
|-------------|----------------------------------------|
| <b>AM2</b>  | 60° açıyla gelen ışıma güneş spektrumu |
| <b>ABGP</b> | Ara bant yapılı güneş pili             |
| <b>DDM</b>  | Detaylı denge modeli                   |
| <b>KSDM</b> | Kuasi-sürüklenme-difüzyon modeli       |
| <b>AB</b>   | Ara bant                               |
| <b>CB</b>   | İletkenlik bandı                       |
| <b>VB</b>   | Valans bandı                           |
| <b>Cz</b>   | Czochralski                            |
| <b>FZ</b>   | Floating zone                          |
| <b>ASEC</b> | Applied Solar Energy Corporation       |

## 1. GİRİŞ

Fotovoltaik piller, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elektronik devre elemanlarıdır. Fotovoltaik pil yapımında kullanılan yarı iletken malzemenin bant aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar, fotovoltaik pilde, elektron boşluk çiftleri üreterek, fotoakımı oluştururlar. Fotovoltaik pillerde verimi sınırlayan en önemli etken, güneş spektrumunun tam olarak soğurulamamasıdır. Seçilen bant aralığının büyüklüğüne göre, enerjisi bant aralığından küçük olan fotonlar soğurulamazken, büyük enerjili fotonların enerjisinin bir kısmı termalizasyonla kaybolmaktadır. Son zamanlarda, güneş spektrumunun daha büyük bölümünü soğurmak için, tandem piller, aşağı ve yukarı enerji dönüşümü pilleri, çoklu sıcaklık pilleri, çoklu soğurma pilleri ve arabant yapılı güneş pilleri (ABGP) üzerinde çalışmalar yürütülmektedir.

Bu tez çalışmasında, güneş spektrumunun daha büyük bir bölümünü soğurarak yüksek verim sağlama kapasitesi olan ara bant yapılı güneş pilleri üzerinde teorik analizler yapılmıştır.

Bölüm 2’de enerji üretiminin küresel ısınmaya olan etkilerine ve fotovoltaik pillerin gerekliliğine değinildikten sonra; güneş pillerinde fotovoltaik etkiyi sağlayan, güneş enerjisi ve güneş enerji spektrumu hakkında bilgi verilmiştir. Fotovoltaik pazarın bugünkü durumuna ve gelecek beklentilerine yer verilmiştir. Daha sonra fotovoltaik etki açıklanarak, bir p-n eklem fotovoltaik pilin yapısı, çalışma prensipleri, verimine etki eden faktörler detaylı olarak incelenmiştir. Son olarak fotovoltaik pillerin tarihçesi sunulmuştur.

Üçüncü Bölümde, Ara bant yapılı güneş pillerinin (ABGP) tarihçesi ve çalışması sunulduktan sonra ABGP’nin analizi için gerekli olan başlangıç denklemleri verilmiştir. ABGP’nin analizinde kullanılan detaylı denge modeli (DDM) ve kuasi sürüklenme difüzyon modeli (KSDM) için gerekli olan eşitlikler ise bu başlangıç denklemlerinden yola çıkılarak elde edilmiştir.

Bölüm 4’de, DDM ve KSDM kullanılarak, ABGP yapısı incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Detaylı denge modelinde analizler, örtüşmenin ve Auger mekanizmasının ABGP performansı üzerindeki etkileri olmak üzere iki ana başlık altında yapılmıştır. Örtüşmenin sırasıyla; verim, optimum ara bant enerji seviyesi, bant genişliği, optimum baz genişliği, kısa devre akım yoğunluğu-çıkış gerilimi eğrisi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Auger mekanizması sisteme dahil edilerek, önerilen dört farklı ABGP modeli üzerinde hesaplamalar yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca, KSDM kullanılarak, DDM ile etkileri incelenemeyen, taşıyıcı mobilitelerinin, DOT’un ( $\Delta n x \Delta p$ ) ve elektrik alanın ABGP’nin verimi üzerindeki etkileri de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Son bölümde ise yapılan çalışmalar hakkında genel bir değerlendirmeye ve geleceğe yönelik önerilere yer verilmiştir.

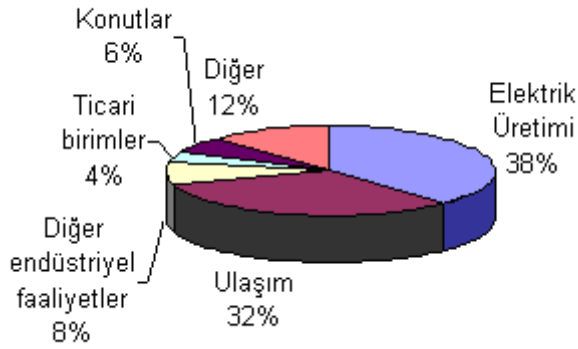
## 2. FOTOVOLTAİK ETKİ VE FOTOVOLTAİK PİLLERİN TARİHÇESİ

Fotovoltaik piller, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elektronik devre elemanlarıdır. Bu kısımda, enerji üretiminin küresel ısınmaya olan etkilerine ve fotovoltaik pillerin gerekliliğine değinildikten sonra; güneş pillerinde fotovoltaik etkiyi sağlayan, güneş enerjisi ve güneş enerji spektrumu hakkında bilgi verilmiştir. Fotovoltaik pazarın bugünkü durumuna ve gelecek beklentilerine yer verilmiştir. Daha sonra fotovoltaik etki açıklanarak, bir p-n eklem fotovoltaik pilin yapısı, çalışma prensipleri, verimine etki eden faktörler detaylı olarak incelenmiştir. Son olarak fotovoltaik pillerin tarihçesi sunulmuştur.

### 2.1. Enerji Üretimi ve Küresel Isınma

Günümüzde dünyamızın yüz yüze geldiği en önemli tehditlerden biri küresel ısınmadır. Küresel ısınma neticesinde meydana gelen iklim değişikliklerinin sebep olacağı tehlikeler oldukça ürkütücüdür. Küresel ısınmada özellikle enerji üretimi esnasında açığa çıkan karbondioksit ve sera gazlarının etkisi büyüktür. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, karbondioksit ve sera gazı yayarak atmosferi kirleten faktörler arasında en büyük payın sahibi, %38 ile elektrik üretimidir [1]. Küresel ısınmanın durdurabilmesi, en azından etkilerinin azaltılabilmesi için, atmosferi kirletmeyen yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmemiz zorunludur.

Günümüzde, petrol ürünleri (kömür ve doğal gaz) ile üretilen elektrik, toplam elektrik üretiminin %70’inden fazlasını oluştururken, yenilenebilir enerji kaynakları bunun ancak %2’sini oluşturmaktadır [2]. Güneş enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki payı ise şu anda sadece %1’dir.



Şekil 2.1. Atmosferi kirleten kaynaklar [1]

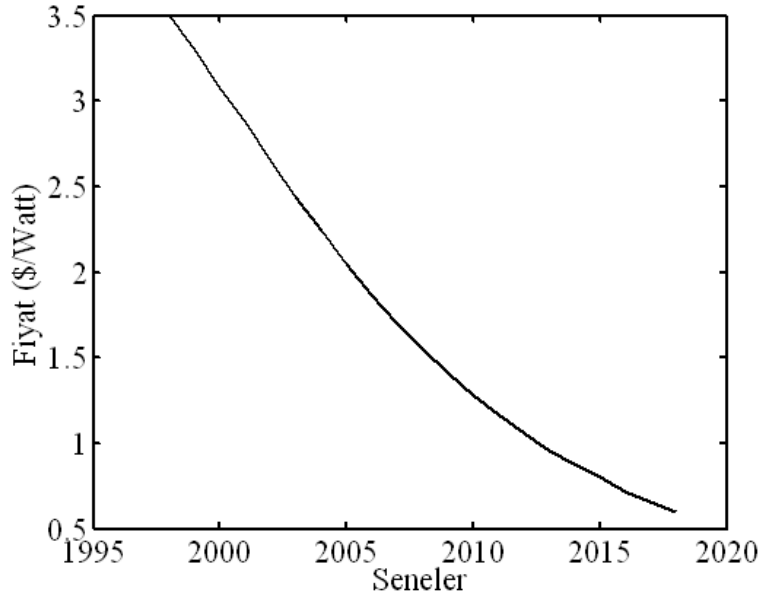
Güneş enerjisinden elektrik üretimi, hem çevre kirlenmesini önleyecek hem de insanlığın kısıtlı miktardaki fosil yakıtlarına bağımlılığına son verecektir. Bu, Türkiye gibi pek çok ülke için enerjide dışa bağımlılıktan kurtulma anlamına gelmektedir. Ayrıca güneş enerjisi, tüketimin gerçekleşeceği bölgede üretilebileceği için, enerji dağıtım problemi de olmayacaktır.

Bütün avantajlarına rağmen, güneş enerjisinin yeteri kadar yaygınlaşmamasının en önemli nedeni maliyetinin şu anda oldukça yüksek olmasıdır. 2008 Nisan ayı fiyatı ince film silisyum için kurulum fiyatı 3,7 \$/Watt, kadardır [3]. Son on yıldır güneş pili fiyatlarındaki hızlı düşüş (Şekil 2.2), güneş enerjisini fosil yakıtlarla rekabet edecek konuma getirmeye yetmemiştir. Bu sebeple güneş pili üzerine yapılan çalışmalarda asıl hedef, düşük maliyetle yüksek verimli piller elde etmektir.

## 2.2. Güneş ve Güneş Enerjisi Spektrumu

Güneş, ışık saçan bir gaz topudur. Güneşin ikinci jenerasyon bir yıldız olduğu tahmin edilmektedir. Çapı yaklaşık 1 393 000 km ve kütlesi  $2,9 \times 10^{27}$  tondur ki bu ağırlık dünyanın 330 000 katıdır. %69,5'ini hidrojen, %28'ini helyum ve %2'sini de karbon, nitrojen ve oksijen oluşturmaktadır. Güneşte diğer elementlerden eser miktarda mevcuttur. Güneşin merkezinin dünyanın

merkezinin uzaklığı ortalama 149 660 000 km'dir. İç sıcaklığı ise  $15 \times 10^6$  K'dir [4].

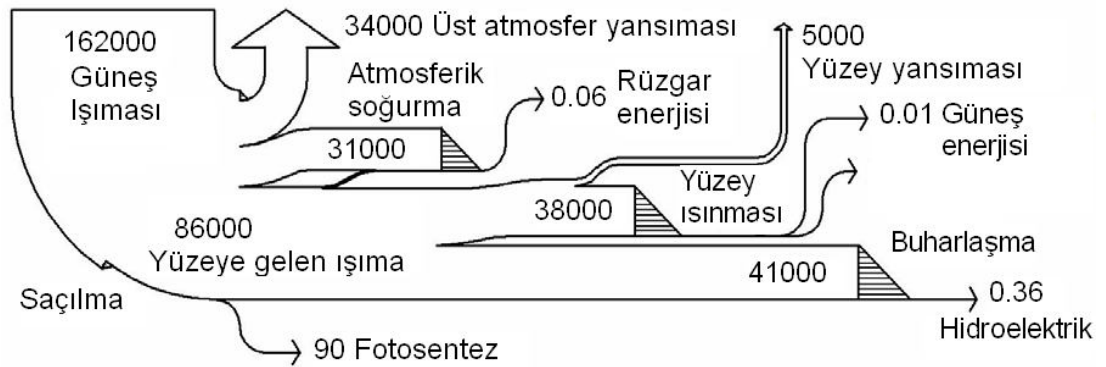


Şekil 2.2. Watt başına fotovoltaik modül fiyatının yıllara göre değişimi [3]

Karasal ekosisteme giren en büyük enerji akışını güneş ışığı oluşturmaktadır. Atmosferdeki soğurma ve yansımaların ardından yeryüzüne ulaşan enerji miktarı 100 000 TW ( $10^{12}$  Watt) [5] olup, nükleer, jeotermal ve gel-gitden elde edilen enerji dışındaki bütün enerjilere dönüşebilmektedir. Bu çok büyük bir enerji kaynağıdır ve global enerji kapasitesinin (13,7 TW [6]) hemen hemen 6000 katıdır. Bu sebeple güneş enerjisi sera gazı yaymayan temiz enerji kaynağı olarak kullanılmaya oldukça elverişlidir.

Güneş ışığı, güneş yüzeyinden yayılan ve güneş içerisinde hidrojen atomlarını helyum atomuna dönüştüren füzyon reaksiyonları sonucu ortaya çıkan elektromanyetik bir dalgadır. Güneş çekirdeğinden saniyede  $3,89 \times 10^{26}$  J kadar bir nükleer enerji yayılmaktadır [7]. Bu nükleer enerji hızla termal enerjiye dönüştürülmekte ve yıldızın yüzeyine aktarılmaktadır. Güneşten yayılan  $64 \text{ MW/m}^2$ 'lik enerjinin  $1370 \text{ W/m}^2$ 'lik kısmı dünya atmosferinin dış yüzeyine ulaşmaktadır.

Şekil 2.3 [8] atmosfere ve dış ekosisteme gelen güneş enerjisinin dağılımını göstermektedir. Bu değer, güneş ışığından dönüştürülebilecek enerji miktarının üst sınırını belirlemektedir. Bu sınır termodinamiğin ikinci kanuna bağlıdır ve cihazlardan bağımsızdır. Dünyaya ulaşan 162 PW'lık ( $10^{15}$  Watt) güneş ışığının 86 PW'lık kısmı yeryüzüne direkt (%75) ve dağınık (%25) ışık olarak ulaşmaktadır. Dağınık ışımının enerji kalitesi düşüktür [10]. Güneş enerjisinin yaklaşık 0,01 TW'lık bölümünü güneş ışığının toplanması ve enerji dönüştürücüleri tarafından kullanılması ile harcanmaktadır. Bu, elektrik üretimi için kullanılan fotovoltaik devreler ve su ısıtmak için kullanılan solar termal sistemler için de geçerlidir. Benzer yaklaşımlar rüzgar enerjisi (0,06 TW) ve hidroelektrik enerji (0,36 TW) için de gösterilmiştir [8].

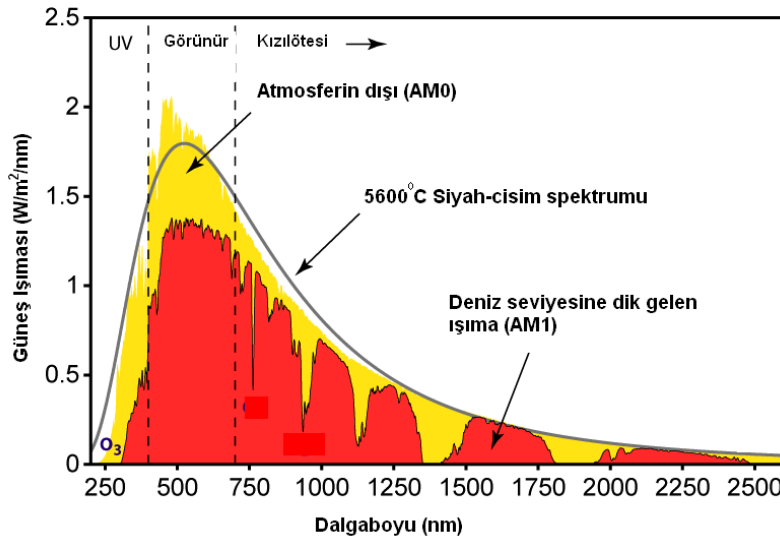


Şekil 2.3. Güneş ışığının enerji akış diyagramı (Güç birimi TW) [9].

Fotovoltaik sistemlerde, yeryüzüne ulaşan güneş enerjisi miktarının değişimini temsil edebilmek için iki önemli parametre tanımlanmıştır. Bunlardan ilki ve sıkça kullanılanı hava kütlesi  $m$ 'dir. Hava kütlesi  $m=1/z$  şeklinde tanımlanmaktadır ve burada  $z=\cos(\alpha)$  ve  $\alpha$ , güneşten gelen ışığın dikeyle yaptığı açıdır. AM0 ( $m=0$ ) atmosferin dışındaki durumu, AM1 açık bir günde deniz seviyesine ışığın dik gelme durumunu ve AM2 ise ışığın dikeyle 60 derece açı yaparak gelmesi durumunu temsil etmektedir. Güneş spektrumunu incelerken dikkate alınan ikinci önemli parametre su buharı miktarı  $w$ 'dur.  $w$ , dikey ekseninde santimetredeki su miktarı olarak tanımlanabilir. Örneğin,  $w=2$ , nemliliğin %50 olduğu anlamına gelir.

Atmosferde, güneş spektrumunu etkileyen kirlilik ve saçılma gibi başka faktörler de mevcuttur. Detaylı bir çalışmada onlar da incelenmelidir [10].

Güneş ışığı, gama ve x ışınlarının bulunduğu nanometrik dalgalı boylarından radyo dalgalarının bulunduğu metrik dalgalı boylarına kadar çok geniş bir spektruma sahiptir. Güneş ışığının spektrumu üç büyük spektral kategoriye ayrılmaktadır. Morötesi (ultraviolet) (UV) ışık ( $\lambda < 400\text{nm}$ ), toplam spektrumun %9'dan daha azını; görünür ışık (VIS) ( $400\text{nm} < \lambda < 700\text{nm}$ ), %39'unu ve kızılötesi (infrared) (IR) ışık yaklaşık %52'sini oluşturmaktadır. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi, güneş enerji spektrumu,  $5600^\circ\text{C}$ 'deki mükemmel siyah-cisim ışımasının spektrumuna çok benzemektedir. Şekilde AM0, atmosferin dış yüzeyinde ölçülen ve bir bölümü modellenen hava kütlesi sıfır referans spektrumunu göstermektedir [11]. Daha önce de bahsedildiği gibi dünya yüzeyine ulaşan ışıma, dünya ekseninin eğimi ve gelen ışımanın bir bölümünün soğurulmasına ve bir bölümünün de yansımaya sebep olan atmosferik etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Bütün bu faktörlerin etkisi Şekil 2.4'de AM1 eğrisinde görülmektedir. Atmosferin üst kısmındaki ozondan ve moleküler ve atomik yapıdaki oksijen ve nitrojenlerdeki elektronik geçişlerden dolayı meydana gelen soğurulma ile, morötesi bölgede, dalgalı boyu  $0,3\ \mu\text{m}$ 'den daha küçük olan ışımaların yeryüzüne ulaşması engellenmektedir. Kızıl ötesi bölgede ise, su ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ve karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) gibi çoklu atomik yapıların sebep olduğu bir soğurulma mekanizması söz konusudur. Atmosferdeki soğurmalar, bulutlardan, okyanuslardan ve yeryüzünden meydana gelen yansımalar ve dünyanın dönüşü (gece/gündüz dönüşümü) hesaba katıldığında yeryüzüne ulaşan güneş enerjisi miktarı okyanuslarda  $17\ \text{mW}/\text{cm}^2$  ve karalarda  $18\ \text{mW}/\text{cm}^2$  olmaktadır [8]. Bu ışığın %75'i güneşten direkt olarak gelen ışık iken; geri kalanı havadaki moleküllerden, nemden, bulutlardan ve kirlilikten saçılan kısımdır.



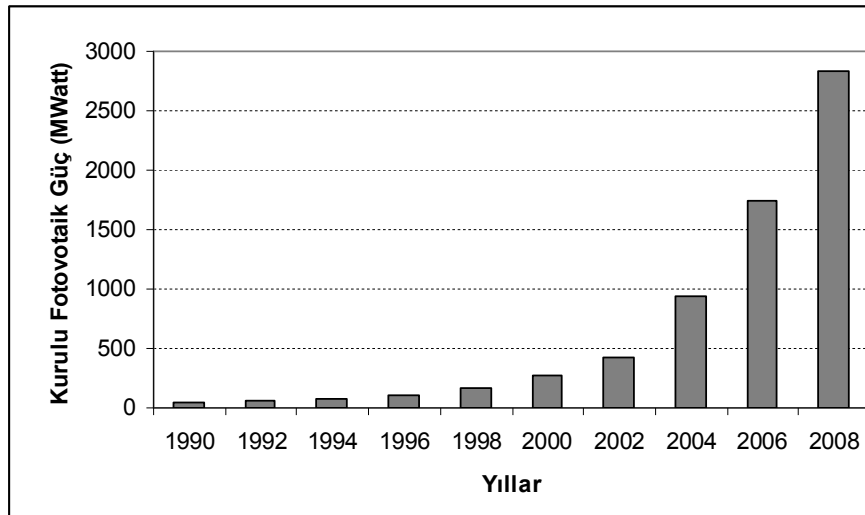
Şekil 2.4. Güneş enerji spektrumu [11]

### 2.3. Fotovoltaik Pıl Pazarının Dünü ve Bugünü

Günümüzde çok sayıda güneş enerjisi teknolojisi bulunmaktadır ve fotovoltaik market payı son yirmi yıldır hızla artmaktadır. Ne yazık ki global alanda güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretimi, bu kaynağın potansiyeli ile karşılaştırıldığında çok küçük kalmaktadır [5]. Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen elektriğin yüzde birinden daha az bir miktarı fotovoltaik sistemlerle elde edilmektedir. Ucuz fosil yakıtlarının baskın olduğu enerji marketinde, güneş teknolojilerinin bugünkü maliyeti, fotovoltaik pillerin rekabet gücünü azaltmaktadır. Bilimsel ve teknolojik açıdan bakıldığında güneş enerjisi sistemlerinde en büyük hedef, verimin artırılması ve maliyetin düşürülmesidir.

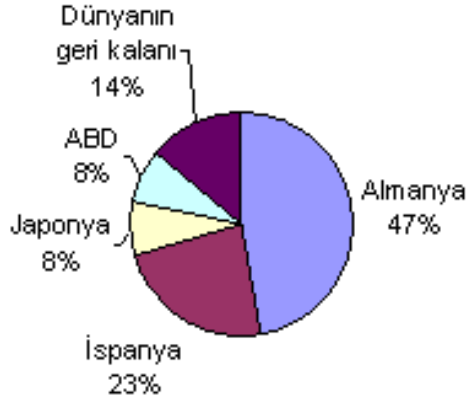
2007 yılında, dünyadaki toplam fotovoltaik market kurulumu, bir önceki yıla oranla %62 büyüyerek, 2826 MW'lık rekor bir düzeye ulaşmıştır [12]. Bu yıl içerisinde fotovoltaik endüstrisi 17,2 milyon dolarlık bir pazara sahip olmuştur. Fotovoltaik endüstrisinin en önemli bölümünü polisilikon malzeme ile üretilen güneş pilleri oluşturmaktadır. İnce film üretimi ise 2006'da 181 MW olan kurulumunu 2007'de 400 MW'a çıkararak toplam fotovoltaik üretiminin %12'sine ulaşmıştır.

Şekil 2.5, 1990 yılından bugüne kadar fotovoltaik kurulumunda meydana gelen gelişmeyi göstermektedir [12]. Şekilde görülen büyüme hızı, başka herhangi bir malzeme için tatmin edici olabilir ancak fotovoltaik pazar hedefleri düşünüldüğünde bu hız tatmin edici olmaktan çok uzaktır. Bugünkü büyüme hızı ile devam edildiğinde, dünya enerji piyasasında fotovoltaik pazarın önemli bir pay olabilmesi bu yüzyılın ortalarını bulacaktır. 2030 yılı için öngörülen kurulu fotovoltaik güç miktarı 100 Gwatt civarındadır [13]. Çeşitli ülkelerde desteklenen güneş enerjisi programları, fotovoltaik pazarın büyüme hızına ivme kazandırmaktadır. Dünyadaki fotovoltaik pazarın dışında tamamen farklı sınır koşulları ve farklı malzeme gereksinimleri olan uzay pazarı vardır.



Şekil 2.5. Dünyadaki toplam kurulu fotovoltaik güç miktarının yıllara göre değişimi

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, 2007 yılında, dünyada kurulu olan 2826 MW'lık fotovoltaik gücün %47'si Almanya'da bulunmaktadır [12]. Almanya'yı, %23 ile İspanya takip etmektedir. Avrupa ülkelerinin toplamdaki payı ise %76'dır.



Şekil 2.6. Kurulu fotovoltaik gücün dünya ülkelerine dağılımı

## 2.4. Fotovoltaik Etki ve Fotovoltaik Pilin Çalışma Prensipleri

### 2.4.1. Fotovoltaik etki

Fotovoltaik etki, bir yarı iletkenin, p-n eklemine, potansiyel engelinin bulunduğu bölgeye ışık verildiğinde, eklemdaki potansiyel engeline meydana gelen düşme miktarı kadarlık gerilim üretmesi olarak tanımlanabilir. Fotovoltaik etki için üç koşul gereklidir.

i) Yarı iletkenin, foton enerjisi ile yeni elektron-boşluk çiftleri üretilmelidir. Bunun için yarı iletkenin gelen fotonun taşıdığı enerji, yarı iletkenin yasak band aralığından daha büyük olmalıdır. Fotonun taşıdığı enerji ile dalga boyu arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur:

$$E = \frac{hc}{\lambda} > E_G \quad hc = 1,24 \text{ eV}\mu\text{m} \quad (2.1)$$

Burada  $h$  Planck sabitini,  $c$  ışığın boşluktaki hızını ve  $\lambda$  ise fotonun dalga boyunu temsil etmektedir.  $E_G$  yasak band aralığı ve  $E$  de fotonun enerjisidir.

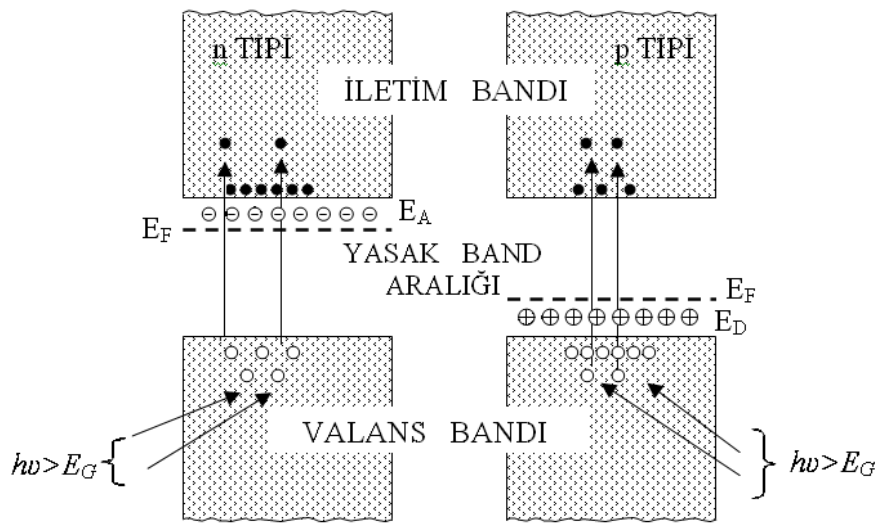
ii) Üretilen azınlık taşıyıcılar eklemdaki elektrik alana ulaşabilmeli ve elektrik alan etkisi ile birbirinden ayrılmalıdır.

iii) Elektrik alan ile birbirinden ayrılan azınlık taşıyıcılar, difüzyonla yollarına devam edebilmeli ve yük üzerinden akım akıtabilmelidir.

Yukarıda belirtilen birinci ve üçüncü şartlar akım üretimi, ikinci şart ise voltaj üretimi için gerekmektedir.

#### 2.4.2. Fotovoltaik pil yapısı ve eşdeğer devresi

Şekil 2.7’de n tipi ve p tipi yarı iletken malzemelerin enerji bant diyagramları verilmiştir. n tipi yarı iletken içerisinde, donör atomları 5. elektronlarını iletkenlik bandına (CB) kolaylıkla göndermekte ve elektronlar çoğunluk hale geldiği için Fermi enerji seviyesi  $E_F$ , iletkenlik bandına yakın olmaktadır. Son yörüngelerinde 3 elektron bulunan alıcı atomlarla katkılanmış olan p bölgesinde, alıcı atomlar kolayca valans (VB) bandından elektron aldıklarından, boşlukların çoğunlukta olduğu p tipi yarı iletken  $E_F$ , valans bandına yakın olmaktadır. Oda sıcaklığında, bir yarı iletkendeki, elektron ve boşluk konsantrasyonu çarpımı  $np$  sabittir ve  $n_i^2$  ile gösterilmektedir.  $n_i$  değeri saf silisyum için  $1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , GaAs için ise  $10^6 \text{ cm}^{-3}$ ’tür.

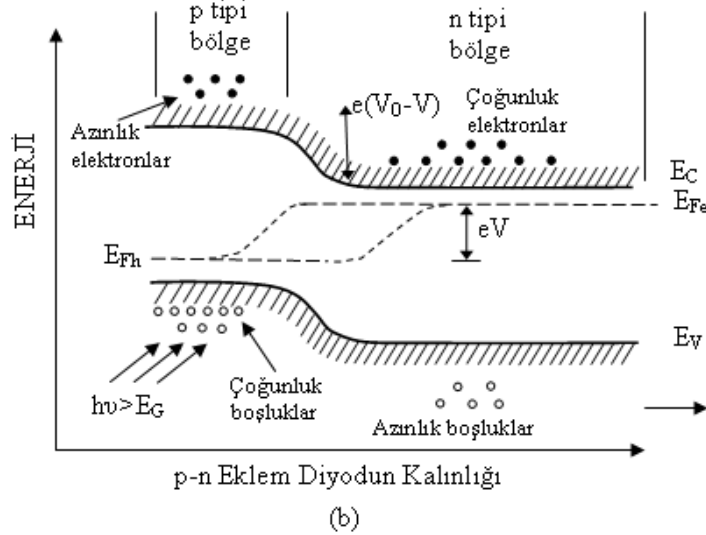
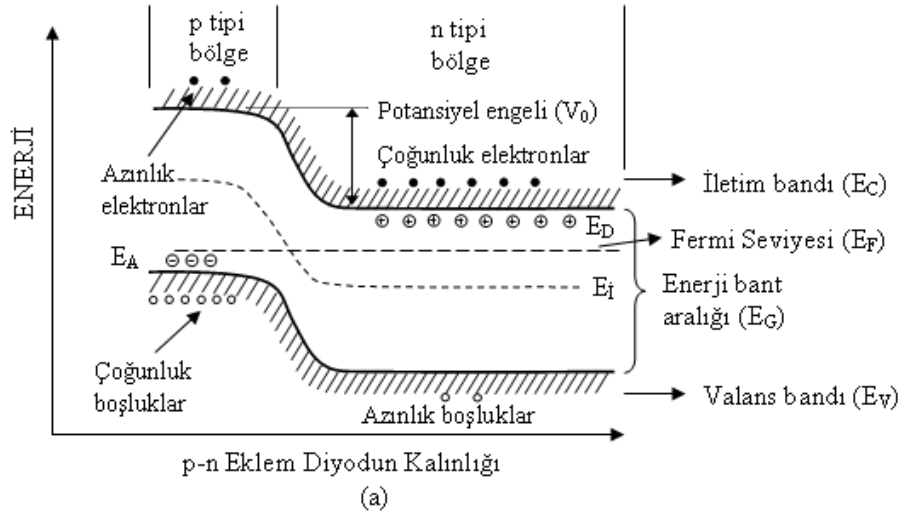


Şekil 2.7. n tipi ve p tipi yarı iletkenin enerji bant diyagramı

n tipi ya da p tipi bir malzeme üzerine güneş ışığı düştüğünde, yasak bant aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar, eşit sayıda elektron ve boşluk çifti oluştururlar ( $\Delta n = \Delta p$ ). Işık yoğunluğu yüksek olduğunda bile, yarı iletken içerisindeki çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonunda önemli bir değişiklik meydana gelmezken, azınlık taşıyıcı konsantrasyonunda oldukça büyük bir artış görülmektedir. Işık etkisiyle üretilen azınlık taşıyıcılar, malzeme içerisinde rekombinasyona uğrayana kadar difüzyon ile hareket etmekte ve malzemenin fotoiletkenliğini arttırmaktadırlar.

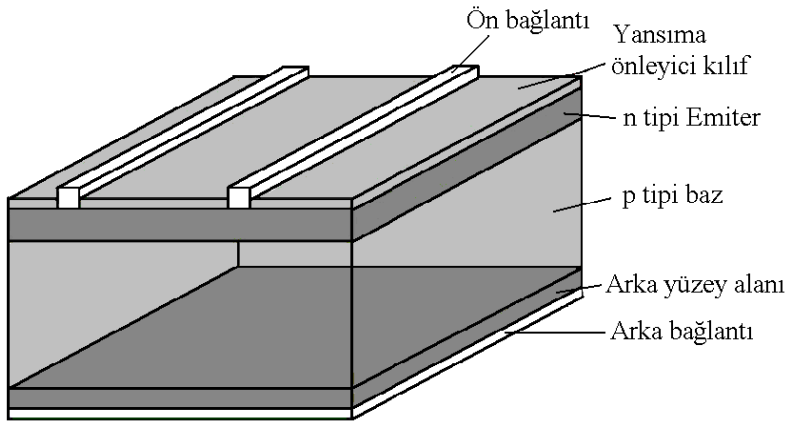
p tipi ve n tipi yarı iletkenler Şekil 2.8.a'daki gibi bir araya getirilirlerse bu eklemden, p ve n taraflarının Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar çoğunluk elektronlar p tarafına ve çoğunluk boşluklar n tarafına geçmeye devam ederler. Denge durumunda, Fermi seviyeleri her iki bölgede aynı seviyeye gelir ve  $V_0$  potansiyel engeline sahip bir p-n eklemi oluşmuş olur.

Güneşten gelen fotonlar fotovoltaiik malzeme tarafından soğurulduğunda, kovalent bağ kırılarak valans bandındaki elektronlar iletkenlik bandına çıkmakta ve serbest elektron boşluk çiftleri oluşmaktadır. Eğer bu elektron ve boşluklar bir elektrik alan ile ayrıldıkları eklem bölgesine rekombinasyona uğramadan ulaşabilirlerse eklemden potansiyel engelini düşürmekte ve potansiyel engelindeki azalma miktarı kadarlık açık devre gerilimi sağlamaktadırlar. Eklemden elektrik alan etkisi ile birbirinden ayrılan elektronlar p-bölgesinde, boşluklar n-bölgesinde yollarına devam ederek uç noktalarda fotoakıma katkıda bulunurlar. Güneş piline ışık uygulandığında üretilen azınlık taşıyıcılar enerjilerini azaltma eğilimindedirler. Denge durumunun korunması için elektron ve boşluk Fermi seviyeleri ayrılarak kuasi-Fermi (quasi-Fermi) seviyeleri meydana getirilir ve çıkışta kuasi-Fermi seviyelerindeki ayrılma miktarı kadarlık bir açıkdevre gerilimi ortaya çıkar (Şekil 2.8.b). Bu pile uygun yük bağlandığında yük üzerinden akım akıtılabilir. Üretilen akım ve gerilim, soğurulan foton sayısı ile orantılıdır.



Şekil 2.8. Homoecklem fotovoltaik pilin,  
 (a) aydınlatılmadan önceki hali (potansiyel engeli  
 $V_0 = (kT/q) \ln(N_A N_D / n_i^2)$ ),  
 (b) ışık altındaki hali

Tipik bir fotovoltaik pil kesiti Şekil 2.9'da görülmektedir. Fotovoltaik pilin üst yüzeyi yansıma önleyici ile kaplanmıştır. Bu kaplamanın kullanım amacı, yansıma katsayılarını düşürerek, mümkün olduğu kadar fazla sayıda fotonun soğurulmasını sağlamaktır. Bir kaç yüz nanometre kalınlığında ince bir filminden oluşan bu kaplama için en sık kullanılan malzeme TiO<sub>2</sub>'dir. Son zamanlarda, daha küçük yüzey rekombinasyonu sağladığı için silisyum nitrat kullanımı da yaygın hale gelmiştir.



Şekil 2.9. Tipik bir güneş pilinin yapısı

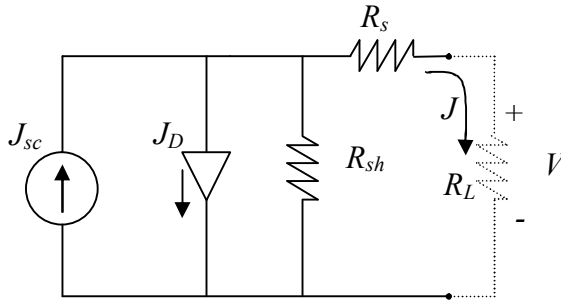
Şekil 2.9'daki yapıda, emitter ve baz katmanlarının birleşim yerindeki p-n eklemi, taşıyıcı toplama olasılığını arttırmak için yüzeye çok yakın yapılmıştır. Baz üzerindeki emitter tabakası çok incedir ve akımı iletmek için yüzeyde iyi tasarlanmış kontak ızgara gerekmektedir. Bazı fotovoltaik pillerde arka yüzeye yerleştirilen bir yansıtıcı ile geri dönen fotonların yeni elektron-boşluk çiftleri üretmesi sağlanmaktadır.

Şekil 2.10'da ışık altındaki bir güneş pilinin basitleştirilmiş bir eşdeğer devresi görülmektedir. Bu şekildeki diyod, kaçak akım ( $J_o$ ), şönt direnç ( $R_{sh}$ ) ve parazitik seri direnç ( $R_s$ ) ile temsil edilmiştir.

$$J_{sc} = J_D(V_j) + \frac{V + JR_s}{R_{sh}} + J \quad (2.2)$$

$$J\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = J_{sc} - J_D(V_j) - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Burada,  $J$  fotovoltaik pilin çıkış akım yoğunluğunu ve  $V$  çıkış gerilimini temsil etmektedir.  $J_{sc}$ , kısa devre fotoakım yoğunluğudur, ve ışık altındaki taşıyıcı üretim hızına, güneş pilinin kalınlığına, elektron ve boşlukların difüzyon uzunluklarına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2.10. p-n eklem güneş pili için eşdeğer elektriksel devre

$$J_{sc} \propto eg_{op}(w + L_e + L_h) \quad (2.4)$$

Burada  $e$  elektron yüküdür.  $w$ , güneş pilinin kalınlığı,  $g_{op}$ , ışık altında taşıyıcı üretim hızı,  $L_e$  ve  $L_h$  elektron ve boşlukların yok olmadan önce katedebilecekleri mesafe olan, difüzyon uzunluklarıdır. Işıyla üretilen azınlık taşıyıcıların akıma katkıda bulunabilmeleri için, difüzyon uzunluğunun güneş pili uzunluğundan daha büyük olması gerekmektedir. Elektron ve boşluklar için difüzyon uzunlukları aşağıdaki gibidir.

$$L_e = \sqrt{D_e \tau_e} \quad L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (2.5)$$

Burada,  $D_e$  ve  $D_h$  elektron ve boşluklar için difüzyon katsayılarıdır. Difüzyon katsayıları ile taşıyıcıların hareket kabiliyeti olarak tanımlanan taşıyıcı mobiliteleri ( $\mu_e$  ve  $\mu_h$ ) arasında, aşağıda verilen, Einstein bağıntısı vardır.

$$\frac{D_{e/h}}{\mu_{e/h}} = \frac{kT}{e} \quad (2.6)$$

Eş. 2.5'deki  $\tau_e$  ve  $\tau_h$ , elektron ve boşluklara ait ömür süreleridir.

$$\frac{1}{\tau_{e/h}} = \frac{1}{\tau_{e/h,rad}} + \frac{1}{\tau_{e/h,SHR}} + \frac{1}{\tau_{e/h,Auger}} \quad (2.7)$$

Burada,  $\tau_{e/h,rad}$ , ışımalı rekombinasyon ömür süresini,  $\tau_{e/h,SHR}$ , ışımasız Shockley Read Hall (SHR) rekombinasyonu ömür süresini ve  $\tau_{e/h,Auger}$ , Auger rekombinasyonu ömür süresini temsil etmektedir. Direkt bant yapılı yarı iletkenlerde, bir elektron ve bir boşluğun birleşmesi neticesinde bir fotonun açığa çıktığı, ışımalı rekombinasyon olasılığı daha büyükken, indirekt bant yapılı malzemelerde SHR rekombinasyonu olasılığı daha yüksektir. Auger rekombinasyonu ise çok katkılı yarı iletkenlerde oluşmaktadır.

Eş. 2.2'deki  $J_D$  diyot üzerinden geçen akımı ve  $V_j$  diyodun eklem bölgesindeki voltajı göstermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$J_D(V_j) = J_o \left( e^{(V - JR_s)/kT} \right) \quad V_j = V - JR_s \quad (2.8)$$

Burada  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  güneş pilinin sıcaklığı ve  $J_o$  diyodun doyum akımı yoğunluğudur.  $J_o$ , aşağıda verilen malzeme parametrelerine bağlıdır.

$$J_o = e \left[ \frac{L_h}{\tau_h} p_n + \frac{L_e}{\tau_e} n_p \right] = e \left[ \frac{D_h}{L_h} p_n + \frac{D_e}{L_e} n_p \right] \quad (2.9)$$

Burada  $p_n$ , n bölgesindeki azınlık boşluk yoğunluğunu,  $n_p$  ise p bölgesindeki azınlık elektron yoğunluğunu göstermekte ve aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \quad n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.10)$$

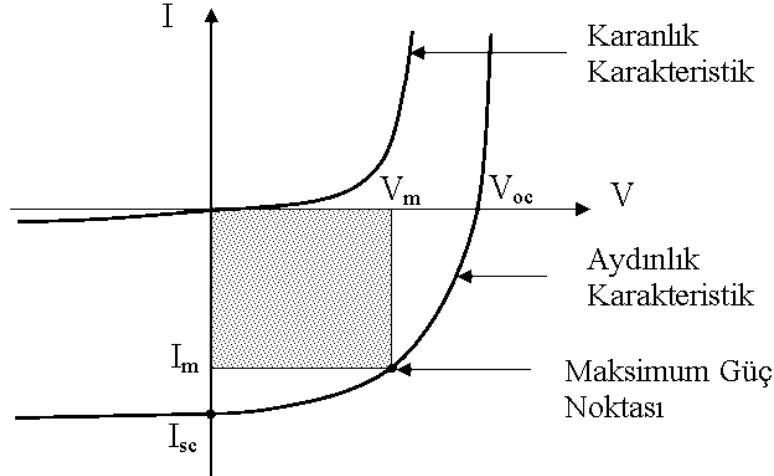
$N_A$  ve  $N_D$  sırasıyla p ve n bölgelerindeki katkı konsantrasyonlarını belirtir. Eş. 2.10'u, Eş. 2.9'da yerine konulduğunda aşağıdaki ifade elde edilir.

$$J_o = en_i^2 \left[ \frac{L_h}{N_D \tau_h} + \frac{L_e}{N_A \tau_e} \right] \quad (2.11)$$

Eş. 2.2-2.3'den yola çıkarak  $R_s$  ve  $R_{sh}$ 'nin etkisi incelenebilir. Genel olarak  $R_s$ 'nin küçük (özellikle bant genişliğinin küçük, dolayısı ile  $J_{sc}$ 'nin büyük olduğu durumlarda) ve  $R_{sh}$ 'nin büyük (özellikle bant genişliğinin ve  $V_{oc}$ 'nin büyük olduğu durumlarda) olması istenir.  $R_{sh}$  sonsuz olduğunda kısa devre fotoakımı en büyük değerini almaktadır. Açık devre gerilimi  $V_{oc}$ 'nin en büyük değerini alabilmesi içinse  $R_s$ 'nin sıfır olması gerekmektedir. Şekil 2.11'de bir güneş pilinin  $I$ - $V$  karakteristiği görülmektedir.

Burada  $I_{sc}=AJ_{sc}$  ( $A$  pilin etkin yüzey alanı) kısa devre foto akımı ve  $V_{oc}$  ise açık devre çıkış gerilimidir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{J_{sc}}{J_o} + 1 \right) \quad (2.12)$$



Şekil 2.11. Bir güneş pili için tipik  $I$ - $V$  karakteristiği

Güneş pilinden maksimum verim elde edebilmek için, pilin, maksimum güç noktasında çalıştırılması gerekmektedir. Çalışma noktasını belirleyen  $R_L$ 'nin maksimum güç noktasında seçilmesi ( $J_m, V_m$ ) en uygundur. Gücün maksimum olduğu noktayı belirlemek için, gücün birinci türevini sıfır yapan gerilim ve akım değerleri bulunur. Eş. 2.2'yi kullanarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$P = IV = I \left[ \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I + I_{sc}}{I_o} + 1 \right) - IR_s \right] \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial I} = 0, \quad I = I_m, \quad V = V_m \quad (2.14)$$

Fotovoltaik pilin verimi  $\eta$ , aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$\eta = \frac{J_m V_m}{P_i} \quad (2.15)$$

$P_i$  güneşten gelen güç yoğunluğudur.  $FF = J_m V_m / J_{sc} V_{oc}$  oranına doluluk veya düzeltme faktörü denilmektedir.

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_i} \quad (2.16)$$

Siyah-cisim, AM0 ve AM1 ışımaları için  $P_i$  değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı ışıma spektrumları için güneşten gelen ışıma miktarı

| İşıma Spektrumu | $P_i \text{ (mW/cm}^2\text{)}$ |
|-----------------|--------------------------------|
| Siyah-cisim     | 157,9                          |
| AM0             | 135,3                          |
| AM1             | 107,0                          |

#### 2.4.3. Güneş pilinde verimliliğe etki eden faktörler

M. Sarıtaş 1988'de sunduğu makalede, p-n eklem güneş pillerine etki eden faktörleri kapsamlı olarak incelemiştir [14]. Buna göre güneş pilinde verimin

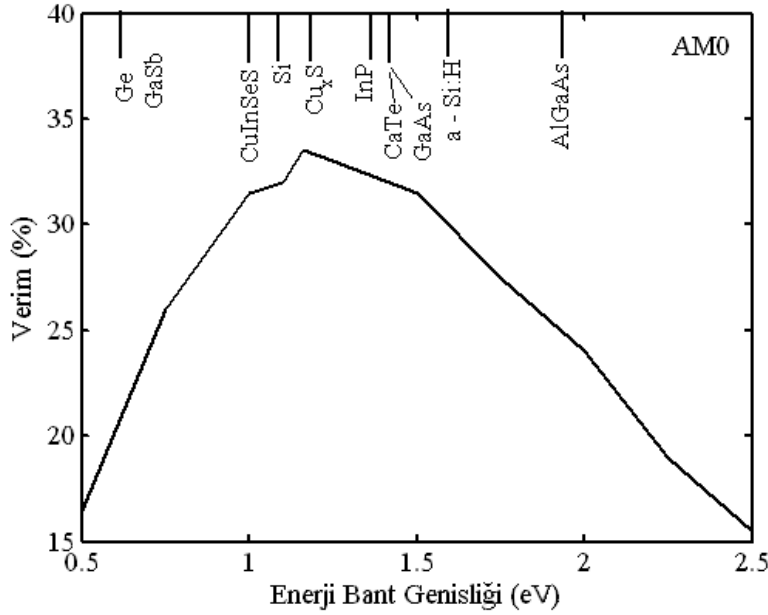
artırılabilmesi için foto akım ( $I_{sc}$ ) ve açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) mümkün olduğu kadar büyük, karanlık akımı da mümkün olduğu kadar küçük tutulmalıdır. Eş. 2.4-2.14'den görüldüğü gibi fotovoltaiik pil verimi pek çok parametreye aynı anda bağlıdır. Çizelge 2.2'de kısa devre fotoakımını ve karanlık akımını etkileyen faktörler sunulmuştur [14]. Bu etkenler fotovoltaiik pilin optimum tasarımında hesaba katılması gereken parametrelerdir. Bu parametrelerden bazılarını daha yakından inceleyelim:

Çizelge 2.2. Fotovoltaiik pilin kısa devre fotoakımına ve karanlık akımına etki eden faktörler [14]

| Fotovoltaiik pilin optimum tasarımına etki eden faktörler | Kısa devre foto akım | Karanlık akımı |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|----------------|
| Güneş spektrumu                                           | √                    |                |
| İletim verimliliği                                        | √                    |                |
| Sıcaklık                                                  | √                    | √              |
| Çıkış gerilimi                                            |                      | √              |
| Etkin ön yüzey alanı                                      | √                    |                |
| n, p tipi ve arıtılmış bölge kalınlıkları                 | √                    | √              |
| Soğurma katsayıları                                       | √                    | √              |
| n, p tipi ve arıtılmış bölgelerindeki ömür süreleri       | √                    | √              |
| Katkılama yoğunluğu ve değişimi                           | √                    | √              |
| Mobiliteler ve difüzyon katsayıları                       | √                    | √              |
| Yüzey rekombinasyonu                                      | √                    | √              |

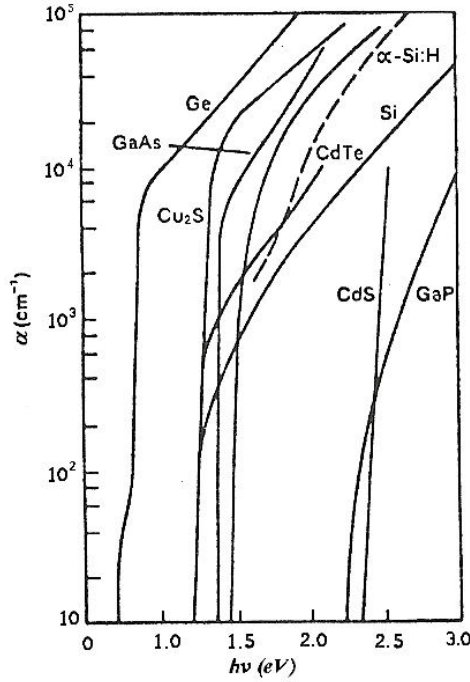
i) Enerji bant aralığı: Güneş spektrumu, fotovoltaiik pile gelen güç miktarını ve foton sayısını belirlediği için foto akıma etki eden temel faktörlerdendir. Fotovoltaiik pil tasarımında, güneş spektrumundan optimum soğurma sağlayabilecek enerji bant genişliğine ( $E_G$ ) sahip bir malzeme tercih edilmelidir. Eğer  $E_G$  çok büyük seçilirse küçük enerjili fotonlar soğurulamaz

ve foto akım düşer.  $E_G$  çok küçük seçildiği takdirde ise foto akım artar fakat çıkış gerilimi düşer. Şekil 2.12'de, AM0 ışıma spektrumu için fotovolttaik pil veriminin enerji bant genişliği ile değişimi verilmiştir [15]. Enerji bant genişliği 1-1.5 eV aralığında verim en yüksek değerine ulaşmaktadır.



Şekil 2.12. AM0 spektrumu için ideal Shockley diyodunun verim-Enerji bant genişliği değişimi [15]

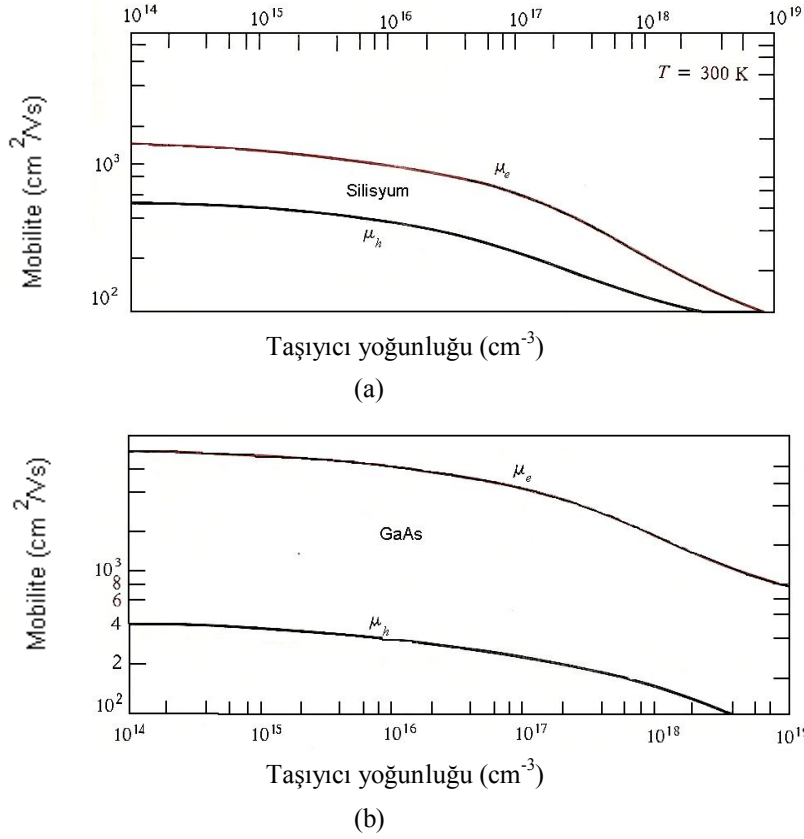
ii) Soğurma katsayıları ve güneş pili kalınlığı: Güneş pilinin kalınlığı soğurma katsayısının tersi ile orantılıdır. Soğurma katsayısı ne kadar küçükse, pil kalınlığı da o kadar büyük olmalıdır. Halbuki daha önce de bahsedildiği gibi, pil kalınlığı difüzyon uzunluğundan büyük olmamalıdır. Ayrıca pil kalınlığındaki artış ışımasız rekombinasyonu ve dolayısı ile de karanlık akımını arttırmaktadır. Buna karşılık pil kalınlığı yeterli olmadığı takdirde yeterli soğurma yapılamamaktadır. Şekil 2.13'de çeşitli yarı iletken malzemelere ait soğurma katsayılarının enerji ile değişimleri görülmektedir [16]. GaAs gibi direkt bant yapılı malzemelerde soğurma katsayısı enerji ile çok hızlı bir biçimde artarken, silisyum gibi indirekt bant yapılı malzemelerde bu artış biraz daha yavaştır.



Şekil 2.13. Çeşitli yarı iletken malzemelerde, soğurma katsayısının enerji ile değişimi [16]

iii) Taşıyıcı mobiliteleri, ömür süreleri, difüzyon uzunluğu ve katkı konsantrasyonu: Difüzyon uzunluğunun büyük olabilmesi için mobilitenin de büyük olması gerekmektedir. Şekil 2.14’de, GaAs ve silisyum için, elektron ve boşluk mobilitelerinin taşıyıcı konsantrasyonu ile değişimi görülmektedir [17]. GaAs malzemenin taşıyıcı mobiliteleri, silisyumun taşıyıcı mobilitelerinden daha büyüktür, ancak her ikisi de katkı konsantrasyonu ile de azalmaktadır. Açık devre geriliminin büyük olması katkı konsantrasyonunun fazla olmasına bağlıdır, ancak mobilitelerin ve difüzyon uzunluğunun çok azalmaması için bir optimizasyon yapılmalıdır. Ayrıca çok katkılı malzemelerde Auger rekombinasyonu meydana gelmektedir. Difüzyon uzunluğunu belirleyen diğer parametre ömür süresidir. Ömür süresinin büyük olması için malzeme içerisinde rekombinasyon merkezi gibi davranan safsızlıklar olmamalıdır.

iv) Sıcaklık: Güneş pili tasarımında dikkate alınan pek çok parametre sıcaklıkla değişmektedir. Bant genişliği ve mobilite sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Yapılan tasarımın sağlıklı olabilmesi için güneş pilinin çalışacağı sıcaklık aralığı da mutlaka dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.14. Si (a) ve GaAs (b) için elektron ve boşluk mobilitelerinin taşıyıcı konsantrasyonu ile değişimi [17]

#### 2.4.4. Fotovoltaik pillerin verimli kullanımı

Pratik uygulamalarda, üretilen güneş pili hücrelerinden daha büyük akım elde etmek için hücreler paralel, daha büyük gerilim elde etmek için seri bağlanarak güneş pili modülleri oluşturulmaktadır. Modül yapısı, akım ve gerilimi arttırmanın yanı sıra güneş pili hücrelerinin dış ortamdan korunmalarını da sağlamaktadır. Günümüzde, güneş enerji sistemlerinde gücü  $100 \text{ W}$ 'a kadar varan güneş panelleri kullanılmaktadır. Örneğin  $2000 \text{ W}$ 'lık bir sistem yaklaşık  $16 \text{ m}^2$  alan kaplamakta ve  $\text{€}10\ 000$ 'ya mal olmaktadır.

Güneş panellerinden optimum verim elde edebilmek için güneş ışığının en iyi şekilde toplanması gerekmektedir. Bunun için, güneş ışınlarının panel üzerine her zaman dik gelmesini sağlamak üzere, güneş ışınlarının hem

mevsimlere göre değişimini hem de doğu batı yönündeki değişimini takip eden, güneş takip sistemleri kullanılmaktadır [18].

Güneş pillerinden optimum verim sağlamanın diğer bir koşulu da pilin maksimum güç noktasında çalışmasıdır. Kurulu bir sistemin daima maksimum güç noktasında çalıştırılması için maksimum güç noktası takipçi (MPPT) devreleri kullanılmaktadır [19].

## 2.5. Fotovoltaik Pillerin Tarihçesi

Güneş ışığı, insanlığın her çağda kullandığı yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Antik çağlardan itibaren, pasif güneş teknolojileri, meskenlerin ısıtılması yada soğutulması ve suyun ısıtılması amacıyla kullanılmıştır. Renösansta güneş ışığı konsantrasyonu üzerinde geniş çalışmalar yapılmış olup, 19. yüzyılda ilk güneş ışığı tabanlı mekanik motorlar yapılmıştır [20]. 1839'da Becquerel'in fotovoltaik etkiyi bulması ve 1950lerde ilk fotovoltaik hücrenin icat edilmesi ile güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretiminde yeni bir çığır açılmıştır.

Fotovoltaik etki üzerine yapılan ilk yayın 1839'da Becquerel'in yaptığı çalışmadır [21]. Becquerel sıvı elektrolit içindeki metal elektrotları incelemiş ve iki durum gözlemlemiştir: i) İki elektrot arasındaki akım, ışık uygulandığında önemli ölçüde değişiyordu. ii) Ölçülen foto akım ışık kaynağının spektral içeriğine bağlıydı. Adams ve Day selenyum ve platin kontaklarla çalışarak 1877'de ilk defa katı malzemelerde fotovoltaik etkiyi rapor etmişlerdir [22]. Lange [23], Grondoh [24] ve Shottky [25] maksimum verimi %0,8 civarında olan fotovoltaik piller üzerinde yaptıkları incelemeleri sunmuşlardır.

Güneş pilleri; birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü nesil güneş pilleri olarak sınıflandırılabilir.

### 2.5.1. Birinci nesil güneş pilleri

Birinci nesil güneş pilleri, tek ya da poly kristal silisyum (Si) yonga yabanlı ve tek katmanlı p-n eklem diyodundan oluşmaktadır. Bu piller kararlıdır ve yüksek verimlilik sağlamaktadırlar. Ancak üretim maliyetleri fazladır. Güneş pili piyasasının yaklaşık %80'ini birinci nesil güneş pilleri oluşturmaktadır.

İlk Si güneş pili 1954'de Bell laboratuvarlarında Chapin tarafından geliştirilmiştir [26]. Başlangıçta %6 olan pil verimliliği kısa sürede %10'a çıkarılmıştır. Si güneş pili teknolojisi, öncelikle tranzistörler ve daha sonra da entegre devreler için geliştirilmiş olan yüksek standartlardaki Si teknolojisinden faydalanmaktadır. Tek kristal kullanılarak üretilen güneş pillerinde özellikle Czochralski (Cz) ve Floating zone (FZ) teknikleri kullanılmaktadır [27-28]. FZ tekniği ile elde edilen tek kristal oldukça kalitelidir ve bundan üretilen pilin verimi yüksektir. Ancak ticari amaçlı pillerde maliyeti daha düşük olduğu ve yüzey alanı daha büyük piller üretilebildiği için Cz Si tercih edilmektedir. Ancak, Cz Si, içinde bulunan safsızlıklardan dolayı azınlık taşıyıcıların ömür süreleri kısa olmaktadır. Hatta pil çalışırken mevcut taşıyıcıların ömür süreleri zamanla azalmaktadır. Bu durum pilin verimliliğinin de azalmasına sebep olmaktadır. Cz Si içindeki safsızlıkları azaltmak ve özellikle oksijen safsızlığına bağlı olarak ömür süresinin azalmasını engellemek için araştırmalar devam etmektedir. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada manyetik Cz (MCz) kullanılmış ve ömür süresinde iyileştirme sağlanarak pillerde %22,7'ye varan bir verim elde edilmiştir [29]. Ömür süresinin iyileştirilmesi ile ilgili bir diğer çalışmada p tipi Cz Si içine boron yerine galyum katkılanmış ve %24,5'lik verim sağlanmıştır [30]. Ancak Si içindeki galyumun ayrışma katsayısı büyük olduğu için kristal boyunca direnç değişimi yüksek olmuştur. Üretim maliyeti daha az olan polikristal Si kullanılarak üretilen güneş pillerinde verimliliğin düştüğü gözlenmiştir [31]. Polikristalde, tek kristal tane sınırları birer rekombinasyon merkezi gibi davranarak taşıyıcıların ömür sürelerini azaltmakta ve verimi düşürmektedir [32].

### 2.5.2. İkinci nesil güneş pilleri

İkinci nesil güneş pilleri, ince film teknolojisi kullanılarak üretilmektedir. Uzay ve kara uygulamalarında kullanılanlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Karada kullanılanlar; ince film Si, amorf Si, bakır indiyum diselenid ve kadmiyum tellür ve bileşikleri şeklinde sıralanmaktadır. Bu pillerin verimi birinci nesil güneş pilleri ile karşılaştırıldığında azdır. Ancak ikinci nesil güneş pilleri, üretim maliyetini ve kullanılan malzeme miktarını azaltmaktadır. Uzayda kullanılanlar ise GaAs ve bileşiklerinden elde edilmektedir.

i) İnce film Si güneş pilleri: İnce film teknolojisi, düşük kalitedeki bir alttaş üzerine çok ince bir (50  $\mu\text{m}$ ) Si tabakası geliştirilmesi mantığına dayanmaktadır. Güneş pilleri için daha ince yonga üretme fikrini ilk olarak Wolf ve Lofersky ortaya atmışlardır [33-34]. Film kalınlığı azaldıkça saturasyon akımının azaldığı ve dolayısıyla açık devre voltajının arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca bu avantajın geçerli olabilmesi için yüzey rekombinasyon hızının düşük olması gerektiğini ve iyi bir optik tutuculuk sağlanması gerektiğini vurgulamışlardır. Si katmanları arasında ışığın tuzaklanması hakkında ilk çalışmayı Goetzberger yapmıştır ve basit ama etkili bir yöntem olarak Lambertian arka yansıtıcısını önermiştir [35]. Bu temel çalışmaların ardından bir takım teknolojik problemler ortaya çıkmış ve bu problemleri aşarak ilk test pillerinin gerçekleştirilmesi 10 yıldan fazla zaman almıştır. Bu konudaki araştırmalar devam etmektedir. [36-37].

ii) Amorf Si güneş pilleri: Amorf silikonun (a-Si) güneş pili üretiminde kullanımına dair ilk yayınlar 1960'ların sonlarında ortaya çıkmıştır [38-39]. 1976'da bir fotovoltaik konferansında (12'inci IEEE PVSC) ilk makale sunulmuştur. Bundan sadece beş yıl sonra ilk ürünler piyasadaki yerini almıştır. a-Si tarihçesi yanlış değerlendirilen deney verileri ile doludur [40]. Günümüzde a-Si ticari uygulamalardaki yerini sabitlemiştir ve araştırmalar devam etmektedir [41].

iii) Bakır indiyum diselenid, kadmiyum tellur ve bileşenleri:  $\text{CuInSe}_2$  (CIS) tek kristali üzerine yapılan ilk çalışmadan elde edilen sonuçlar oldukça ümit vericiydi [42] ancak bu malzemenin karmaşıklığı ince film teknolojisine uygun görünmüyordu. Fakat Kazmerski'nin çalışması başarı göstermiştir [43]. 1980'lerin ortasında ARCO yeni bir üretim teknolojisi geliştirmiştir [44]. Daha sonraki çalışmalara Ga ve S nin eklenmesi verimliliği artırmıştır.

CdTe'ü temel alan ince film güneş pillerin öyküsü oldukça uzundur. RCA laboratuvarlarında n tipi CdTe' nin içine katılan indiyum ile elde edilen pn eklemının verimi %2,1 idi. Aynı zaman diliminde USSR'de CdTe güneş pilinde %4 verimlilik elde edilmişti. Cusano, p- $\text{Cu}_2\text{Te}$ /n-CdTe hetero-eklemi ile %6 verimliliğe ulaştı [45]. İlerleyen yıllarda CdTe ile üretilen on farklı tipte güneş pili geliştirildi [46-47]. Günümüzde verimliliği %16'ya varan piller gerçekleştirilmiştir[48].

iv) Uzay uygulamaları: 1970'de Zhores Alferov ve arkadaşları ilk yüksek verimli GaAs hetero eklem güneş pilini üretmişlerdir [49]. 1988'de AM0 altında %17 verimlilik sağlayan tek eklemli GaAs güneş pili, ASEC (Applied Solar Energy Corporation) tarafından geliştirilmiştir [50]. Daha sonra 1989'da GaAs buffer üzerine germenyumun hatalı katılanması daha yüksek çıkış voltajı sağlamıştır ve böylece iki eklemli yeni bir güneş pili ortaya çıkmıştır [51]. 1993'de ASEC ilk defa uzay uygulamalarında kullanılan ve verimi %20 civarında olan GaAs güneş pilini üretmiştir. Günümüzde bu pillerin verimi %30 civarındadır [52].

### 2.5.3. Üçüncü nesil güneş pilleri

Birinci ve ikinci nesil güneş pillerinin aksine üçüncü nesil güneş pilleri p-n eklem içermezler. Bu güneş pillerinin avantajı, daha ucuz malzemeler kullanarak yada fabrikasyon aşamasını basitleştirerek maliyetin azaltılması ve verimin artırılmasıdır. Organik, boya sentezli, kuantum kuyulu ve kuantum noktalı güneş pilleri üçüncü nesil güneş pillerindendir.

i) Organik güneş pilleri: Organik güneş pilleri moleküler ve polimer organik güneş pilleri olarak ikiye ayrılabilir [53]. Bileşik polimerler, boyalar veya organik camlar p ya da n tipi yarı iletken özelliği göstermektedirler. Bu malzemelerin oldukça büyük olan soğurma katsayıları güneş pilinin çok ince yapılmasını dolayısı ile de az malzeme kullanılmasını sağlamaktadır. Bu malzemelere olan ilgiyi artıran bir diğer önemli etken ise düşük sıcaklıklarda ve az maliyetle üretilebiliyor olmalarıdır. Plastik malzemeler kullanılarak ışık yayan filmler üretilebildiği düşünüldüğünde, bu malzemelerle verimli güneş pillerinin yapılabilceği yaklaşımlı oldukça gerçekçidir, çünkü gerçekleşecek olan bu işlemin tersidir. Bazı dezavantajlarına rağmen organik güneş pilleri umut vaat etmektedir. 1999'a kadar organik pillerin verimliliği ancak %1 civarındaydı [54]. Daha sonra iyot ve brom katkılı moleküler organik tek kristal pentacene kullanılarak verim, AM 1.5 için, %3,3'e çıkarılmıştır [55]. Yaklaşık aynı verim değerleri bileşik polimerler ve fullerine türevlerinden oluşan hetero eklemler ile de elde edilmiştir. Sonuç olarak organik pillerin pratikte kullanılabilir hale gelmesi için verimliliğinin artırılması, uzun dönem kararlılığının ve çevre etkenlerine tepkisinin araştırılması gerekmektedir.

ii) Boya sentezli Piller: Nano-kristal boya sentezli güneş pillerinin çalışması hızlı bir fotokimyasal işlem mekanizmasına dayanmaktadır. Geleneksel güneş pillerinden en önemli farkı, akımın katı yarı iletkenlerde olduğu gibi azınlık taşıyıcılar tarafından değil, çoğunluk taşıyıcılar tarafından taşınmasıdır. Bu sayede boya sentezli güneş pilinde ( $\text{TiO}_2$  kullanılan) malzeme ya da yüzey rekombinasyonu gerçekleşmemektedir. Maliyeti oldukça düşük olan bu güneş pillerinde verim %7 ile %11 arasında değişmektedir [56]. Taşıyıcı ömür sürelerinin küçük olması, verimin sıcaklık ve zaman ile değişmesi gibi problemler üzerinde ise çalışmalar devam etmektedir [57].

iii) Kuantum kuyulu güneş pilleri: Kuantum kuyusu, normal koşullarda üç boyutta hareket serbestliği olan elektron ya da boşlukları bir düzlem içerisine hapsederek, iki boyutlu hareket etmeye zorlayan bir potansiyel kuyusudur.

Kuantum kuyusu yeteri kadar ince yapıldığında taşıyıcılar sadece kesikli enerji seviyelerinde bulunabilmektedir. Kuantum kuyusu elde etmek için GaAs gibi bir malzeme daha büyük bir bant genişliğine sahip bir malzemenin (örneğin AlGaAs) arasına konulmaktadır. Kuantum kuyulu güneş pillerinde ışık soğuruculuğu artarken rekombinasyon hızı artmaktadır. Kuantum kuyulu güneş pillerinin teorik verimliliği %40 civarında iken ışık konsantrasyonu arttığında verim %50 civarında olmaktadır [58]. Pratikte ise ulaşılabilen verim değeri %20-25 aralığındadır [59]. Tandem kuantum kuyulu güneş pillerinde ise verimin yaklaşık %33 olduğu rapor edilmiştir [60].

#### **2.5.4. Dördüncü nesil güneş pilleri**

Güneş pillerindeki temel sınırlamalardan biri, kullanılan her malzemenin güneş spektrumunun sadece bir bölümünü soğurabilmesinden kaynaklanmaktadır. Güneşten gelen düşük enerjili fotonlar soğurulamazken, yüksek enerjili fotonlar soğurulduktan sonra oluşan taşıyıcıların enerjilerinin bir bölümü ısı olarak ortaya çıkmakta, fotovoltaiik elektrik üretimine katkıda bulunamamaktadır. Dördüncü nesil güneş pillerinde güneş spektrumunun tamamını soğurmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır [61]. Bu çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir [62].

i) Tandem Güneş Pilleri (Çoklu Eklem): Tandem güneş pilleri, farklı bant aralığına sahip malzemelerin üst üste konulması ile elde edilmektedir. Bant aralığı en büyük olan malzeme en üste, en küçük olan malzeme ise en alta yerleştirilmektedir. Tandem güneş pillerinde verimlilik %37'nin üzerindedir [63]. Bu pillerin en önemli dezavantajı, kristal yapıları birbirine uygun malzemelerin zor bulunmasıdır.

ii) Çoklu Spektrum Güneş Pilleri: Çoklu spektrum güneş pillerinin üretimi geleneksel güneş piline özel bir kılıf yapılarak gerçekleştirilmektedir [64-65]. Bu özel kılıf sayesinde yukarı ve aşağı enerji dönüşümü sağlanmaktadır. Gelen fotonun enerjisi, bant aralığından küçükse yukarı, büyükse aşağı enerji

dönüşümü gerçekleşmektedir. Teorik olarak verimlilik sınırı %85,4 olmasına rağmen daha gerçekçi yaklaşımlar yapıldığında verimlilik %50 olarak belirlenmektedir. Bu tür malzemelerin dezavantajı ise özel kılıfın maliyetinin çok yüksek olmasıdır.

iii) Çoklu Soğurma Güneş Pilleri: Geleneksel güneş pillerinde, bir foton ile sadece bir elektron-boşluk çifti üretilmektedir. Çoklu soğurma güneş pillerinde ise impact iyonizasyonu (Auger üretimi) ile, iki foton bir tek elektron-boşluk çifti üretmek üzere soğurulabilmektedir veya yüksek enerjili bir foton birden fazla elektron-boşluk çifti üretebilmektedir [66-67]. Bazı malzemeler için çok yüksek “impact ionization” seviyeleri ölçülmüştür, ancak bunun güneş pilinin verimliliğinde bir artış sağladığı henüz ispatlanamamıştır.

iv) Çoklu Sıcaklık Güneş Pilleri: Çoklu Sıcaklık pilleri enerjiyi pil içerisindeki sıcaklık değişimlerinden üretmektedirler. Sıcaklık değişimi, latis sıcaklığının veya taşıyıcı sıcaklığının değişimi olabilir. Sıcaklık değişimi sağlamak için bant yapısında değişimler oluşturulabilir [62].

v) Çoklu Enerji Seviyeli Güneş Pilleri (Ara Bant Yapılı Güneş Pilleri): Ara bant yapılı güneş pilleri (ABGP), güneş pili malzemesinin yasak bant aralığında bir veya daha fazla ara bant üretilmesi ile elde edilmektedir [68]. Böylece gelen fotonun enerjisi, bant aralığından küçük olsa da soğurma gerçekleştirilmekte ve foto akım artarken çıkış gerilimi azalmamaktadır. Optimum çalışma şartlarında, tek ara banda sahip bir ABGP’nin verimi %63,2 olarak rapor edilmiştir. Sonsuz sayıda ara bant bulunması durumunda ise %85’lik bir verim hesaplanmıştır [69]. Bu tez çalışmasında ABGP’ler detaylı olarak incelenecektir.

### 3. ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİ

Bu kısımda, Ara bant yapılı güneş pillerinin (ABGP) tarihçesi ve çalışması sunulduktan sonra ABGP'nin analizi için gerekli olan başlangıç denklemleri verilmiştir. ABGP'nin analizinde kullanılan detaylı denge modeli (DDM) ve kuasi sürüklenme difüzyon modeli (KSDM) için gerekli olan eşitlikler ise bu başlangıç denklemlerinden yola çıkılarak elde edilmiştir.

#### 3.1. ABGP Üzerinde Yapılan Çalışmalar

##### 3.1.1. ABGP'nin tarihçesi

Ara bant yapılı güneş pilinin (ABGP) yapısı ve ideal şartlardaki performansı, ilk olarak, 1997'de A. Luque tarafından sunulmuştur [68]. ABGP yapısında, baz bölgesinde kullanılan yarı iletken malzemenin yasak bant aralığına bir ara bant eklenmesi gerekmektedir. Bu ara bant sayesinde, malzemenin enerji bant aralığı ikiye bölünmekte ve daha az enerjiye sahip olan fotonlar da soğurulabilmektedir. Böylece, yeni bantlar sayesinde, ABGP'nin çıkış voltajında bir azalmaya sebep olmadan akım arttırılmaktadır. Literatürde tek ara bant yapılı ABGP için maksimum verimlilik, %63,2 olarak sunulmuştur [69]. Son zamanlarda ABGP üzerinde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [70]:

i) Ara bant yapılı malzemelerin tanıtılması ve özelliklerinin belirlenmesi: Direkt enerji bant yapılı ABGP'lerdeki hesaplamalar ile ABGP üretiminde kullanılabilecek malzemeler araştırılmış ve AB yapı gösteren pek çok malzeme tespit edilmiştir. Bunlar  $Ga_4X_3M$  bileşikleridir ve burada  $X=P$  veya  $As$  ve  $M$  ise bir geçiş metalidir [71-74].

ii) ABGP Çalışma Prensiplerinin Deneyisel Olarak Araştırılması: ABGP'nin temel çalışma prensiplerinin deneyisel olarak gözlenebilmesi için Kuantum noktası yaklaşımı tercih edilmiştir. Kuantum noktası, sıfır boyutlu sadece bir

tek elektron yada boşluk tutabilen bir yapıdır. ABGP malzemesinin içine kuantum noktalarının periyodik olarak yerleştirilmesi ile bir ara bant elde edilebilmektedir [75]. Bu teknoloji ile GaAs malzeme içine InAs kuantum noktaları yerleştirilerek,  $E_G=1,4 \text{ eV}$  ve ara bant fermi seviyesi  $E_{F1}=0,3 \text{ eV}$  olan bir ABGP üretilmiştir. Bu çalışma ile teorik olarak düşünüldüğü gibi ABGP'nin, baz bölgesinde denge dışı taşıyıcı istatistiği değişimini açıklayan, kuasi-Fermi seviyelerinde bir ayrılma olduğu, yani çıkış voltajı elde edildiği gösterilmiştir. Ancak seçilen  $E_G$  ve  $E_{F1}$  optimum değerlerden uzak olduğu için verimde bir artış sağlanamamıştır [76-79].

iii) ABGP Üretiminde Kullanılabilecek Metotlar: ABGP üzerine yürütülen çalışmaların büyük bölümünde, bu pilin pratikte nasıl üretilebileceği üzerinde durulmaktadır. Üç farklı yaklaşım geliştirilmiştir.

*Malzemenin AB ile direkt sentezi:* ABGP'yi pratikte üretmeye çalışırken karşılaşılan ilk soru, ara bandı yarı dolu olabilecek bir malzemenin var olup olmamasıdır. Bunu belirlemek için malzemelerin kristal yapıları incelenmiş ve  $\text{Ga}_4\text{As}_3\text{Ti}$  malzemesinin yarı dolu bir ara bant sergileyebileceği hesaplanmıştır [80]. Ancak bu malzemenin termodinamik olarak kararlı olup olmadığı ve nasıl bir sentezleme ile üretilebileceği belirsizdir.

*Oldukça ince bir soğurucu ile yüksek geçirgenlikte malzeme elde etme:* Konenkamp, Dloczik, Emst ve Olesch çok ince bir soğurucu malzeme kullanarak geçirgen, geniş bant aralıklı bir malzeme elde etmiştir [81]. Henüz üretim aşamasına geçilmemiştir. Fakat bu konuda başarılı deneyler yapılmıştır.

*Kuantum Noktalı (QD) ABGP:* ABGP üretiminde kuantum noktaların kullanılması fikri ilk olarak [82]'de ortaya atılmıştır. QD çok küçük boyutta bir hetero yapıdır. Küçük bir yarı iletken adacığı (genellikle 5-15 nm nokta malzemesi) ve onu çevreleyen daha büyük bant aralığına sahip yarı iletken (bariyer malzemesi) oluşmaktadır. İzole edilmiş bir QD hem

elektronlar hem de boşluklar için belirli enerji seviyeleri sağlayabilmektedir. Eğer iletkenlik bandı (CB) ve valans bandı (VB) arasına AB enerjisine sahip bir dizi QD yerleştirilirse ara bant elde edilebilmektedir. Kuantum noktalı ABGP, İspanya'da Institue de Energia Solar'da InAs kuantum noktaları kullanılarak üretilmiştir [77]. Hahn Meitne Enstitüsü'nde kuantum noktalarının üretimi için düşük maliyetli yaklaşımlar denenmektedir. Yüksek geçirgenlikli bir malzeme olan  $\text{TiO}_2$  içindeki nano kaviteler PbS ile doldurularak kuantum noktası üretilmektedir. Sonuçta elde edilen sistemin yaklaşık 3,2 eV'luk bir bant genişliğine ve 1,85eV'da bir ara banda sahip olacağı tahmin edilmektedir [83].

iv) ABGP Çalışma Prensiplerinin Daha İyi Anlaşılması İçin Yapılan Teorik Çalışmalar: ABGP'lerin termodinamik kararlılığı ve çalışma prensiplerinin teorik analizi yapılmaktadır [84-86], ABGP'lerde Auger üretimi (impact iyonizasyon)/rekombinasyonu etkisi [87]'de incelenmiş ve Auger üretiminin ABGP verimini arttırmadığı sonucuna varılmıştır. Buna karşılık [88-89]'de Auger üretiminin ABGP verimini yaklaşık %70'e çıkardığı gösterilmiştir. İdeal çalışma şartlarında [68], hesaba katılmayan soğurma katsayıları arasında örtüşme olması durumunun ABGP performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir[90-92].

### 3.1.2. Ara bant yapılı güneş pilinin çalışması

ABGP,  $n^+ - i - p^+$  şeklinde bir yapıya sahiptir (Bkz. Şekil 3.1). Burada sunulan güneş pili yapısında, ortadaki az katkılı katman baz tabakası olarak adlandırılmaktadır ve yasak bant aralığında bir ara banda sahiptir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bu baz tabakası iki emiter ( $n^+$  ve  $p^+$ ) arasına yerleştirilmiştir. Emiter tabakalarının dış yüzeylerine omik bağlantı sağlayabilmek için metalik kontaklar yapılmıştır. Emiter tabakaları, baz tabakasını metalik kontaklardan izole etmek için kullanılmaktadırlar ve çok incedirler. Pilin çalışmasında asıl önemli rol baz tabakasına aittir. Ara bant yapılı baz bölgesine gelen fotonlar; örtüşmesiz durumda, sahip oldukları

enerji seviyesine göre, VB, CB ve AB arasında üç farklı türde geçişe sebep olabilmektedirler:

- i)  $AB \rightarrow CB$ , fotonun enerjisi  $E_L < h\nu < E_H$  ise.
- ii)  $VB \rightarrow AB$ , fotonun enerjisi  $E_H < h\nu < E_G$  ise.
- iii)  $VB \rightarrow CB$ , fotonun enerjisi  $E_G < h\nu$  ise.

Yukarıdaki geçişlerden her üçünün de verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için, AB'nin yarı dolu şekilde olması gerekmektedir. Geleneksel güneş pillerinde, yukarıda sıralanan geçişlerden sadece üçüncüsü gerçekleşmektedir [93]. Yani sadece  $E_G$ 'den daha büyük enerjiye sahip fotonlar (iii) taşıyıcı üretebilmektedir. ABGP'lerde,  $h\nu < E_G$  olan fotonlar da AB üzerinden (i ve ii) elektron-boşluk çifti üreterek fotoakıma katkıda bulunmaktadır. Böylece çıkış voltajını düşürmeden fotoakımı artırmak mümkün olmaktadır.

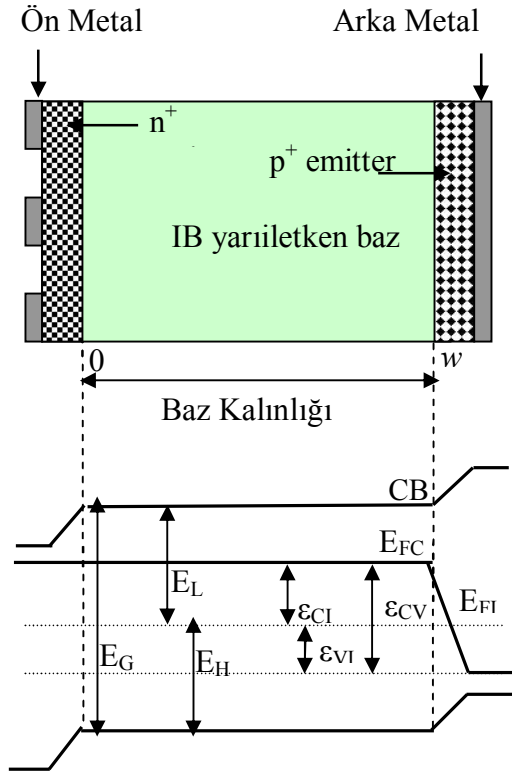
ABGP için, pil aydınlatılmadan önce, termal denge durumunda taşıyıcı konsantrasyonları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} n_{eq} &= N_C e^{\frac{-E_{CI}}{kT}} \\ p_{eq} &= N_V e^{\frac{-E_{VI}}{kT}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Burada,  $n_{eq}$  ve  $p_{eq}$  termal denge durumundaki serbest taşıyıcı konsantrasyonlarıdır.  $N_C$  ve  $N_V$ , sırasıyla valans bant ve iletkenlik bandındaki etkin enerji durum yoğunluklarıdır.  $k$ , Boltzman sabitidir ve  $T$ , pilin sıcaklığıdır. Pil aydınlatıldıktan sonra serbest taşıyıcı yoğunlukları aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$n = n_{eq} e^{\frac{\varepsilon_{CI}}{kT}}$$

$$p = p_{eq} e^{\frac{\varepsilon_{VI}}{kT}}$$
(3.2)

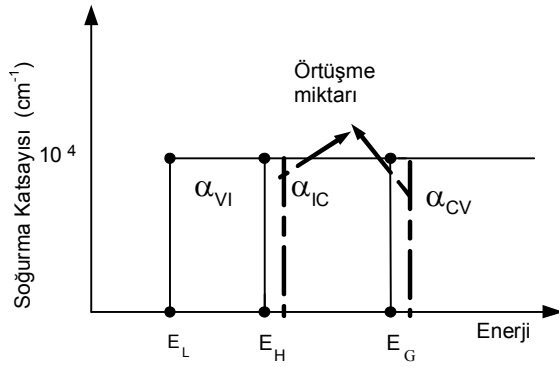


Şekil 3.1. ABGP yapısı ve ışık altındaki enerji bant diyagramı

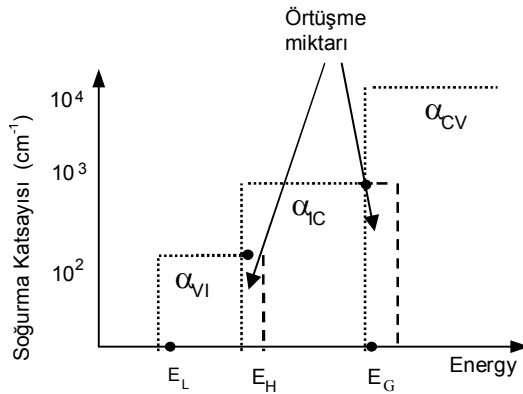
Burada,  $\varepsilon_{CI}$  ve  $\varepsilon_{IV}$  sırası ile, ışık altında, elektron ve boşlukların kuasi-Fermi seviyelerinin ayrılma miktarıdır. ABGP için çıkış voltajı  $\varepsilon_{CV} = \varepsilon_{CI} + \varepsilon_{IV}$  şeklinde ifade edilmektedir.

ABGP,  $\alpha_{VI}$ ,  $\alpha_{IC}$  ve  $\alpha_{CV}$  olmak üzere üç soğurma katsayısına sahiptir. Bu katsayılar, gelen bir fotonun yukarıda belirtilen üç farklı soğurulma ihtimalini belirlemektedir. İdeal modelde [68], soğurma katsayıları arasında örtüşme olmadığı varsayılmıştı. Bunun anlamı, ABGP yüzeyine gelen bir fotonun enerjisine göre, mümkün olan üç elektron geçişinden sadece birini

yapabilmesidir. Örneğin, fotonun enerjisi  $E_H < h\nu < E_G$  ise valans bandındaki bir elektronu ara banda çıkarabilir. Çünkü bu enerji aralığında sıfır olmayan tek soğurma katsayısı  $\alpha_{VI}$  'dır. Şekil 3.2.a ve b'de soğurma katsayıları arasında örtüşme olup olmamasına göre, soğurma katsayı oranları 1 ve 10 durumları için, soğurma katsayılarının enerji ile değişimleri sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3.2. Örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullarda soğurma katsayılarının enerji ile değişimi (a) soğurma katsayılarının oranı 1, (b) 10

Pratikte, soğurma katsayıları enerji ile sürekli bir şekilde değişmektedir. Ancak, hesaplamalarda kolaylık sağlayabilmek için, Şekil 3.2'de soğurma katsayılarının verilen enerji aralığında değişmedikleri kabul edilmiştir. Soğurma katsayıları arasındaki örtüşmenin etkileri Bölüm 4.1.1'de detaylı olarak incelenmiştir.

### 3.2. Matematiksel Modelleme İçin Başlangıç Denklemleri [68]

Önce, belirli bir enerji ve foton yönü (dalga vektörü) ile tanımlanan bir ışıma modu düşünelim. Burada  $\nu$ , bu moddaki foton sayısı,  $\zeta$  ise bu moddaki bir ışının yarı iletken giriş (  $\zeta = 0$ ) ile bazı yansımalarından sonra yarı iletken çıkışı arasındaki mesafe olsun [68].  $h_{Ci,Vj}=h_{Vj,Ci}$  iletkenlik bandındaki belirli bir durumdan  $Ci$ , valans bandındaki belirli bir duruma  $Vj$  geçiş matris elemanı ile orantılı katsayılar olsun. Benzer şekilde,  $h_{Ci,Ij}=h_{Ij,Ci}$  ve  $h_{Ii,Vj}=h_{Vj,Ii}$  ise sırası ile iletkenlik bandından ara banda ve ara banttan valans banda geçiş katsayılarını temsil etsin. Bu foton modunun her üç geçişe imkan sağlayacak kadar enerjiye sahip olduğunu varsayalım.

$f_{Vb}$ ,  $f_{Ii}$  ve  $f_{Ci}$  sırası ile valans bandındaki, ara banttaki ve iletkenlik bandındaki elektronlara ait Fermi-Dirac fonksiyonlarıdır. Kuantum mekanik harmonik osilatör özellikleri [94] hesaba katıldığında, ışın ilerledikçe o mod içindeki foton sayısının değişimi aşağıdaki gibi olmaktadır [68].

$$\begin{aligned} \frac{d\nu}{d\zeta} = & \frac{n}{c} \sum_{i,j} \left[ h_{Ci,Vj} (\nu + 1) f_{Ci} (1 - f_{Vj}) - h_{Vj,Ci} \nu f_{Vj} (1 - f_{Ci}) \right] \\ & + \frac{n}{c} \sum_{i,j} \left[ h_{Ci,Ij} (\nu + 1) f_{Ci} (1 - f_{Ij}) - h_{Ij,Ci} \nu f_{Ij} (1 - f_{Ci}) \right] \\ & + \frac{n}{c} \sum_{i,j} \left[ h_{Ii,Vj} (\nu + 1) f_{Ii} (1 - f_{Vj}) - h_{Vj,Ii} \nu f_{Vj} (1 - f_{Ii}) \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Yukarıdaki her satırda parantez içerisindeki ilk terimler uyarılmış ve doğal emisyon yolu ile foton oluşumunu temsil etmekte iken ikinci terimler fotonların soğurulmasını temsil etmektedir. Eş. 3.3 basitleştirilerek aşağıdaki eşitliğe indirgenmektedir.

$$\frac{d\nu}{d\zeta} = \alpha_{CV} (\nu_{CV} - \nu) + \alpha_{CI} (\nu_{CI} - \nu) + \alpha_{IV} (\nu_{IV} - \nu) \quad (3.4)$$

Burada,

$$\alpha_{CV} = \frac{n}{c} \sum_{i,j} h_{Ci,Vj} (f_{Ci} - f_{Vj})$$

$$\alpha_{CI} = \frac{n}{c} \sum_{i,j} h_{Ci,Ij} (f_{Ci} - f_{Ij}) \quad (3.5)$$

$$\alpha_{IV} = \frac{n}{c} \sum_{i,j} h_{Ii,Vj} (f_{Ii} - f_{Vj})$$

$$v_{CV} = \frac{I}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{CV}}{k_B T}\right) - 1} \quad \varepsilon_{CV} = E_{FC} - E_{FV} \quad (3.6.a)$$

$$v_{CI} = \frac{I}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{CI}}{k_B T}\right) - 1} \quad \varepsilon_{CI} = E_{FC} - E_{FI} \quad (3.6.b)$$

$$v_{IV} = \frac{I}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{IV}}{k_B T}\right) - 1} \quad \varepsilon_{IV} = E_{FI} - E_{FV} \quad (3.6.c)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{Ci} - \varepsilon_{Vj} = \varepsilon_{Ci} - \varepsilon_{Ij} = \varepsilon_{Ii} - \varepsilon_{Vj} \quad (3.6.d)$$

Eş. 3.4'ün çözümü aşağıdaki gibi bulunur.

$$v(\zeta) = \frac{\alpha_{CV} v_{CV} + \alpha_{CI} v_{CI} + \alpha_{IV} v_{IV}}{\alpha_{CV} + \alpha_{CI} + \alpha_{IV}} \times [1 - \exp(-(\alpha_{CV} + \alpha_{CI} + \alpha_{IV})\zeta)]$$

$$+ v(0) \exp(-(\alpha_{CV} + \alpha_{CI} + \alpha_{IV})\zeta) \quad (3.7)$$

Burada ilk terim, AB yarı iletken tarafından emisyon ile üretilen fotonları temsil etmektedir. İkinci terim ise dışarıdan soğurulan fotonları göstermektedir. Malzeme içerisinde belli bir mesafeden sonra dışarıdan

gelen fotonların soğurulması azalmakta ancak, emisyon ile fotonların üretimi devam etmektedir.

Yarı iletken malzemede fotonların soğurulması ve foton emisyonu, iletkenlik bandındaki (elektron) ve valans bandındaki (boşluk) serbest taşıyıcı konsantrasyonlarında değişikliğe sebep olmaktadır. Bu değişim iletkenlik bandı için şöyle formüle edilebilir [84].

$$\delta_n = \frac{2}{(2\pi)} \int [\alpha_{CV}(\nu - \nu_{CV}) + \alpha_{CI}(\nu - \nu_{CI})] \frac{c}{n_r} \delta_t \sin\theta k^2 dk d\phi d\theta \quad (3.8)$$

Burada, iletkenlik bandındaki elektron sayısını bulmak için; iletkenlik bandının, valans bandından ve ara banttan aldığı elektronlar (soğurma) ve valans banda ve ara banda verdiği elektronlar (emisyon) hesaba katılmıştır. İntegralin başındaki katsayı,  $k$  uzayındaki foton mod yoğunluğudur.  $c$  ışığın hızını,  $n_r$  AB yarı iletkenin kırılma indisini ve  $\delta_t$  küçük bir zaman aralığını temsil etmektedir. Integral,  $k$  uzayında alınmaktadır ve bu uzayın küresel koordinatlardaki hacim elementi,  $\sin\theta k^2 dk d\phi d\theta$  şeklinde ifade edilmektedir.

Bir fotonun sahip olduğu enerji aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.9)$$

Burada,  $\varepsilon$  fotonun enerjisini ve  $\lambda$  dalga boyunu temsil etmektedir.  $h$  ise Planck sabitidir.  $\lambda$  ve  $k$  arasında ise şöyle bir bağıntı vardır.

$$k = \frac{2\pi n_r}{\lambda} \quad (3.10)$$

Buradan, enerji ile  $k$  arasında, aşağıdaki bağıntı bulunur.

$$\varepsilon = \frac{hck}{2\pi n_r} \quad (3.11)$$

$$k = \frac{\varepsilon 2\pi n_r}{hc} \quad (3.12)$$

Eş. 3.11, Eş. 3.8'de yerine konulursa:

$$\frac{\delta_n}{\delta_t} = \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon, \Omega} [\alpha_{CV}(\nu - \nu_{CV}) + \alpha_{CI}(\nu - \nu_{CI})] \varepsilon^2 d\varepsilon d\Omega \quad (3.13.a)$$

Burada,

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (3.13.b)$$

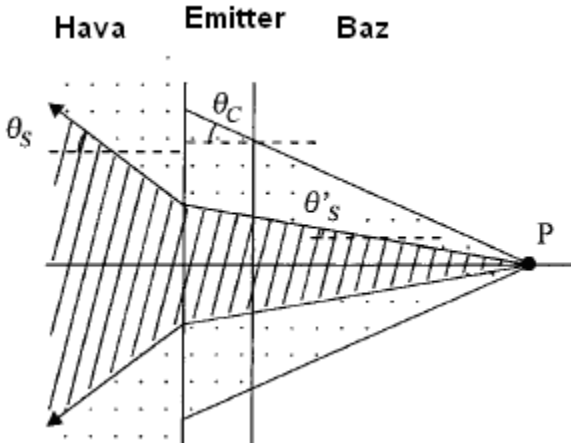
Eş. 3.13.a üzerinde bir düzenleme yapılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{\delta_n}{\delta_t} = \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon, \Omega} [-(\alpha_{CV}\nu_{CV} + \alpha_{CI}\nu_{CI}) + \nu(\alpha_{CV} + \alpha_{CI})] \varepsilon^2 d\varepsilon d\Omega \quad (3.14)$$

Şimdi Eş. 3.14'deki integralin sınırlarını belirlemeye çalışalım. Şekil 3.3'te, baz bölgesinde, herhangi bir P noktasında oluşan soğurma ve emisyon açıları gösterilmiştir. Eş. 3.14'de  $\nu_{CV}$  ve  $\nu_{CI}$  terimleri ışımalı foton emisyonuna karşılık gelmektedir. Bu fotonlar izotropik olarak yayıldıkları için açısal integraller tüm yönlerde alınmalıdır.  $\nu$  terimi ise foton soğurulmasına karşılık gelmektedir ve integral sınırları fotonların geliş açısına göre belirlenmelidir.

Yukarıdaki bütün modlar için foton sayısı Eş. 3.7 ile verilmiştir. Dışarıdan bir kaynaktan gelen ve  $\nu(0)$  kadar foton içererek AB yarı iletken yüzeyine ulaşan

modlar mevcuttur. Bu moddaki fotonlar yarı iletkene  $\theta_s$  gibi bir açıyla ulaşırlar ve kırılmanın ardından bu açı  $\theta'_s = \arcsin[\sin(\theta_s)/n_r]$  (Snell yasası) haline gelir. Harici bir kaynaktan gelen fotonlar için integral, Şekil 3.3'te taralı gösterilen alan için alınmalıdır.



Şekil 3.3. P noktasında foton soğurulması ve emisyonu için açılar verilmiştir. Dahili emisyonlar isotropik, harici emisyonlar  $\theta_c$  açısı ile sınırlı ve dışarıdan bir kaynaktan gelen fotonlar kırılmadan önce  $\theta_s$ , kırılmadan sonra  $\theta'_s$  açısı ile sınırlıdır [84]

Taralı alanın dışında kalan ancak  $\theta_c = \arcsin(1/n_r)$  ile belirtilen noktalı alana dahil olan modlar da vardır. Bunlar ortamın sıcaklığıyla oluşan termal fotonları temsil ederler. Bu fotonlar için Eş. 3.7'de,  $\nu(0)=0$  kabul edilmelidir ve integral noktalı alanı içerecek biçimde alınmalıdır.

Son olarak yarı iletkenin içinden geri yansıyıp gelen fotonlar (photon recycling) mevcuttur. Bunlar için integral, noktalı alan dışında her yönde alınmalıdır. Integral sınırlarını belirleyip Eş. 3.7'yi Eş. 3.14'de yerine koyarsak aşağıdaki denklemi elde ederiz [84].

$$\frac{\delta_n}{\delta_t} = \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int_{\text{isotropik}} \frac{[(\alpha_{CV} + \alpha_{CI}) \frac{\alpha_{CV} \nu_{CV} + \alpha_{CI} \nu_{CI} + \alpha_{VI} \nu_{VI}}{\alpha_{TOT}} - (\alpha_{CV} \nu_{CV} + \alpha_{CI} \nu_{CI})] \varepsilon^2 d\varepsilon d\Omega}{\alpha_{TOT}}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int_{\text{taralı aral}} [(\alpha_{CV} + \alpha_{CI}) \nu(\theta) \exp(-\frac{\alpha_{TOT} x}{\cos \theta})] \varepsilon^2 d\varepsilon d\Omega \\
& - \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int_{\text{noktalı nokt}n} [(\alpha_{CV} + \alpha_{CI}) \frac{\alpha_{CV} \nu_{CV} + \alpha_{CI} \nu_{CI} + \alpha_{VI} \nu_{VI}}{\alpha_{TOT}} \\
& \times \exp(-\frac{\alpha_{TOT} x}{\cos \theta})] \varepsilon^2 d\varepsilon d\Omega \\
& + \frac{\delta_n}{\delta_t} (\text{nonrad SHR}) + \frac{\delta_n}{\delta_t} (\text{Aug.gen/rec})
\end{aligned} \tag{3.15.a}$$

Burada,

$$\alpha_{TOT} = \alpha_{CV} + \alpha_{CI} + \alpha_{VI} \tag{3.15.b}$$

Eş. 3.15.a'da ilk integral dahili rekombinasyonu temsil etmektedir. Bu, bir enerji bandı çifti arasındaki elektron geçişinden ortaya çıkan fotonun, bir başka enerji band çifti tarafından soğurulması anlamına gelmektedir. Örneğin; iletkenlik bandından valans bandına bir elektron inmesi sonucu oluşan bir fotonun, valans banttan ara banda elektron geçişini sağlayacak şekilde soğurulması, dahili rekombinasyondur. Tek band aralığına sahip yarı iletkenlerde bu terim sıfırdır. Ara bant yapılı yarı iletkenlerde de, soğurma seçiciliği idealse, yani soğurma katsayıları arasında örtüşme yoksa, dahili rekombinasyon sıfır olmaktadır.

Eş. 3.15.a'daki ikinci integral, dışarıdan gelen fotonların soğurulmasını ifade etmektedir. Son integral ise ışımalı rekombinasyonu temsil etmektedir.

Son olarak ışımasız rekombinasyon, Auger üretimi ve rekombinasyonu terimleri de eşitliğe dahil edilmiştir. Bu terimler, Bölüm 3.3.4 ve 3.3.5'de detaylı olarak açıklanacaktır.

Valans bandındaki boşluk konsantrasyonunu bulmak için, yukarıda, iletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonunu hesaplarken kullanılan yol takip edilmelidir. Elektron ve boşluklar için akım yoğunlukları kullanılarak süreklilik denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\frac{\nabla J_e}{e} &= -\frac{\delta_e}{\delta_t} \\ \frac{\nabla J_h}{e} &= \frac{\delta_h}{\delta_t}\end{aligned}\tag{3.16}$$

Eş. 3.15.a, detaylı denge modeli ve kuasi sürüklenme-difüzyon modeli için başlangıç denkleminizdir. Her iki model için gerekli eşitlikler buradan yola çıkılarak elde edilecektir.

### 3.3. Detaylı Denge Modeli

Detaylı denge modeli türetilirken taşıyıcı mobilitelerinin sonsuz olduğu dolayısı ile de taşıyıcı konsantrasyonlarının AB bölgesi boyunca değişmediği varsayılmıştır. Bu varsayıma dayanan elektron ve boşluk akım yoğunlukları aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$J_e = J_{gen,e} - J_{rad,e} - J_{int,e} - J_{nonrad,e} + J_{Auggen,e} - J_{Augrec,e} + J_p(0) + J_n(w) \tag{3.17.a}$$

$$J_h = J_{gen,h} - J_{rad,h} - J_{int,h} - J_{nonrad,h} + J_{Auggen,h} - J_{Augrec,h} + J_p(0) + J_n(w) \tag{3.17.b}$$

Burada  $J_e$  ve  $J_h$  sırası ile elektron ve boşluk akım yoğunluklarıdır. Eşitliğin sağ tarafında bulunan  $J_{gen,e}$  ve  $J_{gen,h}$  terimleri ışıkla üretilen elektron ve boşluk foto akım yoğunluklarıdır. Işımalı rekombinasyon akım yoğunlukları  $J_{rad,e}$  ve  $J_{rad,h}$  ile, dahili rekombinasyon akım yoğunlukları ise  $J_{int,e}$  ve  $J_{int,h}$  terimleri ile ifade edilmişlerdir.  $J_{nonrad,e}$  ve  $J_{nonrad,h}$  terimleri, elektron ve boşluklara ait, ışımasız rekombinasyon akım yoğunluklarını temsil etmektedirler. Auger üretim/rekombinasyon akım yoğunlukları ise  $J_{Auggen/rec,e}$  ve  $J_{Auggen/rec,h}$  ile

belirtilmişlerdir. Bu terimler, Bölüm 3.3.1-3.3.5'de detaylı olarak açıklanacaktır.

### 3.3.1. Işık ile üretilen akım (fotoakım) yoğunlukları

Eş. 3.17.a ve b'deki  $J_{gen,e}$  ve  $J_{gen,h}$  terimleri ışık ile üretilen akım yoğunluklarını temsil etmektedirler. Ara bant yapılı güneş pili üzerine ışık düşmesi ve fotonların soğurulması ile serbest taşıyıcılar oluşmakta ve bu taşıyıcılar fotoakımı meydana getirmektedirler. Bu terimler aynı zamanda ABGP'nin kısa devre akım yoğunluğunu da belirlemektedirler. Elektron ve boşluk akım yoğunluğu terimlerinden hangisi daha küçükse, o değer ABGP'nin kısa devre akımını oluşturmaktadır. Bu sebeple ABGP tasarlanırken  $J_{gen,e}$  ve  $J_{gen,h}$  terimleri mümkün olduğu kadar birbirine yakın olacak şekilde ara bant enerji seviyesi seçilmelidir. Işık ile üretilen akım yoğunluğu ifadeleri Eş. 3.15.a'da ikinci integrelden aşağıdaki gibi türetilmişlerdir.

$$J_{gen,e} = e \int_{\varepsilon} M_e F_{abs} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad J_{gen,h} = e \int_{\varepsilon} M_h F_{abs} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.18)$$

Burada  $M_e$  ve  $M_h$  şöyle tanımlanmıştır:

$$M_e = \frac{\alpha_{CV} + \alpha_{IC}}{\alpha_{TOT}} \quad M_h = \frac{\alpha_{CV} + \alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \quad (3.19)$$

$F_{abs}$ , ABGP tarafından soğurulan spektral foton akısını temsil etmektedir.

$$F_{abs} = X \frac{2\pi}{h^3 c^2} (1 - \sin^2 \theta_s) (1 - \exp(-\alpha_{TOT} 2w)) v(0) \quad (3.20)$$

Burada  $X$  ışık konsantrasyonunu,  $\theta_s$  ise dünya ile güneş arasındaki açığı göstermektedir. Pilin ön yüzüne belirli bir enerji seviyesinde gelen foton sayısı  $v(0)$  için aşağıdaki eşitlik yazılabilmektedir.

$$\nu(0) = \frac{I}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_S}\right) - 1} \quad (3.21)$$

### 3.3.2. Işımalı rekombinasyon akım yoğunlukları

İletkenlik bandından valans banda, arabanttan valans banda ve iletkenlik bandından arabanda elektron geçişi ile foton açığa çıkmasına ışımalı rekombinasyon denmektedir. Eş. 3.17.a ve b'deki  $J_{rad,e}$  ve  $J_{rad,h}$  terimleri elektron ve boşluklara ait ışımalı rekombinasyon akım yoğunluklarını temsil etmektedirler ve Eş. 3.15.a'daki üçüncü integral kullanılarak türetilmişlerdir.

$$J_{rad,e} = e \int_{\varepsilon} M_e F_{emi} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad J_{rad,h} = e \int_{\varepsilon} M_h F_{emi} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.22.a)$$

Burada  $F_{emi}$ , ABGP'nin yaydığı spektral foton akı miktarıdır.

$$F_{emi} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} (1 - \exp(-\alpha_{TOT} 2w)) \left( \frac{A}{\alpha_{TOT}} \right) \quad (3.22.b)$$

Burada  $A$  şöyle verilmiştir.

$$A = \alpha_{CV} \nu_{CV} + \alpha_{IC} \nu_{IC} + \alpha_{VT} \nu_{VT} \quad (3.22.c)$$

### 3.3.3. Dahili rekombinasyon akım yoğunlukları

Eş. 3.17.a ve b' de  $J_{int,e}$  ve  $J_{int,h}$  terimleri soğurma katsayıları arasında örtüşme olmasından kaynaklanan dahili rekombinasyon akım yoğunluğunu temsil etmektedirler ve Eş. 3.15.a'daki ilk integralden aşağıdaki gibi türetilmişlerdir.

$$J_{int,e} = \frac{e\delta\pi}{h^3 c^2} w \left[ \frac{\alpha_{CV}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} (v_{CV} - v_{VI}) + \frac{\alpha_{IC}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} (v_{IC} - v_{VI}) \right] \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.23.a)$$

$$J_{int,h} = \frac{e\delta\pi}{h^3 c^2} w \left[ \frac{\alpha_{CV}\alpha_{IC}}{\alpha_{TOT}} (v_{CV} - v_{IC}) + \frac{\alpha_{IC}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} (v_{VI} - v_{IC}) \right] \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.23.b)$$

Dahili rekombinasyon terimleri, örtüşme olmaması durumunda sıfırlanmaktadır. Örtüşme olması durumunda ise, baz kalınlığı ile doğru orantılı olarak artan bir rekombinasyon akım yoğunluğu ortaya çıkmaktadır. Örtüşmenin etkisi Bölüm 4.1.1'de detaylı olarak incelenmiştir.

### 3.3.4. Işımasız rekombinasyon akım yoğunlukları

Elektronların iletkenlik bandından valans bandına, arabanttan valans bandına ve iletkenlik bandından arabanda geçişleri esnasında foton açığa çıkarmadan kaybolmasına ışımasız (nonradiative) rekombinasyon denmektedir. Işımasız rekombinasyon akım yoğunlukları Eş. 3.17.a ve b'de  $J_{nonrad,e}$  ve  $J_{nonrad,h}$  ile gösterilmiştir ve Eş. 3.15.a'daki  $\delta_n/\delta_t(nonrad)$  teriminden türetilmişlerdir.

$$\frac{\delta_n}{\delta_t}(nonrad) = -\frac{n - n_{eq}}{\tau_c} = -\frac{\Delta n}{\tau_c} \quad (3.24.a)$$

$$\frac{\delta_h}{\delta_t}(nonrad) = -\frac{p - p_{eq}}{\tau_v} = -\frac{\Delta p}{\tau_v} \quad (3.24.b)$$

Burada  $\tau_c$  ve  $\tau_v$ , sırası ile AB yapılı baz bölgesindeki elektronların ve boşlukların ömür süreleridir.  $n_{eq}$  ve  $p_{eq}$  termal denge durumundaki,  $n$  ve  $p$  ise ışık altındaki elektron ve boşluk konsantrasyonlarıdır. Işımasız rekombinasyon akım yoğunlukları ise şöyle bulunmuştur.

$$J_{nonrad,e} = e \frac{n_{eq} w}{\tau_c} \exp(\varepsilon_{CI} / k_B T_C) \quad (3.25.a)$$

$$J_{nonrad,h} = e \frac{P_{eq}^W}{\tau_V} \exp(\varepsilon_{IV} / k_B T_C) \quad (3.25.b)$$

### 3.3.5. Auger üretim ve rekombinasyon akım yoğunlukları

Işıkla üretilen sıcak elektronların impact iyonizasyon ile bantlar arasında elektron geçişi sağlamasına Auger üretimi denilmektedir. Yüksek enerjili fotonlar tarafından üretilen (Örneğin ara banttıan iletkenlik bandına çıkarılan) elektronlar, üzerlerindeki fazla enerjiyi diğır elektronlara vererek yeni taşıyıcıların oluşmasını sağlamaktadırlar. Eğer fotonun enerjisi  $E_G + E_L < h\nu < E_G + E_H$  aralığında ise, sıcak elektron fazlalık enerjisini yeni bir elektrona vererek valans bant ile ara bant arasında bir geçişe sebep olmaktadır. Fotonun enerjisi  $E_G + E_H < h\nu < 2E_G$  aralığında ise sıcak elektron fazlalık enerjisini ara bant ile iletkenlik bandı arasında geçiş sağlayacak şekilde yeni bir elektrona aktarmaktadır. Benzer bir mekanizma valans bant ve iletkenlik bandı arasında bir geçişle sonuçlanabilmektedir. Eş. 3.17.a ve b'de  $J_{Auggen,e}$  ve  $J_{Auggen,h}$  ile gösterilen terimler elektron ve boşluklar için Auger üretim akım yoğunluklarıdır ve aşağıdaki gibi türetilmişlerdir.

$$J_{Auggen,e} = e \sum_{i=1}^{m_{max}} \left[ \sigma^i \int \frac{\alpha_{CVA} + \alpha_{CIA}}{\alpha_{TOTA}} F_{abs} \varepsilon^2 d\varepsilon \right] \quad (3.26.a)$$

$$J_{Auggen,h} = e \sum_{i=1}^{m_{max}} \left[ \sigma^i \int \frac{\alpha_{CVA} + \alpha_{IVA}}{\alpha_{TOTA}} F_{abs} \varepsilon^2 d\varepsilon \right] \quad (3.26.b)$$

Burada  $\sigma$  çoğullama olasılığıdır ve bütün baz bölgesi boyunca 1 olduğu varsayılmıştır.  $m_{max}$  ise bir foton tarafından üretilen maksimum elektron sayısıdır. Eş. 3.17.a ve b'deki  $J_{Augrec,e}$  ve  $J_{Augrec,h}$  terimleri Auger üretiminin ters mekanizması olan ışımasız Auger rekombinasyon akım yoğunluklarıdır.

$$J_{Augrec,e} = e \sum_{m=1}^{+\infty} \int \frac{\alpha_{CVA} + \alpha_{CIA}}{\alpha_{TOT A}} \left( \sum_{i=1}^m \sigma^i \right) F_{emi} \left( v_{IC}^m + v_{CV}^m \right) \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.27.a)$$

$$J_{Augrec,h} = e \sum_{m=1}^{+\infty} \int \frac{\alpha_{CVA} + \alpha_{IVA}}{\alpha_{TOT A}} \left( \sum_{i=1}^m \sigma^i \right) F_{emi} \left( v_{VI}^m + v_{CV}^m \right) \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.27.b)$$

### 3.3.6. Detaylı denge modelinde verim hesabı

Arabant yapılı güneş pilinin  $J$ - $V$  karakteristiğini elde etmek için  $J_e$  ve  $J_h$  akım yoğunlukları birbirine eşitlenmektedir. Çıkış gerilimi,  $V$ , elektron ve boşlukların kuasi Fermi seviyelerinin ayrılma miktarlarının toplamı şeklinde olup aşağıda verilmiştir.

$$eV = \varepsilon_{IV} + \varepsilon_{CI} = \varepsilon_{CV} \quad (3.28)$$

Son olarak, ara bant yapılı güneş pilinin verimi,  $\eta$ , aşağıdaki eşitlikten bulunur.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_m V_m}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (3.29)$$

Burada  $J_m$  and  $V_m$  maksimum çalışma noktasındaki ( $P_m$ ), akım yoğunluğu ve çıkış voltajı değerleridir.  $P_{in}$  ise ara bant yapılı güneş pilinin ön yüzüne gelen güç yoğunluğudur.  $J_{sc}$ , ABGP'nin kısa devre akım yoğunluğu,  $V_{oc}$ , açık devre gerilimi ve  $FF$  ise doluluk faktörüdür.

### 3.4. Kuasi Sürüklenme-Difüzyon Modeli

#### 3.4.1. Süreklilik denkleminin taşıyıcı konsantrasyonu ile ilişkilendirilmesi

İletkenlik bandındaki elektronlar ve valans bandındaki boşluklar için süreklilik denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{\nabla J_e}{e} = & -g_e - g_{eh} + r_{rade,e} + r_{rade,eh} + r_{rade,h} \\ & + r_{int e,e} + r_{int e,h} + r_{int e,eh} - g_{e,th} - g_{eh,th} + u_{nr,e} \end{aligned} \quad (3.30.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\nabla J_h}{e} = & -g_h - g_{eh} + r_{radh,h} + r_{radh,eh} + r_{radh,e} \\ & + r_{int h,h} + r_{int h,e} + r_{int h,eh} - g_{h,th} - g_{eh,th} + u_{nr,h} \end{aligned} \quad (3.30.b)$$

Burada  $J_e$  iletkenlik bandında elektronların sağladığı elektron akım yoğunluğunu,  $J_h$  ise valans bandında boşlukların sağladığı boşluk akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Eş. 3.30.a ve 3.30.b'nin sağ tarafında taşıyıcı üretimi ve rekombinasyonunu içeren terimler Bölüm 3.4.2-3.4.5'de detaylı olarak açıklanacaktır.

#### 3.4.2. Taşıyıcı üretimi terimleri

$g_e$ ,  $g_h$  ve  $g_{eh}$  terimleri sırası ile ara banttan iletkenlik bandına, valans banttan ara banda ve valans banttan iletkenlik bandına elektron geçişi ile oluşan taşıyıcı üretim hızlarıdır.  $g_e$  ve  $g_{eh}$  terimlerini içermekte olan Eş. 3.15.a'daki ikinci integralde,  $d\Omega$  üzerinden integral alındığında, taşıyıcı üretim hızları için aşağıdaki ifadeler elde edilmektedir.

$$g_e(x) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \sin^2 \theta_s \int \alpha_{CI} \nu(0) \exp(-\alpha_{TOT} x) \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.31.a)$$

$$g_h(x) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \sin^2 \theta_s \int \alpha_{IV} \nu(0) \exp(-\alpha_{TOT} x) \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.31.b)$$

$$g_{eh}(x) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \sin^2 \theta_s \int \alpha_{CV} \nu(0) \exp(-\alpha_{TOT} x) \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.31.c)$$

Burada  $\theta_s$  dünya ile güneş arasındaki açıyı temsil etmektedir ve  $\sin^2(\theta_s) = 1/46050$  kabul edilmektedir.

Eş. 3.30.a ve 3.30.b'de,  $g_{e,th}$ ,  $g_{h,th}$  ve  $g_{eh,th}$  termal üretim hızlarını temsil etmektedir.

$$g_{e,th} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int \alpha_{CI} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right) - 1} \exp(-\alpha_{TOT} x) d\varepsilon \quad (3.32.a)$$

$$g_{h,th} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int \alpha_{VI} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right) - 1} \exp(-\alpha_{TOT} x) d\varepsilon \quad (3.32.b)$$

$$g_{eh,th} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int \alpha_{CV} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right) - 1} \exp(-\alpha_{TOT} x) d\varepsilon \quad (3.32.c)$$

Eş. 3.31.a-c, Eş. 3.32.a-c'ye benzemektedir. Ancak, taşıyıcı üretimi, malzeme içindeki ısıdan kaynaklandığı için sıcaklık  $T_s$  yerine  $T_C$  olarak değiştirilmiştir. Ayrıca açı ve ışık konsantrasyonu ifadeleri de ortadan kalkmıştır. Eş. 3.32.a-c'yi  $\alpha_{TOT}/\alpha_{TOT}$  ile çarparsak:

$$g_{e,the} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int \frac{\alpha_{CV}\alpha_{CI} + \alpha_{CI}^2}{\alpha_{TOT}} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right) - 1} \exp(-\alpha_{TOT} x) d\varepsilon \quad (3.33.a)$$

$$g_{eh,thh} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int \frac{\alpha_{CV}\alpha_{VI} + \alpha_{CI}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right) - 1} \exp(-\alpha_{TOT}x) d\varepsilon \quad (3.33.b)$$

$$g_{eh,theh} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int \frac{\alpha_{CV}^2 + \alpha_{CI}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right) - 1} \exp(-\alpha_{TOT}x) d\varepsilon \quad (3.33.c)$$

$$g_{h,the} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int \frac{\alpha_{CV}\alpha_{CI} + \alpha_{CI}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right) - 1} \exp(-\alpha_{TOT}x) d\varepsilon \quad (3.33.d)$$

$$g_{h,thh} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int \frac{\alpha_{CV}\alpha_{CI} + \alpha_{VI}^2}{\alpha_{TOT}} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right) - 1} \exp(-\alpha_{TOT}x) d\varepsilon \quad (3.33.e)$$

### 3.4.3. Işımalı rekombinasyon terimleri

Eş. 3.30.a ve 3.30.b'deki  $r_{rade,e}$ ,  $r_{rade,h}$ ,  $r_{rade,eh}$ ,  $r_{radh,e}$ ,  $r_{radh,h}$ , ve  $r_{radh,eh}$  terimleri, üç band arasındaki ışımalı rekombinasyon neticesi ortaya çıkan ifadelerdir ve Eş. 3.15.a'daki üçüncü integralden türetilmişlerdir.

$$r_{rade,e} = -\frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} \left( \frac{\alpha_{CV}\alpha_{CI} + \alpha_{CI}^2}{\alpha_{TOT}} \right) \exp[-\alpha_{TOT}x] v_{CI} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.34.a)$$

$$r_{rade,h} = -\frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} \left( \frac{\alpha_{CV}\alpha_{VI} + \alpha_{CI}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \right) \exp[-\alpha_{TOT}x] v_{IV} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.34.b)$$

$$r_{rade,eh} = -\frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} \left( \frac{\alpha_{CV}^2 + \alpha_{CI}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \right) \exp[-\alpha_{TOT}x] v_{CV} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.34.c)$$

Benzer eşitlikler  $r_{radh,e}$ ,  $r_{radh,h}$ , ve  $r_{radh,eh}$  için de yazılabilmektedir. Taşıyıcı konsantrasyonu ile bir bağıntı kurabilmek için Eş. 3.34.a-c'deki Bose Einstein katsayıları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$v_{CI} = \frac{I}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{CI}}{k_B T_C}\right) - 1} \cong \frac{\exp\left(\frac{\varepsilon_{CI}}{k_B T_C}\right)}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right)} \quad (3.35)$$

$v_{VI}$  ve  $v_{CV}$  için de aynı yaklaşım geçerlidir. Işık altında üretilen fazlalık taşıyıcı konsantrasyonları için aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır:

$$\Delta n = n_{eq} \left[ \exp\left(\frac{\varepsilon_{CI}}{k_B T_C}\right) - 1 \right] \quad (3.36.a)$$

$$\Delta p = p_{eq} \left[ \exp\left(\frac{\varepsilon_{VI}}{k_B T_C}\right) - 1 \right] \quad (3.36.b)$$

Bu durumda;

$$\exp\left(\frac{\varepsilon_{CI}}{k_B T_C}\right) = \frac{\Delta n}{n_{eq}} + 1 \quad (3.37.a)$$

$$\exp\left(\frac{\varepsilon_{VI}}{k_B T_C}\right) = \frac{\Delta p}{p_{eq}} + 1 \quad (3.37.b)$$

$$\exp\left(\frac{\varepsilon_{CV}}{k_B T_C}\right) = \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} + 1 \quad (3.37.c)$$

Eş. 3.37.a-c'yi ışımalı rekombinasyon ifadelerinde (Eş. 3.34.a-c) yerine koyup, termal üretim hızları ile farkını alarak aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir.

$$r_{rade,e} - g_{e,the} = rg1 \times \frac{\Delta n}{n_{eq}} \quad (3.38.a)$$

Burada,

$$rg1 = -\frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} \left( \frac{\alpha_{CV} \alpha_{CI} + \alpha_{CI}^2}{\alpha_{TOT}} \right) \exp(-\alpha_{TOT} x) \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right)} d\varepsilon \quad (3.38.b)$$

$$r_{rade,e} - g_{e,thh} = rg2 \times \frac{\Delta p}{p_{eq}} \quad (3.39.a)$$

Burada,

$$rg2 = -\frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} \left( \frac{\alpha_{CV} \alpha_{VI} + \alpha_{CI} \alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \right) \exp(-\alpha_{TOT} x) \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right)} d\varepsilon \quad (3.39.b)$$

$$r_{rade,e} - g_{eh,theh} = rg3 \times \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} \quad (3.40.a)$$

Burada,

$$rg3 = -\frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} \left( \frac{\alpha_{CV}^2 + \alpha_{CI} \alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \right) \exp(-\alpha_{TOT} x) \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right)} d\varepsilon \quad (3.40.b)$$

Benzer bir yol izlenerek  $r_{radh,e}-g_{h,the}$ ,  $r_{radh,h}-g_{h,thh}$ , ve  $r_{radh,eh}-g_{eh,theh}$  ifadeleri ve bu ifadeler için  $rg4$ ,  $rg5$  ve  $rg6$  eşitlikleri türetilabilmektedir.

$$r_{radh,e} - g_{h,the} = rg4 \times \frac{\Delta n}{n_{eq}} \quad (3.41.a)$$

$$r_{radh,h} - g_{h,thh} = rg5 \times \frac{\Delta p}{p_{eq}} \quad (3.41.b)$$

$$r_{radh,eh} - g_{eh,theh} = rg6 \times \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} \quad (3.41.c)$$

#### 3.4.4. Dahili ve Işımasız rekombinasyon terimleri

Eş. 3.30.a ve 3.30.b'deki  $r_{inte,e}$ ,  $r_{inte,h}$ ,  $r_{inte,eh}$ ,  $r_{inth,e}$ ,  $r_{inth,h}$  ve  $r_{inth,eh}$  ifadeleri soğurma katsayıları arasında örtüşme söz konusu olduğunda ortaya çıkan dahili rekombinasyonu temsil etmektedirler. Dahili rekombinasyon, üretilen bir fotonun üretildiği bandlar dışında bir elektron geçişine sebep olarak soğurulması neticesinde oluşmaktadır. Soğurma katsayıları arasında soğurmada seçicilik varsa, bir başka deyişle, örtüşme yoksa dahili rekombinasyon sıfır olmaktadır. Dahili rekombinasyonun etkileri Bölüm 4.1.1'de detaylı olarak irdelenmiştir. Eş. 3.15.a'daki birinci integral ve Eş. 3.37.a-c kullanılarak  $r_{inte,e}$ ,  $r_{inte,h}$ ,  $r_{inte,eh}$ ,  $r_{inth,e}$ ,  $r_{inth,h}$  ve  $r_{inth,eh}$  ifadeleri türetilmiştir.

$$r_{int e,e} = r_{int} I \frac{\Delta n}{n_{eq}} \quad (3.42.a)$$

Burada,

$$r_{int1} = -\frac{8\pi n_r^2}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} \frac{\alpha_{CI}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right)} d\varepsilon \quad (3.42.b)$$

$$r_{int e,h} = r_{int} 2 \frac{\Delta p}{p_{eq}} \quad (3.43.a)$$

Burada,

$$r_{int2} = \frac{8\pi n_r^2}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} \frac{\alpha_{CI}\alpha_{VI} + \alpha_{CV}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right)} d\varepsilon \quad (3.43.b)$$

$$r_{int e,eh} = r_{int} 3 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} \quad (3.44.a)$$

Burada,

$$r_{int3} = \frac{8\pi n_r^2}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon} \frac{\alpha_{CV}\alpha_{VI}}{\alpha_{TOT}} \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_C}\right)} d\varepsilon \quad (3.44.b)$$

$r_{inth,e}$ ,  $r_{inth,h}$  ve  $r_{inth,eh}$  için de Eş. 3.42-3.44'dekine benzer ifadeler türetilabilmektedir.

Eş. 3.30.a ve 3.30.b'deki  $u_{nre}$  ve  $u_{nrh}$  terimleri ışımasız rekombinasyonu temsil etmektedir. Işımasız rekombinasyon Eş. 3.15.a'da  $\delta_n/\delta_t(nonrad)$  ile gösterilmiştir ve Eş. 3.24'de ise fazlalık taşıyıcı konsantrasyonu ile bağıntısı verilmiştir.

$$u_{nre} = \frac{\delta_n}{\delta_t} (nonrad) = -\frac{n - n_{eq}}{\tau_c} = -\frac{\Delta n}{\tau_c} \quad (3.45.a)$$

$$u_{nrh} = \frac{\delta_h}{\delta_t} (nonrad) = -\frac{p - p_{eq}}{\tau_v} = -\frac{\Delta p}{\tau_v} \quad (3.45.b)$$

Işımalı, dahili ve ışımasız rekombinasyon için elde edilen denklemler, Eş. 3.30.a ve 3.30.b'deki akım yoğunluğu ifadelerinde yerine konulduğunda aşağıdaki denklem sistemi ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{aligned} \frac{\nabla J_e}{e} = & -g_e - g_{eh} + rg1 \frac{\Delta n}{n_{eq}} + rg2 \frac{\Delta p}{p_{eq}} + rg3 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} \\ & + r_{int}1 \frac{\Delta n}{n_{eq}} + r_{int}2 \frac{\Delta p}{p_{eq}} + r_{int}3 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} + \frac{\Delta n}{\tau_c} \end{aligned} \quad (3.46.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\nabla J_h}{e} = & -g_h - g_{eh} + rg4 \frac{\Delta n}{n_{eq}} + rg5 \frac{\Delta p}{p_{eq}} + rg6 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} \\ & + r_{int}4 \frac{\Delta n}{n_{eq}} + r_{int}5 \frac{\Delta p}{p_{eq}} + r_{int}6 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} + \frac{\Delta p}{\tau_v} \end{aligned} \quad (3.46.b)$$

### 3.4.5. Kuasi sürüklenme-difüzyon modeline geçiş

Normal p-n eklemlerde olduğu gibi ara bant yapılı güneş pillerinde de akımın sürüklenme ve difüzyon akımları olmak üzere iki bileşenden oluştuğu kabul edilmiştir. Sürüklenme akımı, elektrik alan etkisi altında hareket eden elektronların ve boşlukların ürettiği akım iken, difüzyon akımı elektronların ve boşlukların çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru hareketi ile üretilen akımdır. Aşağıda elektron ve boşluk akım yoğunlukları verilmiştir [85].

$$J_e = e\mu_e (n_{eq} + \Delta n)E + eD_e \frac{d\Delta n}{dx} \quad (3.47.a)$$

$$J_h = e\mu_h(p_{eq} + \Delta p)E - eD_h \frac{d\Delta p}{dx} \quad (3.47.b)$$

Burada  $\mu_e$  ve  $\mu_h$  elektron ve boşluklara ait taşıyıcı mobiliteleridir. Detaylı denge modeli çözümlerinde mobiliteler sonsuz kabul edilmiştir. Mobilitelerin etkisi Bölüm 4.2.2'de incelenmiştir.  $D_e$  ve  $D_h$  ise elektron ve boşluklara ait difüzyon katsayılarıdır. Mobiliteler ve difüzyon katsayıları arasında Einstein bağıntısı mevcuttur ( $D/\mu = kT/q$ ).  $E$  elektrik alanı temsil etmektedir. Elektrik alan için Poisson denklemi kullanılmaktadır.

$$\rho = \varepsilon_s \frac{dE}{dx} = e(-n_{eq} - \Delta n + p_{eq} + \Delta p - \Delta N_{De}) \quad (3.48)$$

Yukarıda  $\varepsilon_s$  yarı iletkenin dielektrik katsayısıdır.  $\Delta N_{De}$  ise ara banttaki elektron yoğunluğunda meydana gelen değişimdir. Pozitif ya da negatif olabilmektedir.

Akımın sadece  $x$  yönündeki değişimi hesaba katılarak, Eş. 3.47.a ve 3.47.b'yi, Eş. 3.46.a ve 3.46.b'de yerine konulduğunda, Poisson denklemi ile birlikte çözümlenmesi gereken ve üç eşitlikten oluşan nonlineer bir sistem elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} eD_e \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} + e\mu_e(n_{eq} + \Delta n) \frac{dE}{dx} + e\mu_e E \frac{d(n_{eq} + \Delta n)}{dx} - rg1 \frac{\Delta n}{n_{eq}} - rg2 \frac{\Delta p}{p_{eq}} - rg3 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} \\ - r_{int}1 \frac{\Delta n}{n_{eq}} - r_{int}2 \frac{\Delta p}{p_{eq}} - r_{int}3 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} - \frac{\Delta n}{\tau_c} = -g_e - g_{eh} \end{aligned} \quad (3.49.a)$$

$$\begin{aligned} eD_h \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} + e\mu_h(p_{eq} + \Delta p) \frac{dE}{dx} + e\mu_h E \frac{d(p_{eq} + \Delta p)}{dx} - rg4 \frac{\Delta n}{n_{eq}} - rg5 \frac{\Delta p}{p_{eq}} - rg6 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} \\ - r_{int}4 \frac{\Delta n}{n_{eq}} - r_{int}5 \frac{\Delta p}{p_{eq}} - r_{int}6 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} - \frac{\Delta p}{\tau_v} = -g_h - g_{eh} \end{aligned} \quad (3.49.b)$$

Elde edilen ikinci dereceden nonlinear türevsel denklem sistemi için sınır koşulları aşağıdaki gibidir.

$$\Delta n(w) = n_{eq} \left( \exp \left( \frac{\varepsilon_{CI}(w)}{k_B T_C} \right) - 1 \right) \quad (3.50.a)$$

$$D_e \frac{d\Delta n}{dx}(0) = -\frac{I}{e} J_{ep} \quad (3.50.b)$$

$$\Delta p(0) = p_{eq} \left( \exp \left( \frac{\varepsilon_{VI}(0)}{k_B T_C} \right) - 1 \right) \quad (3.50.c)$$

$$D_h \frac{d\Delta p}{dx}(w) = -\frac{I}{e} J_{hn} \quad (3.50.d)$$

Burada  $J_{ep}$  ve  $J_{hn}$ ,  $n^+$  ve  $p^+$  emitter bölgelerindeki azınlık taşıyıcı akımlarıdır. İdeal koşullarda emitterlerin çok ince olduğu, ışık soğurmadiğı ve dolayısı ile de akıma katkıda bulunmadığı varsayılmıştır.

Türetilen eşitlikler doğrusal olmayan bir denklem sistemidir ve analitik çözümü mümkün değildir. Bu tür doğrusal olmayan sistemlerin çözümü için geliştirilen pek çok nümerik metot mevcuttur. Sonlu elemanlar metodu, özellikle yarı iletkenlerde sıklıkla kullanılan bir metot olarak karşımıza çıkmaktadır [95]. Bu çalışmada, Eş. 3.48,3.49.a ve b, eşzamanlı olarak sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözülmüştür. Bölüm 3.4.6'da sonlu elemanlar metodu ve bu sisteme uygulanışı ile ilgili gerekli açıklamalar yapılmıştır.

### 3.4.6. Sonlu elemanlar metodu [96]

Bir sistem incelenirken, o sistem için matematiksel bir model geliştirilir. Bu model çoğunlukla, koşulları verilen türevsel denklemler içeren matematiksel

ifadelerden oluşur. Sistemin davranışını ifade eden bu türevsel denklemleri çözmek genellikle çok zordur. Mühendislik problemlerine yaklaşık çözüm getiren pek çok nümerik metot geliştirilmiştir. Sonlu Elemanlar, bu metotlar içerisinde önemli bir yer tutmaktadır [96]. Sonlu elemanlar metodunun en önemli avantajı, genel amaçlı yazılan bir bilgisayar programının çok sayıda problemin analizi için kullanılabilmesidir. Sonlu elemanlar metodu, problem alanının pek çok alt parçaya bölünmesini gerektirir. Her alt parçaya sonlu eleman denir.

*Ağırlıklı Kalan (Weighted Residual) Metotları:* Ağırlıklı kalan metodu, türevsel denklem çözümünde kullanılan bir yaklaşımdır. Bu metot uygulanırken, türevsel denklemin çözümü olarak, bilinmeyen katsayıları olan bir deneme fonksiyonu seçilir. Bu fonksiyon denklemin sınır koşullarını sağlamalıdır. Deneme fonksiyonu seçildikten sonra türevsel denklemde yerine konularak kalan ( $R$ ) hesaplanır. Sonraki adımda bilinmeyen katsayıları bulmak için tam sonuca en iyi yaklaşım sağlayan bir test fonksiyonu ( $w$ ) belirlenir. Bu fonksiyon aşağıdaki eşitliği sağlamalıdır.

$$I = \int_0^L wR dx = 0 \quad (3.51)$$

*Zayıf Formülasyon (Weak Formulation):* Çözümü istenen türevsel denklem, ikinci dereceden olursa, Eş. 3.51'deki integralin sağlanabilmesi için seçilen test fonksiyonunun birinci ve ikinci türevlerinin sıfıra gitmemesi gerekmektedir. Test fonksiyonu seçiminde bu sınırlamayı kaldırmak için integral parçalanarak zayıf formülasyon haline getirilir. Bunu bir örnekle açıklamak için aşağıdaki problemi ele alalım:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u}{dx^2} - u = -x, 0 < x < 1 \\ u(0) = 0, u(1) = 0 \end{cases} \quad (3.52)$$

Denklem için seçilen deneme fonksiyonu  $\tilde{u}$  olsun. Eş. 3.52'yi örneğimize uygularsak:

$$I = \int_0^l w \left( \frac{d^2 \tilde{u}}{dx^2} - \tilde{u} + x \right) dx = 0 \quad (3.53)$$

Burada,  $w$  test fonksiyonudur ve yukarıda belirtildiği gibi, birinci ve ikinci dereceden türevlerinin sıfır olmaması gerekmektedir. Zayıf formülasyon kullandığımızda Eş. 3.53 aşağıdaki gibi olur.

$$I = \int_0^l \left( -\frac{dw}{dx} \frac{d\tilde{u}}{dx} - w\tilde{u} - x \right) dx + \left[ w \frac{d\tilde{u}}{dx} \right]_0^l = 0 \quad (3.54)$$

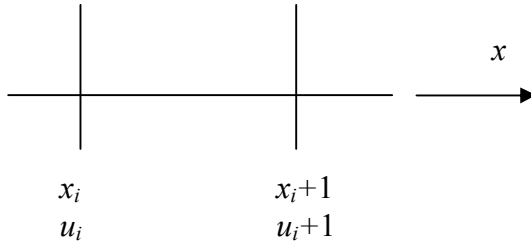
Eşitliğin en sonundaki ifade sınır koşullarını temsil etmektedir. Zayıf formülasyon özellikle aynı deneme ve test fonksiyonlarının seçildiği yaklaşımlarda avantaj sağlamaktadır.

**Galerkin Sonlu Elemanlar Formülü:** Bir problem alanını küçük parçalara ayırıp, her parça için bir deneme fonksiyonu kullanılırsa; kompleks bir problemi, basit, doğrusal fonksiyonların toplamı gibi ifade edebiliriz. Problemin her bir alt parçasına deneme fonksiyonu seçerken, sistematik bir formülasyon sağlamak amacıyla, fonksiyonlar, noktalardaki değişkenler cinsinden ifade edilmektedir.

Şekil 3.4'deki problem alt parçasını ya da sonlu elemanı düşünelim. Elemanın iki ucunda birer nokta bulunmaktadır. Şekilde, her iki noktanın koordinatları ( $x_i$  ve  $x_{i+1}$ ) ve noktasal değişkenleri ( $u_i$  ve  $u_{i+1}$ ) işaretlenmiştir.

Seçilen deneme fonksiyonumuz aşağıdaki gibi olsun:

$$u = c_1 x + c_2 \quad (3.55)$$



Şekil 3.4. iki noktalı sonlu eleman

Problemi noktasal değişkenler cinsinden yazmak istersek,  $c_1$  ve  $c_2$  katsayıları yerine  $u_i$  ve  $u_{i+1}$  değişkenlerinin gelmesi gerekmektedir.  $x=x_i$  ve  $x=x_{i+1}$  noktalarında fonksiyonu yazarsak:

$$\begin{aligned} u(x_i) &= c_1 x_i + c_2 = u_i \\ u(x_{i+1}) &= c_1 x_{i+1} + c_2 = u_{i+1} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Eş. 3.56'daki iki denklemi eş zamanlı olarak çözersek aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$u = H_1(x)u_i + H_2(x)u_{i+1} \quad (3.57)$$

Burada:

$$H_1(x) = \frac{x_{i+1} - x}{h_i} \quad (3.58.a)$$

$$H_2 = \frac{x - x_i}{h_i} \quad (3.58.b)$$

$$h_i = x_{i+1} - x_i \quad (3.58.c)$$

Alt parçalara ayrılan bir sistemin her parçasına yukarıda verilen doğrusal ve yaklaşık çözüm uygulanır; tam çözüm bunların toplamı şeklinde bulunur.

Galerkin Formülü, sonlu elemanlar metodunda çok sıklıkla kullanılan bir yaklaşımdır. Bu tez çalışmasında Eş. 3.48, 3.49.a ve b sistemi sonlu elemanlar metodu, Galerkin formülü kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.2’de detaylı olarak sunulmuştur.

#### 4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bölüm 3’de, tek ara banda sahip ara bant yapılı güneş pillerinin (ABGP) teorik analizi için detaylı denge modeli (DDM) ve kuasi sürüklenme difüzyon modeli (KSDM) olmak üzere iki model geliştirilmiştir. Bu kısımda, her iki model kullanılarak ABGP yapısı incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Detaylı denge modelinde analizler, örtüşmenin ve Auger mekanizmasının ABGP performansı üzerindeki etkileri olmak üzere iki ana başlık altında yapılmıştır. Örtüşmenin sırasıyla; verim, optimum ara bant enerji seviyesi, bant genişliği, optimum baz genişliği, kısa devre akım yoğunluğu-çıkış gerilimi eğrisi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Auger mekanizması sisteme dahil edilerek, önerilen dört farklı ABGP modeli üzerinde hesaplamalar yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca, KSDM kullanılarak, DDM ile etkileri incelenemeyen, taşıyıcı mobilitelerinin, DOT’un ( $\Delta n x \Delta p$ ) ve elektrik alanın ABGP’nin verimi üzerindeki etkileri de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

##### 4.1. Detaylı Denge Modeli İle Elde Edilen Sonuçlar [92]

Detaylı denge modeli üzerinde yapılan incelemelerde aşağıdaki varsayımlar yapılarak termal verimlilik sınırı elde edilmiştir [68]:

- i) Her üç banda ait üç kuasi-Fermi seviyeleri AB baz bölgesi boyunca ( $x$  yönünde) sabittir. Bir başka deyişle taşıyıcı konsantrasyonları  $x$  ile değişmemektedir.
- ii) Ara banttan akım çıkışı yoktur.
- iii) Baz bölgesinin kalınlığı tam soğurmayı sağlayacak kadar büyüktür.
- iv) Aksi belirtilmedikçe maksimum ışık konsantrasyonu altında çalışılmıştır.

#### 4.1.1. Örtüşmenin ara bant yapılı güneş pili üzerindeki etkileri

Bölüm 3.1.2’de anlatıldığı gibi, ABGP, bant genişliği ve alt bantlara bağlı olarak üç soğurma katsayısı sergilemektedir [68]. Bu katsayılar, her üretim prosesi için fotonun soğurulma ihtimalini belirlemektedir. Örtüşmesiz koşulda, verilen bir foton enerji seviyesi için soğurma katsayılarından sadece bir tanesinin değeri vardır. Diğerleri sıfırdır. Örtüşme olması durumunda ise aynı enerji seviyesi için birden fazla soğurma katsayısı değer alabilmektedir (Bkz Şekil 3.2)

Çalışmanın bu bölümünde,  $\gamma = \alpha_{CV}/\alpha_{IC} = \alpha_{IC}/\alpha_{VI}$  tanımlanmış,  $\gamma=1$  ve 10 durumlarında,  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV için, örtüşmenin ara bant yapılı güneş pili performansı üzerindeki etkileri, Auger mekanizması sisteme dahil edilmeden araştırılmıştır. Bu model için Eş. 3.17.a ve b esas alınmıştır. Hesaplamalarda emitter terimleri,  $J_p(0)$  and  $J_n(w)$  ihmal edilmiştir. Işımasız rekombinasyon akım yoğunluğu terimleri,  $J_{nonrad,e}$  and  $J_{nonrad,h}$  ise sadece Bölüm 4.1.2’de hesaba katılmıştır. Örtüşmesiz koşul altında,  $\gamma=1$  durumunda,  $M_e$  veya  $M_h$  veya her ikisi birden bire eşit olduğu için, dahili rekombinasyon terimleri,  $J_{int,e}$  ve  $J_{int,h}$  sıfır olmaktadır ve Eş. 3.17.a ve b aşağıdaki duruma indirgenmektedir.

$$J_e = J_{gen,e} - J_{rad,e} \quad (4.1.a)$$

$$J_h = J_{gen,h} - J_{rad,h} \quad (4.1.b)$$

Örtüşme meydana geldiğinde,  $M_e$  veya  $M_h$  birden küçüktür ve dahili rekombinasyon sıfırdan farklıdır. Bu durumda akım yoğunluğu ifadeleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$J_e = J_{gen,e} - J_{rad,e} - J_{int,e} \quad (4.2.a)$$

$$J_h = J_{gen,h} - J_{rad,h} - J_{int,h} \quad (4.2.b)$$

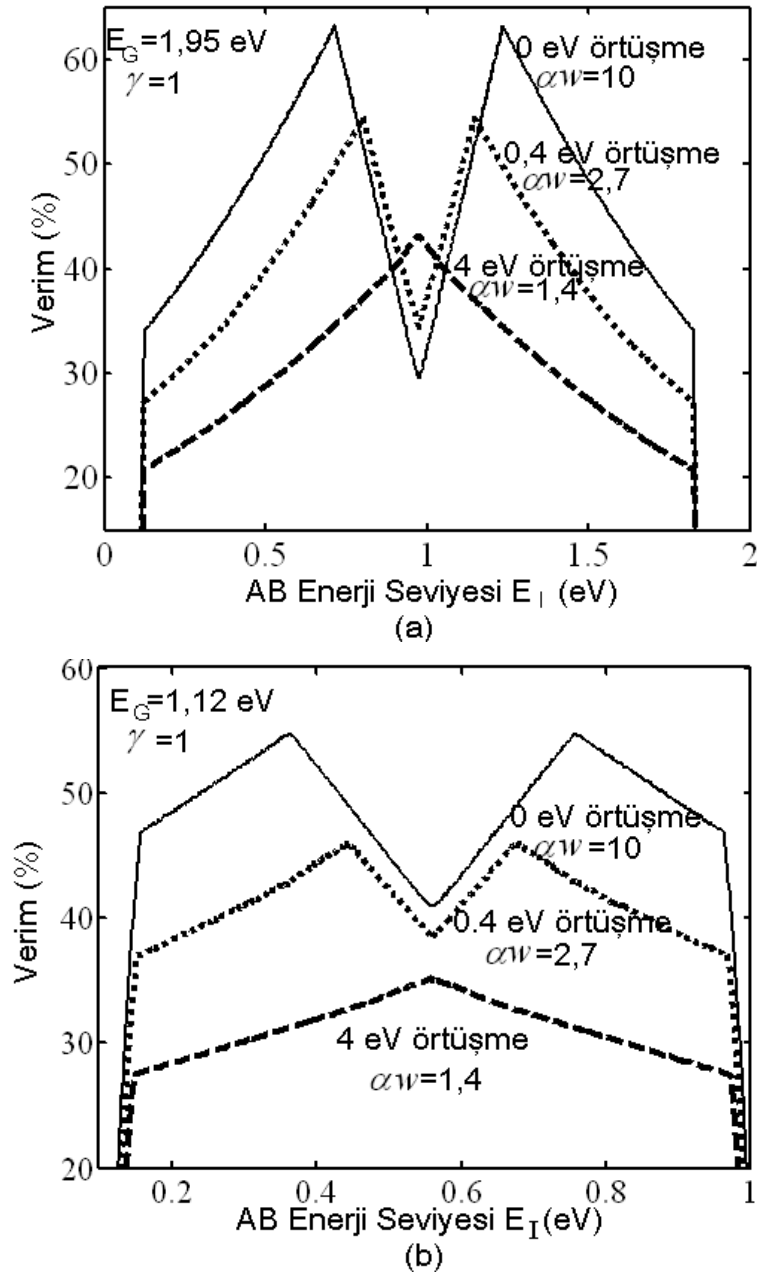
Çalışmanın bu kısmında, tam konsantrasyon durumunda ( $X=46\ 000$ ), 6000 K'lık bir termal kaynaktan gelen güneş ışığı altında, güneş pili sıcaklığı 300 K iken, ara bant yapılı güneş pilinin verim sınırı hesaplanmıştır. Aksi belirtilmediği sürece soğurma katsayıları birbirine eşit kabul edilmiştir ve  $E_G=1,12$  eV [97] için  $10^3$  ve  $E_G=1,95$  eV için  $10^4$  cm<sup>-1</sup> olarak kullanılmıştır. Baz bölgesinin kalınlığı, soğurma katsayısı ile baz kalınlığı çarpımı ifadesinden elde edilmiştir ( $\alpha w$ ). Örtüşmesiz koşul için  $\alpha w \geq 5$  şartını sağlayacak şekilde seçilirken; örtüşmeli koşulda, optimum  $\alpha w$  değeri, tercih edilmiştir. Her örtüşme koşulu için belirlenen optimum  $\alpha w$  değeri ilgili şekiller üzerinde belirtilmiştir.

#### Örtüşmenin, ABGP verimi ve AB seviyesi üzerindeki etkileri

Bu bölümde, soğurma katsayıları arasında örtüşme olması ve olmaması durumlarında, verimin ara bant enerji seviyesi ile değişimi, iki farklı bant genişliğine sahip ara bant yapılı güneş pili için, maksimum konsantrasyon altında incelenmiştir. Bu bant genişlikleri; ara bant yapılı güneş pillerinde %63,2 ile maksimum verimi sağlayan 1,95 eV [68] ve diğeri de güneş pil yapımında en çok kullanılan yarı iletken silisyumun bant genişliği olan 1,12 eV'dur.

Verim-AB seviyesi eğrileri, "M" şeklinde,  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV için, örtüşme olması ve olmaması koşulları altında ve  $\gamma=1$  durumunda Şekil 4.1.a ve 4.1.b'deki gibi elde edilmiştir [92]. Şekil 4.1.a ve 4.1.b'de, Eş. 4.1.a ve b kullanılarak elde edilen, örtüşmesiz koşul altındaki eğriler bant genişliğinin üçte birinde ve üçte ikisinde olmak üzere iki tepe noktasına sahiptir [92]. Buradan, AB bant genişliğinin üçte birinde veya üçte ikisinde yer aldığı,  $J_{gen,e}$  ve  $J_{gen,h}$ 'nin hemen hemen birbirine eşit olduğu anlaşılmaktadır.  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV için maksimum verim, sırası ile %63,2 ve %54,8 olarak bulunmuştur [92]. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, soğurma katsayıları arasındaki örtüşme miktarı 0 eV'dan 4 eV'a çıktığında etkin  $\alpha w$  değeri 10'dan 1,4'e düşmektedir (Bkz. Bölüm 4.1.1). Verimin iki tepe değeri ise bant genişliğinin

ortasına doğru yaklaşmakta ve maksimum örtüşme altında tek bir AB seviyesine indirgenmektedir. Örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullar altında verimin tepe değerleri ve bu değerlerin sağlandığı optimum AB seviyeleri Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.



Şekil 4.1.  $\gamma=1$  durumunda,  $E_G = 1.95$  eV (a) ve  $E_G = 1.12$  eV (b) için örtüşmesiz koşul (0 eV sürekli çizgi), 0,4 eV (noktalı çizgi) ve 4 eV (kesikli çizgi) örtüşme koşul altında verimin AB seviyesi ile değişimi

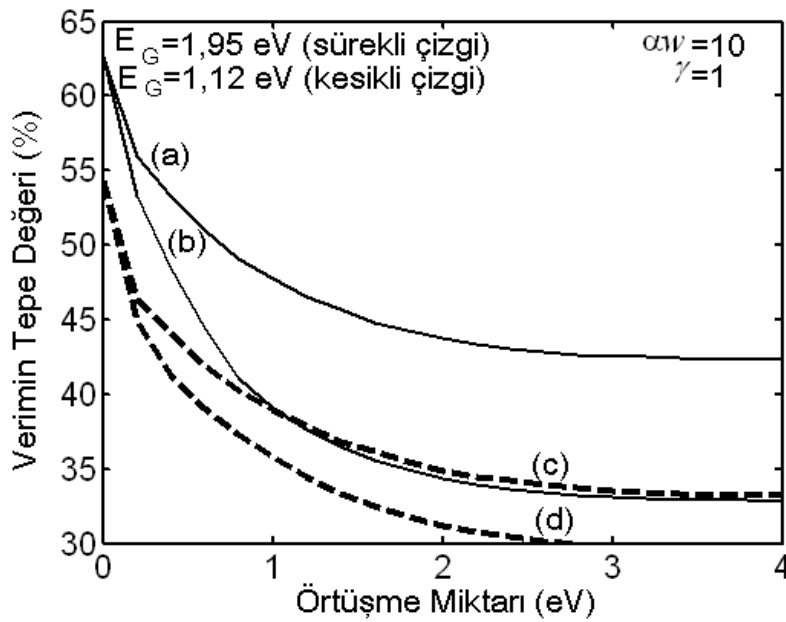
Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi, soğurma katsayıları arasındaki örtüşme miktarı, sadece verimi düşürmekle kalmamakta, aynı zamanda, optimum AB seviyesinin pozisyonunu da değiştirmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi ABGP'nin kısa devre akım yoğunluğu,  $J_{gen,e}$  ve  $J_{gen,h}$ 'den küçük olanı ile belirlenmektedir. Örtüşme meydana geldiğinde  $J_{gen,e}$  ve  $J_{gen,h}$ , AB seviyesinin bant genişliğinin üçte birinde olması durumunda artık birbirine eşit olmamaktadır. Çünkü örtüşme boşluk üretim hızını artırırken elektron üretim hızını düşürmektedir (Eş. 3.18-20). Sonuç olarak, optimum AB seviyesi,  $J_{gen,e}$  ve  $J_{gen,h}$ 'yi eşitlemek için bant genişliğinin ortasına doğru kaymaktadır.

Çizelge 4.1.  $\gamma=1$  durumunda, örtüşmesiz ve örtüşmeli koşullar altında,  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV için verimin ve optimum AB seviyesinin değişimi

| Bant genişliği | Örtüşme (eV) | Tepe Verimi (%) | Optimum AB (eV) |
|----------------|--------------|-----------------|-----------------|
| $E_G=1,95$ eV  | 0            | 63,2            | 0,71            |
|                | 0,4          | 54,4            | 0,8             |
|                | 4            | 43,2            | 0,98            |
| $E_G=1,12$ eV  | 0            | 54,8            | 0,36            |
|                | 0,4          | 46,0            | 0,45            |
|                | 4            | 35,0            | 0,56            |

Şekil 4.2'de, örtüşmesiz ve örtüşmeli optimum AB seviyeleri kullanıldığında, verimin, örtüşme miktarı ile değişimini görülmektedir. Öncelikle örtüşme, verimi önemli derecede azaltmaktadır. Fakat bu azalma, örtüşmeli AB seviyesi kullanılarak bir miktar kompanse edilebilmektedir. Şekil 4.2'de (b) ve (d) eğrileri,  $E_G=1,95$  eV için AB 0,71 eV ve  $E_G=1,12$  eV için AB 0,36 eV kullanılarak çizilmiştir. Örtüşmenin her değeri için elde edilen optimum AB seviyeleri kullanıldığında, verimde, bir miktar iyileşme sağlandığı görülmüştür ((a) ve (c) eğrileri).

$E_G=1,12$  eV için, maksimum örtüşme (4 eV) koşulu altında, örtüşmeli optimum AB seviyesinin kullanılması, verimi %3,2 oranında arttırmıştır. Bu artış,  $E_G=1,95$  eV için yaklaşık %10'dur. Sonuç olarak, örtüşmeli optimum AB seviyesinin kullanılması, büyük bant genişliğine sahip ABGP'lerde, küçük bant genişliğine sahip ABGP'lere göre daha etkin olmaktadır.



Şekil 4.2.  $\gamma=1$  durumunda, verimin örtüşme miktarı ve optimum AB ile değişimi;  $E_G = 1,95$  eV (sürekli çizgi) için (a) örtüşmeli optimum AB, (b) örtüşmesiz optimum AB;  $E_G=1,12$  eV (kesikli çizgi) (c) örtüşmeli optimum AB, (d) örtüşmesiz optimum AB, kullanılarak

Örtüşme etkisini azaltmak için A. Luque ve arkadaşları [90] aşağıdaki eşitliği uygulamayı önermişlerdir.

$$\gamma = \frac{\alpha_{CV}}{\alpha_{CI}} = \frac{\alpha_{CI}}{\alpha_{IV}} = 10 \quad (4.3)$$

Yukarıdaki eşitlik, Eş. 3.19 ile verilen  $M_e$  ve  $M_h$ 'nin birden büyük olmasını sağlayarak örtüşme etkisini azaltmakta ve kısa devre akımının azalmasını önlemektedir.

$\gamma=10$  durumunda, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullar altında,  $E_G=1,95$  eV ve  $1,12$  eV için verimin ara bant enerji seviyesi ile değişimi Şekil 4.3'de sunulmuştur. Maksimum verim, optimum ara bant ve optimum baz kalınlığı değerleri Çizelge 4.2'de özetlenmiştir. Şekil 4.3 ve Çizelge 4.2'den görüldüğü gibi, örtüşmenin olmadığı durumlarda verimin tepe değeri  $\gamma$ 'dan bağımsız hale gelmektedir. Örtüşme söz konusu olduğunda,  $\gamma$ , 1'den (Şekil 4.1) 10'a (Şekil 4.3) yükseldiğinde verimin tepe değerindeki kompanzasyon oranı artmaktadır. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 karşılaştırıldığında,  $\gamma=10$  için, optimum AB seviyesindeki değişimin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görülmektedir. Çizelge 4.2'de örtüşme miktarının optimum baz kalınlığı üzerindeki etkileri de görülmektedir ve gerekli açıklamalar Bölüm 4.1.1'de verilmiştir.

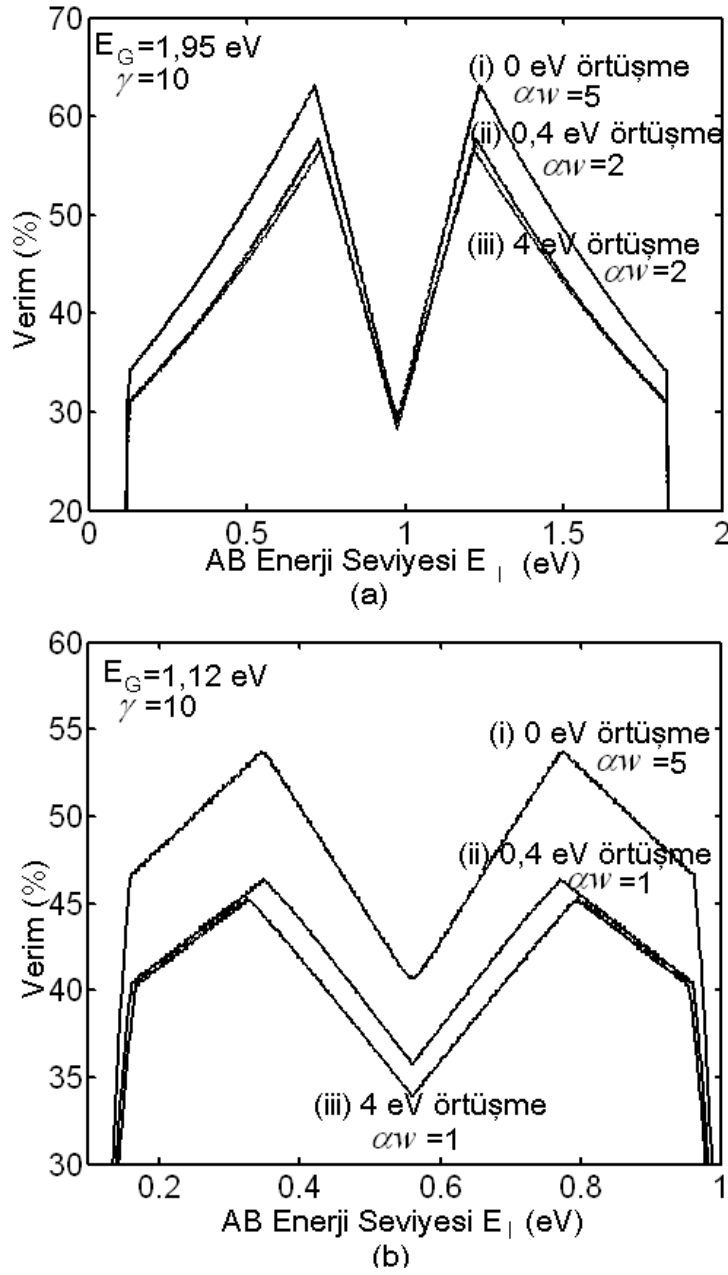
Çizelge 4.2.  $\gamma=10$  durumunda, örtüşmesiz ve örtüşmeli koşullar altında,  $E_G=1,95$ eV ve  $E_G=1,12$ eV için verimin ve optimum AB seviyesinin değişimi

| Band genişliği      | Örtüşme (eV) | Maksimum Verim (%) | Optimum AB (eV) | Baz kalınlığı ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------|--------------|--------------------|-----------------|---------------------------------|
| $E_G=1,95\text{eV}$ | 0            | 63,2               | 0,71            | 500                             |
|                     | 0,4          | 57,6               | 0,72            | 190                             |
|                     | 4            | 56,5               | 0,73            | 190                             |
| $E_G=1,12\text{eV}$ | 0            | 54,8               | 0,36            | 5000                            |
|                     | 0,4          | 46,4               | 0,35            | 1200                            |
|                     | 4            | 45,3               | 0,33            | 1200                            |

#### Örtüşmenin optimum baz kalınlığı üzerindeki etkileri

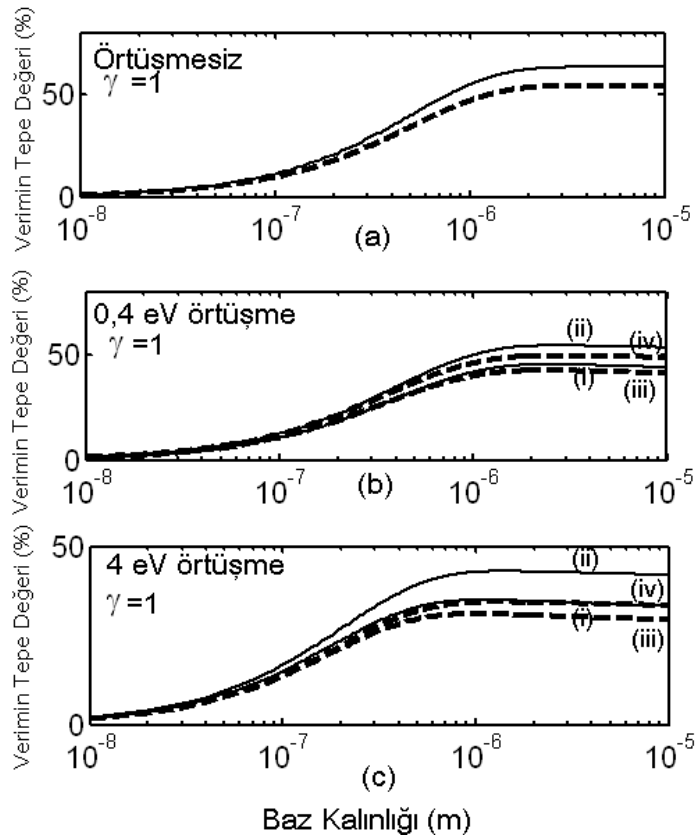
Örtüşme oluşması halinde optimize edilmesi gereken önemli bir parametre de baz kalınlığıdır [82,87]. Bölüm 4.1.1'de, örtüşmesiz koşul altında,  $\alpha_w=10$  seçilmişti. Bu değer tam soğurmayı sağlama koşulu olan  $\alpha_w \geq 5$ 'yi sağladığı için verime etki etmemişti (Bkz. Eş. 3.20). Soğurma katsayıları arasında

örtüşme meydana gelmesi durumunda ise, dahili rekombinasyon olarak adlandırılan ve baz kalınlığı ile doğru orantılı olan yeni bir rekombinasyon terimi ortaya çıkmaktadır (Eş. 3.23). Bu durumda baz kalınlığı, dahili rekombinasyonu mümkün olduğu kadar küçük tutacak kadar ince, uygun soğurma miktarını sağlayacak kadar da kalın olmalıdır.



Şekil 4.3.  $\gamma=10$  durumunda,  $E_G = 1.95$  eV (a) ve  $E_G = 1.12$  eV (b) için örtüşmesiz koşul (i), 0.4 eV (ii) ve 4 eV (ii) örtüşme koşulu altında verimin AB seviyesi ile değişimi

$E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV için, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullar altında ve  $\gamma=1$  durumunda, verimin tepe değeri-baz kalınlığı eğrileri, örtüşmeli ve örtüşmesiz optimum AB seviyeleri kullanılarak Şekil 4.4'deki gibi çizilmiştir. Hesaplamalarda  $E_G=1,95$  eV and 1,12 eV için soğurma katsayıları  $10^4\text{cm}^{-1}$  olarak seçilmiştir.



Şekil 4.4.  $E_G=1,95$  eV (sürekli çizgi) ve 1,12 eV (kesikli çizgi) için,  $\gamma=1$  durumunda, verimin tepe değerinin aşağıdaki koşullarda baz kalınlığı ile değişimi:

(a) Örtüşmesiz koşul

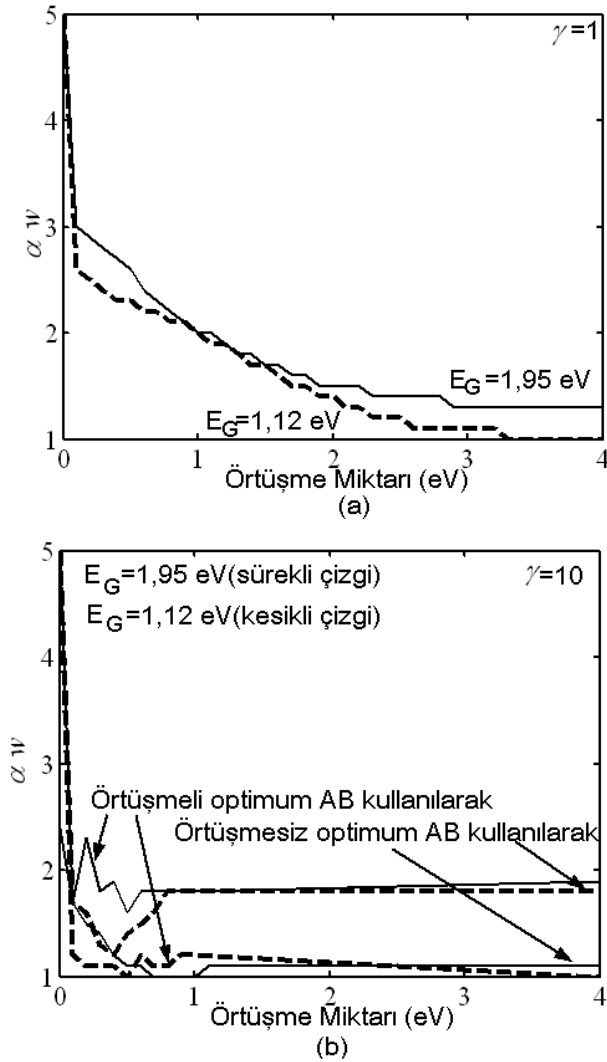
(b) 0,4 eV örtüşmeli koşul, örtüşmesiz optimum AB kullanarak (i) ve (iii); örtüşmeli optimum AB kullanarak (ii) ve (iv)

(c) 4 eV örtüşmeli koşul, örtüşmesiz optimum AB kullanarak (i) and (iii); örtüşmeli optimum AB kullanarak (ii) and (iv)

Örtüşme olmadığında (Şekil 4.4.a), maksimum verim elde etmek için  $5\mu\text{m}$ 'lik bir baz kalınlığı ( $\alpha w \geq 5$ ) yeterli olmaktadır. Fakat örtüşme miktarı 0,4 eV'dan (Şekil 4.4.b) 4 eV'a (Şekil 4.4.b ve c) yükseldiğinde, optimum baz kalınlığı  $2,72\mu\text{m}$ 'den ( $\alpha w \approx 3$ )  $1,39\mu\text{m}$ 'ye ( $\alpha w \approx 1,5$ ) düşmektedir. Şayet  $E_G=1,95$  eV için

baz kalınlığı, optimum değeri olan  $1,39 \mu\text{m}$ 'den  $10 \mu\text{m}$ 'ye çıkarılırsa verim  $\%54,36$ 'dan  $\%53,46$ 'ya düşmektedir. Verimdeki bu  $\%1$ 'lik azalmanın nedeni dahili rekombinasyondur.

Fotovoltaik piller için  $\alpha w$  değeri önemli bir parametre olduğu için, optimum  $\alpha w$  değerinin örtüşme miktarı ile değişimi  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumları için Şekil 4.5.a ve b'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.5.  $\gamma=1$  (a) ve  $\gamma=10$  (b) durumlarında  $\alpha w$  değerinin örtüşme miktarı ile değişimi

$E_G=1,95 \text{ eV}$  and  $1,12 \text{ eV}$  için  $\alpha w$  değerlerinin örtüşme ile değişim eğrileri birbirine benzemektedir.  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarının her ikisinde de  $\alpha w$  değeri

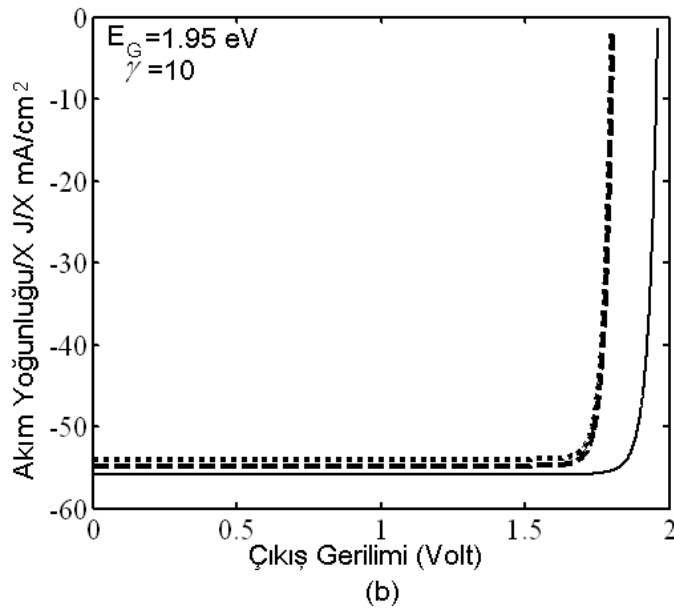
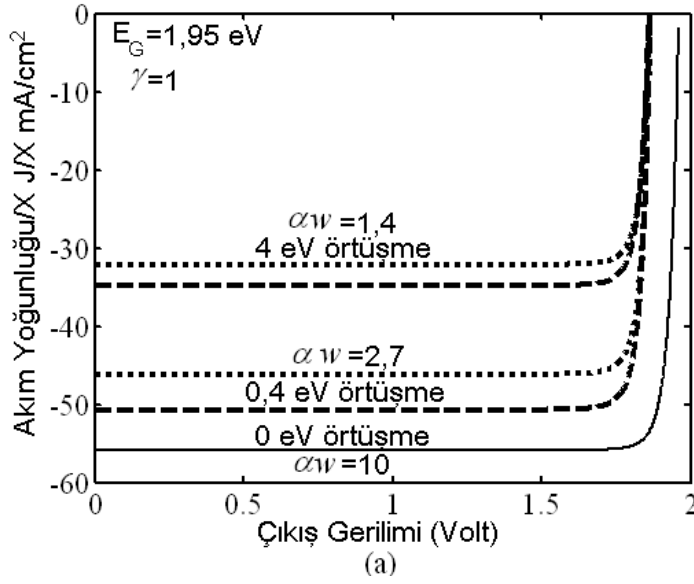
başlangıçta çok hızlı bir şekilde azalmaktadır.  $\gamma=1$  durumunda, bu azalma 0,2-3,2 eV örtüşme aralığında doğrusal olmakta, daha büyük örtüşme değerlerinde ise  $\alpha_w$  yaklaşık sabit kalmaktadır.  $\gamma=10$  durumunda ise  $\alpha_w$  değeri 0,1-1 eV örtüşme aralığında kararsız olmakta, daha büyük örtüşme değerlerinde ise sabit kalmaktadır. Şekil 4.5.a ve b kullanılarak, verilen bir soğurma katsayısı  $\alpha$  değeri için optimum baz kalınlığı hesaplanabilir.  $\gamma=10$  oranı,  $E_G=1,12\text{eV}$  [97] ve  $1,95\text{eV}$  için uygundur. Ancak,  $\gamma$  oranının büyük olmasının bir dezavantajı, en küçük soğurma katsayısının tersi alınarak bulunan, çok büyük baz kalınlığı gereksinimidir. Örneğin, Si için en küçük soğurma katsayısı ( $\alpha_{17}$ )  $10\text{ cm}^{-1}$  civarında olup gerekli baz kalınlığı en az 1mm olmaktadır.

#### Örtüşmenin $J$ - $V$ eğrisi üzerindeki etkileri

Daha önceki bölümlerde ara bant yapılı güneş pillerinde verimin örtüşme ile azaldığını göstermiştik. Bu bölümde,  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, örtüşmesiz ve örtüşmeli koşulların, kısa devre akım yoğunluğu ve açık devre gerilimi üzerindeki etkileri, Bölüm 4.1.1'de bulunan optimum  $\alpha_w$  değerleri kullanılarak araştırılmıştır.  $E_G=1,95\text{ eV}$  için  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında,  $J$ - $V$  eğrileri Şekil 4.6.a ve b'deki gibi elde edilmiştir.

Daha önce de belirtildiği gibi örtüşme olmadığında, gelen fotonun herhangi bir enerji değeri için  $M_e$  veya  $M_h$  veya her ikisinin değeri, birden büyük olmaktadır (Eş. 3.19). Fakat  $\gamma=1$  durumunda  $M_e$  ve  $M_h$  örtüşme aralığı boyunca birden küçük olmaktadır ve bu da ışıkla üretilen akım yoğunluğunun ve dolayısı ile de kısa devre akım yoğunluğunun azalmasına sebep olmaktadır. Kuasi-Fermi seviyelerinin ayrılma miktarı ( $\varepsilon_{IV}$  ve  $\varepsilon_{CI}$ ) ve buna bağlı olarak çıkış gerilimi de ışıkla üretilen akım yoğunluğunun azalması ile azalmaktadır. Buna ek olarak, örtüşme nedeniyle ortaya çıkan dahili rekombinasyon da çıkış gerilimini azaltmaktadır. Dahili rekombinasyon, bir fotonun üretildiği bantlar dışında bir bant çifti tarafından soğurulması ile

oluşmaktadır. Örneğin, CB ile VB arasında ışımalı rekombinasyon ile üretilen bir foton, örtüşme olmaması durumunda sadece bu bantlar tarafından soğurulabilmektedir. Fakat örtüşme olması durumunda, bu foton VB'dan AB'ye elektron geçişine sebep olacak şekilde soğurulabilmektedir.



Şekil 4.6.  $\gamma=1$  (a) ve  $\gamma=10$  (b) durumlarında,  $E_G=1.95$  eV için; örtüşmesiz koşul (sürekli çizgi), 0.4 eV ve 4 eV örtüşmeli koşullarda örtüşmeli optimum AB (kesikli çizgi) ve örtüşmesiz optimum AB (noktalı çizgi) kullanılarak elde edilen  $J$ - $V$  eğrisi

$E_G=1,95$  eV için,  $\gamma=1$  durumunda, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullar altında, örtüşmeli optimum ve örtüşmesiz optimum AB seviyeleri kullanılarak elde edilen maksimum kısa devre akım yoğunluğu, açık devre voltajı, doluluk faktörü ve verim değerleri Çizelge 4.3'de sunulmuştur. Şekil 4.6.a ve Çizelge 4.3'de görüldüğü gibi kısa devre akım yoğunluğu örtüşmeli optimum AB seviyesi kullanılarak bir miktar iyileştirilebilmektedir.

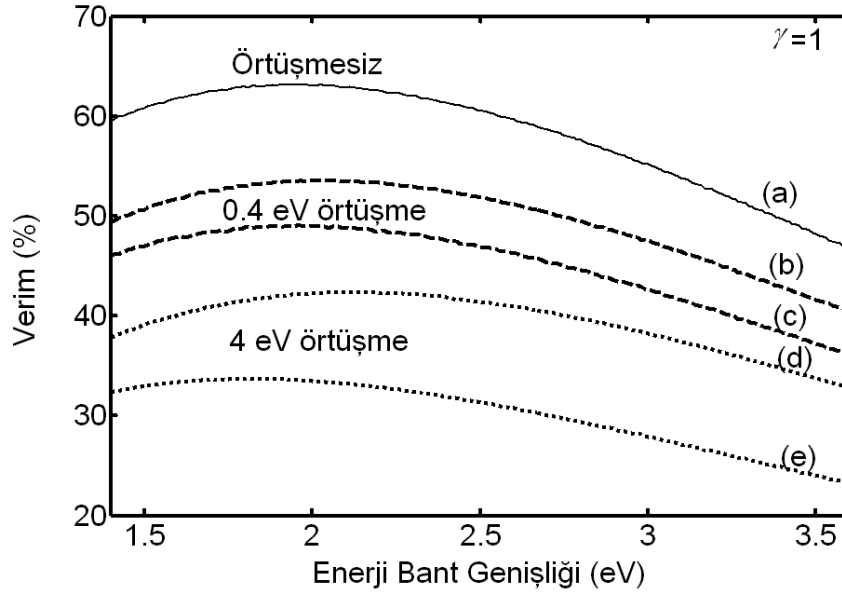
Çizelge 4.3.  $E_G=1,95$ eV için,  $\gamma=1$  durumunda, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullar altında, örtüşmesiz ve örtüşmeli optimum AB seviyeleri kullanılarak elde edilen, maksimum kısa devre akım yoğunluğu, açık devre voltajı, doluluk faktörü ve verim değerleri

| Değişkenler                      | Örtüşmesiz | 0,4 eV örtüşme       |                       | 4 eV örtüşme         |                       |
|----------------------------------|------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
|                                  |            | Örtüşmeli optimum AB | Örtüşmesiz optimum AB | Örtüşmeli optimum AB | Örtüşmesiz optimum AB |
| $J_{sc}/X$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | 55,9       | 50,5                 | 46,5                  | 39,5                 | 32,3                  |
| $V_{oc}$ (volt)                  | 1,96       | 1,86                 | 1,87                  | 1,87                 | 1,86                  |
| FF                               | 0,9157     | 0,915                | 0,912                 | 0,926                | 0,911                 |
| Verim (%)                        | 63,2       | 54,36                | 49,9                  | 43,2                 | 34,6                  |

Şekil 4.6.a ve b'deki  $J-V$  eğrileri karşılaştırıldığında, örtüşmesiz koşul altında,  $J_{sc}$  ve  $V_{oc}$  değerlerinin  $\gamma$ 'dan bağımsız olduğu görülmektedir. Örtüşme meydana geldiğinde ise,  $\gamma$ 'nın artması ile  $J_{sc}/X$  değerinde iyileşme olmaktadır. Büyük  $\gamma$  değerlerinde,  $J_{sc}/X$  değerinin aksine, açık devre voltajında, baz kalınlığı ile artan artan dahili rekombinasyona bağlı bir azalma görülmektedir.

#### Örtüşmenin Verim- $E_G$ eğrisi üzerindeki etkileri

Ara bant yapılı güneş pillerinde, örtüşmesiz koşul altında, bant genişliği ile verimin değişimi A. Luque tarafından araştırılmıştı [68]. Bu çalışmada, verimin, bant genişliği  $E_G$  ile değişimi, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullar altında,  $\gamma=1$  durumunda, her  $E_G$  değeri için, hesaplanan optimum AB seviyeleri ve optimum  $\alpha w$  değerleri kullanılarak Şekil 4.7'deki gibi bulunmuştur.



Şekil 4.7.  $\gamma=1$  durumunda, (a) örtüşmesiz koşulda, (b) 0,4 eV, (d) 4 eV örtüşmeli koşulda örtüşmeli optimum AB kullanılarak, (c) 0,4 eV, (e) 4 eV örtüşmeli koşulda örtüşmesiz optimum AB kullanılarak elde edilen verim-bant genişliği eğrileri

Örtüşme olmaması halinde,  $E_G=1,95$  eV için verimin tepe değeri %63,2 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.7.a) [68]. Şekil 4.7.b ve 4.7.d eğrileri için örtüşmeli optimum AB seviyeleri kullanılırken, Şekil 4.7.c ve 4.7.e için örtüşmesiz optimum AB seviyeleri kullanılmıştır. Örtüşmesiz optimum AB yerine örtüşmeli optimum AB seviyeleri kullanıldığında, verimde, 0,4 eV örtüşme koşulunda %5; 4 eV örtüşme koşulunda %10 iyileştirme sağlanmıştır. Diğer yandan, örtüşmesiz optimum AB seviyeleri tercih edildiğinde optimum bant genişliği 1,95 eV'da kalmaktadır (Şekil 4.7.b ve d). Fakat örtüşmeli optimum AB değerleri kullanıldığında optimum  $E_G$  daha büyük bant genişliklerine doğru hafifçe kaymaktadır (Şekil 4.7.c ve e). Örtüşme miktarı 0,4 eV'dan 4 eV'a çıktığında, optimum bant genişliği 2 eV'dan 2,13 eV'a %54,42 ve %43,3 verim sağlayacak şekilde kayar. Şekil 4.7'de elde edilen değerler, Çizelge 4.1 ile karşılaştırıldığında, verilen herhangi bir örtüşme değerinde, bant genişliğinin 1,8-2,2 eV aralığında olması halinde, maksimum verim değerinin hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir.

#### 4.1.2. Işımasız rekombinasyonun verim üzerindeki etkileri

Yarı iletkenlerde toplam rekombinasyon ömür süresi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\frac{1}{\tau_{tot}} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{SHR}} + \frac{1}{\tau_{int}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \quad (4.4)$$

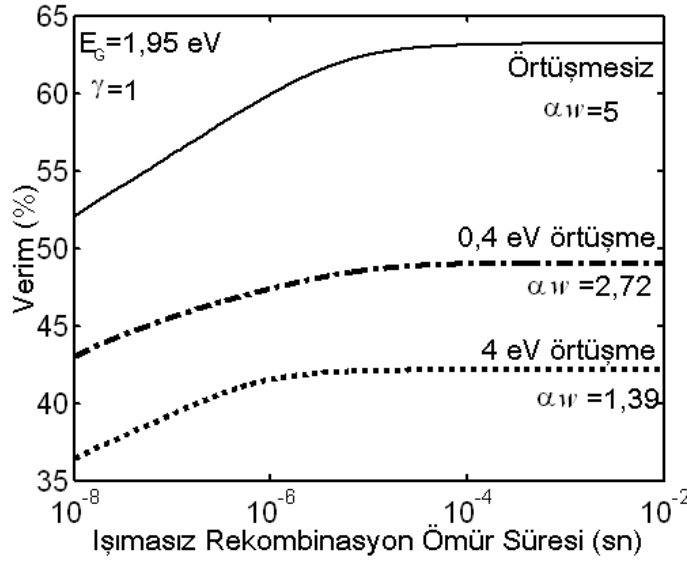
Burada  $\tau_{tot}$  toplam ömür süresini,  $\tau_{rad}$ ,  $\tau_{SHR}$ ,  $\tau_{int}$  ve  $\tau_{Auger}$  sırası ile, ışımalı, ışımasız (Shockley-Read Hall'e bağlı), dahili ve Auger rekombinasyonuna ilişkin ömür süreleridir.

Işımasız rekombinasyon örtüşme ile birlikte detaylı denge modeline dahil edildiğinde Eş. 3.15.a ve b aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$J_e = J_{gen,e} - J_{rad,e} - J_{int,e} - J_{nonrad,e} \quad (4.5.a)$$

$$J_h = J_{gen,h} - J_{rad,h} - J_{int,h} - J_{nonrad,h} \quad (4.5.b)$$

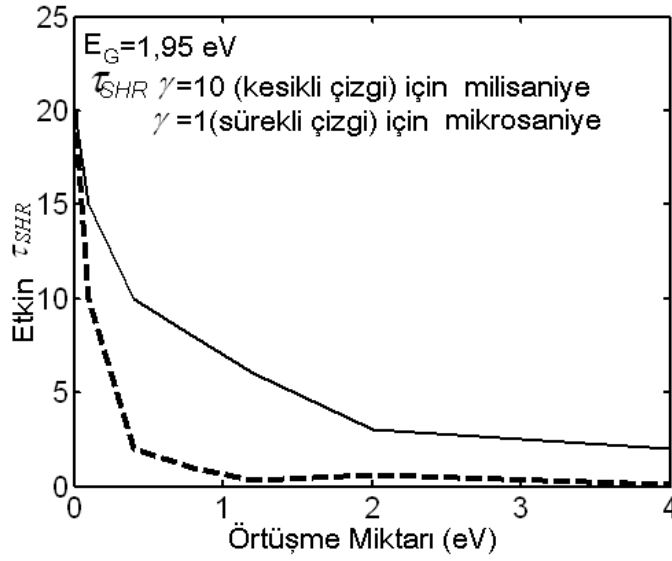
Eş. 4.4'den görüldüğü gibi, toplam ömür süresi en küçük ömür süresine yakın olmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde Auger rekombinasyonu ihmal edildiği için  $\tau_{Auger} = \infty$  kabul edilmiştir. Şekil 4.8'de,  $\gamma=1$  durumunda, örtüşmesiz ( $\alpha w=10$ ), 0,4 eV örtüşmeli ( $\alpha w=2,7$ ) ve 4 eV örtüşmeli ( $\alpha w=1,39$ ) koşullar altında,  $E_G=1,95$  eV için verimin ışımasız rekombinasyon ömür süresi  $\tau_{SHR}$  ile değişimi sunulmuştur. Parantez içerisinde verilen değerler Bölüm 4.1.1'de hesaplanan optimum  $\alpha w$  değerleridir. Örtüşmesiz koşulda,  $\tau_{int}$  sonsuzdur ve  $\tau_{SHR}$  yaklaşık 20  $\mu s$ 'nin altına düşmediği sürece verimi etkilememektedir.  $\tau_{SHR}$ 'nin yaklaşık 20  $\mu s$ 'nin üzerine çıkması durumunda ise, ışımalı rekombinasyon baskın durumdadır. Aksi halde ışımasız rekombinasyon etkin hale gelmekte ve verimin azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.8.  $\gamma=1$  durumunda,  $E_G=1,95$  eV için, örtüşmesiz (sürekli çizgi), 0,4 eV örtüşmeli (kesikli çizgi) ve 4 eV örtüşmeli (noktalı çizgi) koşullarda verimin ışınmasız rekombinasyon ömür süresi ile değişimi

Şekil 4.9'da  $E_G=1,95$  eV için,  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, etkin  $\tau_{SHR}$  değerinin, örtüşme miktarı ile değişimi görülmektedir. Burada, örtüşme miktarı arttıkça, etkin  $\tau_{SHR}$  değeri  $20 \mu\text{sn}$ 'den  $2 \mu\text{sn}$ 'ye düşmektedir.  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV için,  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, örtüşmesiz ve örtüşmeli koşullar altında, önceki bölümlerde hesaplanan optimum  $\alpha.w$  değerleri kullanılarak elde edilen etkin  $\tau_{SHR}$  değerleri Çizelge 4.4'de özetlenmiştir.  $E_G=1,12$  eV için bulunan sonuçlar, [68] ile uyum sağlamaktadır. Etkin  $\tau_{SHR}$  değeri, hem  $\gamma=1$  hem de  $\gamma=10$  durumunda, örtüşme miktarı arttıkça azalmaktadır.  $\gamma$ , 1'den 10'a yükseldiğinde, etkin  $\tau_{SHR}$  değeri  $E_G=1,95$  eV için yaklaşık  $10^3$  kat;  $E_G=1,12$  eV için 10 kat artmaktadır [98-99].  $\gamma=10$  durumunda etkin  $\tau_{SHR}$  değerinin artmasının nedeni, hem baz kalınlığının daha büyük olmasıdır hem de Eş. 3.18'deki üstel terimdir.

İşınmasız rekombinasyonun optimum AB seviyesine etkisi de araştırılmıştır. Ancak optimum AB seviyesinde bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 4.9.  $E_G=1.95$  eV için,  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, etkin  $\tau_{SHR}$  değerinin örtüşme miktarı ile değişimi

Çizelge 4.4.  $E_G=1.95$  ve  $1.12$  eV için  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, örtüşmenin farklı değerleri için (0, 0,4 ve 4 eV) etkin  $\tau_{SHR}$  değerleri

| Band genişliği | Örtüşme (eV) | $\gamma=1$ durumunda Etkin $\tau_{SHR}$ | $\gamma=10$ durumunda Etkin $\tau_{SHR}$ |
|----------------|--------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| $E_G=1.95$ eV  | 0            | 20 $\mu$ sn                             | 20 msn                                   |
|                | 0,4          | 10 $\mu$ sn                             | 2 msn                                    |
|                | 4            | 2 $\mu$ sn                              | 2 msn                                    |
| $E_G=1.12$ eV  | 0            | 800 $\mu$ sn                            | 20 msn                                   |
|                | 0,4          | 20 $\mu$ sn                             | 1 msn                                    |
|                | 4            | 8 $\mu$ sn                              | 1 msn                                    |

#### 4.1.3. Auger mekanizmasının ara bant yapılı güneş pilinin performansı üzerindeki etkileri [89]

Auger üretimi, yüksek enerjili fotonlarla üretilen sıcak elektronlara bağlı olarak, impact iyonizasyonla, elektronların ve boşlukların bantlar arasında geçişlerinin artması olarak tanımlanabilmektedir. Fotonun,  $E_G$ 'nin üzerindeki bütün fazlalık enerjisi, yeni bir elektrona aktarılmaktadır. Yüksek enerjili fotonlar tarafından üretilen sıcak taşıyıcılar, elektronları i) ara banttan iletkenlik bandına, ii) valans bandından ara banda veya iii) valans bandından

iletkenlik bandına çıkarabilmektedir. Auger üretiminin zıddı olan mekanizmaya Auger rekombinasyonu denmektedir. Auger ya da impact iyonizasyon mekanizması yüksek yoğunluklu metalik bantlarda meydana gelmektedir ve pek çok durumda ara bant yapılı güneş pilinin verimini artırmaktadır [80-82]. Çalışmanın bu bölümünde, alçak ve yüksek eşik Auger üretim/rekombinasyon içeren ara bant yapılı güneş pilinin termodinamik verim sınırı, soğurma katsayıları arasında örtüşme olması ve olmaması durumları için, detaylı denge modeli kullanılarak incelenmiştir. Işımasız rekombinasyona bağlı akım yoğunlukları çıkarılıp, Auger etkisi detaylı denge modeline dahil edildiğinde Eş. 3.17.a ve b'deki akım yoğunluğu ifadeleri aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$J_e = J_{gen,e} - J_{rad,e} - J_{int,e} + J_{Auggen,e} - J_{Augrec,e} \quad (4.6.a)$$

$$J_h = J_{gen,h} - J_{rad,h} - J_{int,h} + J_{Auggen,h} - J_{Augrec,h} \quad (4.6.b)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi, soğurma katsayıları arasında örtüşme olmadığında Eş. 4.6.a ve b'deki dahili rekombinasyon akım yoğunluğu terimleri,  $J_{int,e}$  ve  $J_{int,h}$  sıfır olmaktadır.

Bu çalışmada, Auger mekanizmasının etkisini incelemek amacı ile dört farklı tipte ara bant yapılı güneş pili analiz edilmiştir. Örtüşmenin bu dört ABGP üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Önerilen ABGP modellerinin özellikleri şöyledir: Pil (a)'da her üç bant arasında (VB, AB, CB) ışımalı geçiş mümkündür ve Auger üretim ve rekombinasyonu ise sadece ara bant ile iletkenlik bandı arasında (alçak eşik), en yüksek olasılıkla, gerçekleşmektedir. Pil (b) için ara bant ile iletkenlik bandı arasında sadece Auger üretimi ve rekombinasyonu olduğu varsayılmıştır ve bu bantlar arasındaki ışımalı rekombinasyon ihmal edilmiştir. Böylece bütün alt bant fotonlar ara bant seviyesini doldurmak için kullanılmaktadır. Pil (a) ve (b) modelleri M. Ley ve arkadaşları tarafından daha önce incelenmiştir [88]. Bu çalışmada sunulan yeni pil (c)'de üç bant arasında hem ışımalı

rekombinasyon hem de Auger üretimi/rekombinasyonu mümkündür (alçak ve yüksek eşik). Bu çalışmada sunulan [68, 89], ancak Auger mekanizması içermeyen pil (d) ise karşılaştırma yapmak amacıyla bu kısma da dahil edilmiştir. Bölüm 3.3’de verilen integrallerin aralıkları ve dört pil modeli için geçerli soğurma katsayıları Çizelge 4.5’de sunulmuştur.

Çizelge 4.5.  $m$  çoğullama sayısı iken ( $m=1,2,...,m_{max}$ ), integral aralıkları ve dört pil modeline ait soğurma katsayıları

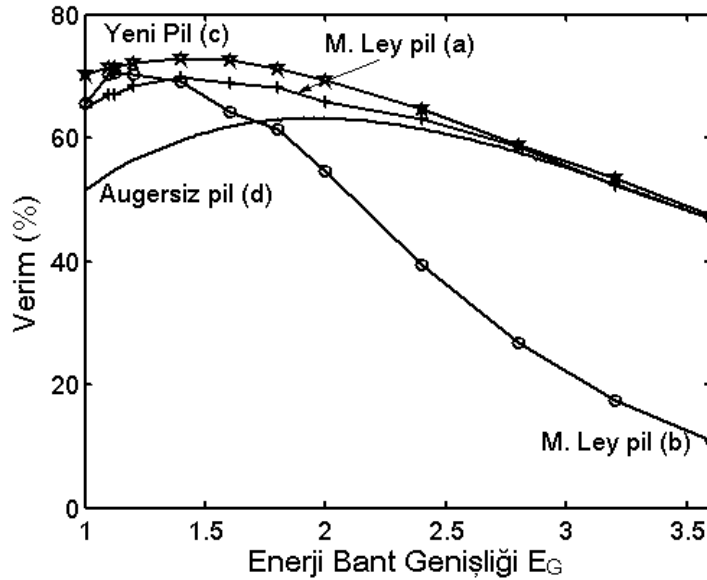
| Soğurma Katsayısı | Geçerli Aralık                       | Pil tipi     |
|-------------------|--------------------------------------|--------------|
| $\alpha_{IV}$     | $E_L < h\nu < E_H$                   | Bütün piller |
| $\alpha_{CI}$     | $E_H < h\nu < E_G$                   | Bütün piller |
| $\alpha_{CV}$     | $E_G < h\nu$                         | Bütün piller |
| $\alpha_{IVA}$    | $mE_G + E_L < h\nu < mE_G + E_H$     | Pil (c)      |
| $\alpha_{CIA}$    | $mE_G + E_H < h\nu < (m+1)E_G$       | Pil (c)      |
|                   | $E_G + mE_H < h\nu < E_G + (m+1)E_H$ | Pil (a), (b) |
| $\alpha_{CVA}$    | $(m+1)E_G < h\nu < (m+1)E_G + E_L$   | Pil (c)      |

Brendel ve arkadaşları, valans bant ile iletkenlik bandı arasında Auger üretimi içeren, tek bantta sahip bir güneş pili için termodinamik verim sınırını hesaplamışlar ve  $E_G=0.048$  eV için, sınırlı Auger rekombinasyonu ile %85’lik bir verim elde etmişlerdir [67]. Bu çalışmada, [67], [68] ve [88] ile verilen modeller birleştirilerek yeni pil (c) oluşturuldu ve Auger mekanizmasının ABGP üzerindeki etkisi, Auger üretimi/rekombinasyonu diğer bantların yanı sıra, valans bant ile iletkenlik bandı arasında da mevcutken incelendi. Soğurma katsayılarının eşit olması ( $\gamma=1$ ) ve olmaması ( $\gamma=10$ ) durumlarında, verimin örtüşme miktarı ile değişimini görmek için, soğurma katsayıları arasında örtüşme olması durumu da modele dahil edildi.

### Auger mekanizmasının ara bant seviyesi üzerindeki etkileri

Dört farklı ABGP modeli için, verimin bant genişliği ile değişimi Şekil 4.10'daki gibi bulunmuştur. Maksimum verim değerleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

- i) Pil (a),  $E_G=1,4$  eV için %69,9,
- ii) Pil (b),  $E_G=1,25$  eV için %70,9,
- iii) Pil (c),  $E_G=1,42$  eV için %72,9,
- iv) Pil (d),  $E_G=1,95$  eV için %63,2.



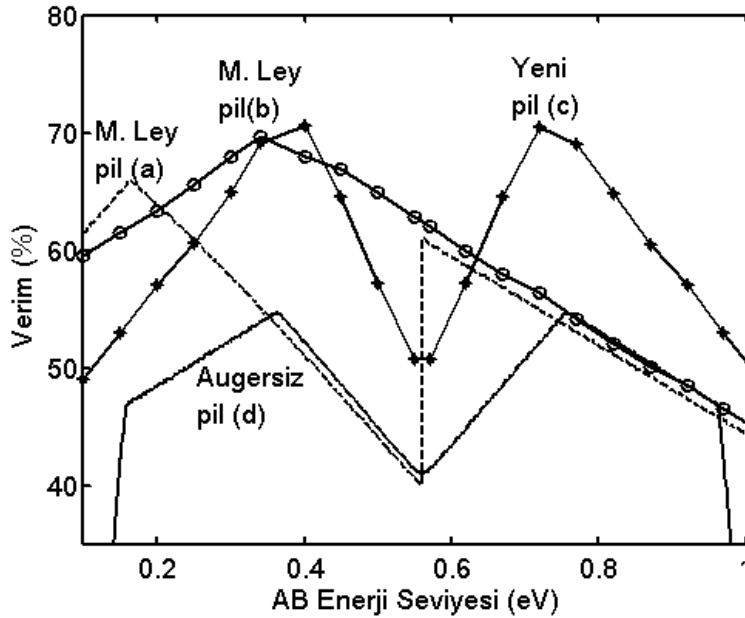
Şekil 4.10. Pil (a) (artılı çizgi), pil (b) (yuvarlaklı çizgi), pil (c) (yıldızlı çizgi) ve pil (d) (sürekli çizgi) için Auger üretimi/rekombinasyonunun verim- $E_G$  değişimi üzerindeki etkisi

Pil (a), (b) ve (c)'de görüldüğü gibi verim, küçük bant genişliklerine doğru gidildikçe artmaktadır ve optimum bant genişliği silisyumun bant genişliğine yaklaşmaktadır. Pil (a) ve (c)'de, bant genişliği 2,5 eV'dan daha büyük olduğunda Auger mekanizması etkisini kaybetmekte ve Verim- $E_G$  eğrileri pil (d) için elde edilen eğriye yaklaşmaktadır. Pil (b)'de verim, silisyumun bant genişliği civarında maksimum olmakta ve daha büyük bant genişliklerinde çok hızlı bir şekilde azalmaktadır. Pil (a) ve (c) için optimum bant genişliği

GaAs'ın bant genişliğine, pil (b) için silisyumun bant genişliğine yakındır. Maksimum verimlilik ise bu çalışmada sunulan yenil pil (c) tarafından sağlanmıştır.

#### Auger mekanizmasının, verimin enerji bant seviyesi ile değişimine etkileri

$E_G=1,12$  eV için, yukarıda verilen dört farklı ara bant yapılı güneş pili modeli kullanılarak verimin AB enerji seviyesine göre değişimi Şekil 4.11'deki gibi elde edilmiştir.

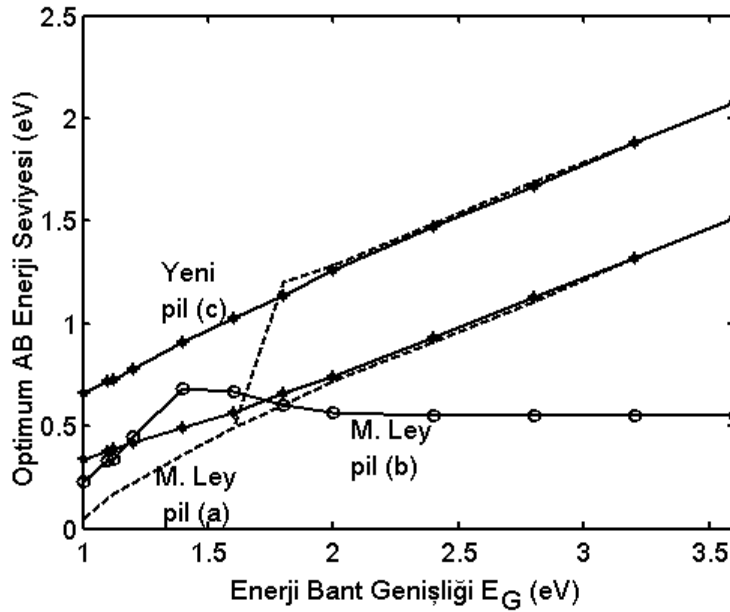


Şekil 4.11.  $E_G=1.12$  eV iken pil (a) (kesikli çizgi), pil (b) (yuvarlaklı çizgi), pil (c) (yıldızlı çizgi ve pil (d) (sürekli çizgi) için verimin AB seviyesi ile değişimi

Burada, verim bulunurken, ara bant yapılı güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu  $J_{gen,e}+J_{Auggen,e}$  ve  $J_{gen,h}+J_{Auggen,h}$  değerlerinden küçüğü seçilmiştir. Bu yüzden de optimum ara bant enerji seviyesi bu iki değeri yaklaşık birbirine eşitlenecek şekilde belirlenmiştir. Daha önceki pilimizde olduğu gibi, pil (d)'de (Auger etkisi yok) bant genişliğinin üçte birinde ve üçte ikisinde olmak üzere iki optimum AB seviyesi mevcuttur. Auger etkisi ABGP'ye dahil edildiğinde, pil (c) için verimin AB seviyesine göre değişimi, pil (d)'ninkine benzemektedir fakat verimin tepe değerleri %18 kadar artarak yukarıya kaymıştır. Pil (a)'nın

verimi küçük AB seviyeleri için yüksek değerlere ulaşmakta, ve hızla azalarak bant genişliğinin ortalarına doğru pil (d)'ye yaklaşmaktadır. Pil (a)'nın verimi, bant genişliğinin yaklaşık ortalarında ikinci tepe değerine sahiptir ve AB seviyesinin daha büyük değerleri için pil (d)'ye eşittir. Pil (b)'nin verimi, bant genişliğinin yaklaşık üçte birinde tek tepe değerine sahiptir ve AB'nin daha büyük değerleri için pil (d) eğrisine ulaşmaktadır.

Auger mekanizmasının, bant genişliği ile optimum AB seviyesi değişimi üzerindeki etkisi, pil (a), (b) ve (c) için Şekil 4.12'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Pil (a) (kesikli çizgi), pil (b) (yuvarlaklı çizgi) ve pil (c) (yıldızlı çizgi) için AB enerji seviyesinin bant genişliği  $E_G$  ile değişimi.

Şekil 4.11 ve 4.12'de görüldüğü gibi, pil (c), bant genişliğinin üçte birinde ve üçte ikisinde olmak üzere iki optimum AB seviyesine sahiptir. Şekil 4.12'de pil (a), bant genişliği yaklaşık 1,6 eV'ye kadar tek optimum AB seviyesine sahiptir. Bant genişliği 1,7 eV'nin üzerine çıktığında ise AB seviyesi- $E_G$  eğrisi ikiye ayrılır ve pil (c) eğrisine yaklaşıp. Pil (b) her zaman yarı bant genişliğinin altında yer alan tek optimum ara bant sergilemektedir. Bu ara bant seviyesi bant genişliği 1,4 eV'ye kadar artmakta, daha sonra azalarak, bant genişliği 2,5 eV'den büyük olduğunda sabit kalmaktadır.

### Auger mekanizması ve örtüşmenin verim üzerindeki etkileri

$E_G=1,12$  eV için, yukarıda verilen dört farklı ABGP modeli kullanılarak, 0 eV (örtüşmesiz), 0,4 eV ve 4 eV örtüşmeli koşullar altında, soğurma katsayılarının eşit olması ( $\gamma=1$ ) ve olmaması ( $\gamma=10$ ) durumlarında, maksimum verim ve optimum AB seviyesi değerleri bulunmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi ABGP'lerde, bant genişliğine ve ara bantlara dair üç soğurma katsayısı mevcuttur. Örtüşmesiz koşulda, verilen bir enerji seviyesi için bu soğurma katsayılarından sadece birisi değer almakta diğerleri ise sıfır olmaktadır. Örtüşme olduğunda ise aynı enerji seviyesinde birden fazla soğurma katsayısı değer alabilmektedir.  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, 0 eV, 0,4 eV ve 4 eV örtüşmeli koşullar altında, dört pil için hesaplanan verim ve optimum AB seviyesi değerleri Çizelge 4.6-4.9'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.6. Pil (a) için,  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, 0, 0,4 ve 4 eV örtüşme koşulu altında, Auger mekanizmasının verim ve optimum AB seviyesi üzerindeki etkisi

|             | Örtüşme (eV) | Tepe verimi (%) | Optimum AB (eV) |
|-------------|--------------|-----------------|-----------------|
| $\gamma=1$  | 0            | 67              | 0,17            |
|             | 0,4          | 57,6            | 0,2             |
|             | 4            | 48,5            | 0,23            |
| $\gamma=10$ | 0            | 67              | 0,17            |
|             | 0,4          | 57,6            | 0,17            |
|             | 4            | 54,5            | 0,17            |

Çizelge 4.7. Pil (b) için,  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, 0, 0,4 ve 4 eV örtüşme koşulu altında, Auger mekanizmasının verim ve optimum AB seviyesi üzerindeki etkisi

|             | Örtüşme (eV) | Tepe verimi (%) | Optimum AB (eV) |
|-------------|--------------|-----------------|-----------------|
| $\gamma=1$  | 0            | 70,5            | 0,34            |
|             | 0,4          | 58,6            | 0,42            |
|             | 4            | 58,3            | 0,54            |
| $\gamma=10$ | 0            | 70,5            | 0,34            |
|             | 0,4          | 59,3            | 0,34            |
|             | 4            | 59,3            | 0,34            |

Çizelge 4.8. Pil (c) için,  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, 0, 0,4 ve 4 eV örtüşme koşulu altında, Auger mekanizmasının verim ve optimum AB seviyesi üzerindeki etkisi

|             | Örtüşme (eV) | Tepe verimi (%) | Optimum AB (eV) |
|-------------|--------------|-----------------|-----------------|
| $\gamma=1$  | 0            | 71,6            | 0,38            |
|             | 0,4          | 67,3            | 0,48            |
|             | 4            | 45,7            | 0,52            |
| $\gamma=10$ | 0            | 71,5            | 0,38            |
|             | 0,4          | 71,5            | 0,38            |
|             | 4            | 71,5            | 0,38            |

Çizelge 4.9. Pil (d) için,  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, 0, 0,4 ve 4 eV örtüşme koşulu altında, verim ve optimum AB seviyesi değerleri

|             | Örtüşme (eV) | Tepe verimi (%) | Optimum AB (eV) |
|-------------|--------------|-----------------|-----------------|
| $\gamma=1$  | 0            | 54,8            | 0,36            |
|             | 0,4          | 46,0            | 0,45            |
|             | 4            | 35,0            | 0,56            |
| $\gamma=10$ | 0            | 54,8            | 0,36            |
|             | 0,4          | 46,4            | 0,35            |
|             | 4            | 45,3            | 0,33            |

Görüldüğü gibi,  $\gamma=1$  durumunda, pil (a), (c) ve (d) örtüşmeye karşı pil (b)'ye göre daha hassastırlar ve örtüşmenin artan değerleri için daha küçük verim sağlamaktadırlar. Dört pil modelinin hepsinde örtüşme miktarı arttıkça verim düşmekte ve AB enerji seviyesi bant genişliğinin ortasına doğru kaymaktadır.  $\gamma=1$  durumunda, 4 eV örtüşme koşulu altında verimdeki azalma oldukça fazladır. Fakat  $\gamma=10$  durumunda, verimde bir iyileştirme sağlanmakta ve optimum AB seviyesi de örtüşmeden bağımsız hale gelmektedir. Sonuç olarak, Auger etkisi içeren ABGP modelleri (pil (a), (b) ve (c)) maksimum örtüşme koşulu altında bile Auger etkisi içermeyen (pil (d)) normal ABGP modeline göre daha yüksek verim sağlamaktadır.

#### 4.2. Kuasi-Sürüklenme-Difüzyon Modeli İle Elde Edilen Sonuçlar

Detaylı denge modelinde, taşıyıcı mobilitelerinin sonsuz olduğu varsayılmıştı. Bunun sonucu olarak da elektron ve boşluklara ait kuasi-Fermi seviyelerinin

baz bölgesi boyunca sabit kaldığı ve  $x$  ile değişmediği kabul edilmişti. Taşıyıcı mobiliteleri pratikte sonsuz olamaz. Çalışmanın bu bölümünde, kuasi-sürüklenme-difüzyon modeli kullanılarak mobilitenin farklı değerleri için elektron ve boşluk konsantrasyonlarının baz bölgesi boyunca değişimleri; verimin, kısa devre akımının ve açık devre geriliminin mobiliteye bağımlılıkları araştırılmıştır. Ayrıca, elektrik alan modele dahilken ve değilken, ışık konsantrasyonunun ve DOT'un verime etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, detaylı denge modelinde incelenen,  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV olan ABGP'ler tercih edilmiştir.

#### 4.2.1. Sonlu elemanlar metodunun kuasi-sürüklenme-difüzyon modeline uygulanması

Eş. 3.48, 3.49.a ve b ile ifade edilen sisteme sonlu elemanlar metodu uygulanırken sistem basitten karmaşığa doğru incelenmiştir. İlk önce; emitter akımları, sürüklenme akımı (elektrik alan), örtüşme ve  $\Delta n \Delta p$  içeren doğrusal olmayan terimler (DOT) ihmal edilerek sistemde büyük bir basitleştirme sağlanmıştır. İhmal edilen bu terimlerin etkileri ilerideki bölümlerde incelenecektir. Elektrik alan, örtüşme, ışımsız rekombinasyon ve emitter akımlarının da ihmal edilmesi ile Eş. 3.49.a ve b aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$eD_e \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - rgI \frac{\Delta n}{n_{eq}} = -g_e - g_{eh} \quad (4.7.a)$$

$$eD_h \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - rg4 \frac{\Delta p}{n_{eq}} = -g_h - g_{eh} \quad (4.7.b)$$

Eş. 4.7 çifti doğrusal bir sistem oluşturmaktadır ve bu eşitliklerin analitik metotlarla çözümü mümkündür. Burada, sonlu elemanlar metodunun basit bir uygulaması verilmiştir. Eş. 4.7 çiftine, Bölüm 3.4.6'da açıklanan, ağırlıklı kalan metodu uygulandığında aşağıdaki denklem çifti bulunur.

$$\int \left\{ \begin{array}{l} w_1 \left( D_e \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} \right) \\ w_2 \left( D_h \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} \right) \end{array} \right\} dx - \int \left[ \begin{array}{l} w_1 r g l \frac{\Delta n}{n_{eq}} \\ w_2 r g 4 \frac{\Delta p}{p_{eq}} \end{array} \right] dx + \int \left[ \begin{array}{l} w_1 (g_e + g_{eh}) \\ w_2 (g_h + g_{eh}) \end{array} \right] dx = 0 \quad (4.8)$$

Yukarıda,  $w_1$  ve  $w_2$  test fonksiyonlarıdır. Sistem ikinci dereceden türev içermektedir. Bu nedenle zayıf formülasyon kullanılmıştır:

$$\int \left\{ \begin{array}{l} \frac{dw_1}{dx} D_e \frac{d\Delta n}{dx} \\ \frac{dw_2}{dx} D_h \frac{d\Delta p}{dx} \end{array} \right\} dx - \int \left[ \begin{array}{l} w_1 r g l \frac{\Delta n}{n_{eq}} \\ w_2 r g 4 \frac{\Delta p}{p_{eq}} \end{array} \right] dx + \int \left[ \begin{array}{l} w_1 (g_e + g_{eh}) \\ w_2 (g_h + g_{eh}) \end{array} \right] dx + \left[ \begin{array}{l} w_1 D_e \frac{d\Delta n}{dx} \\ w_2 D_h \frac{d\Delta p}{dx} \end{array} \right]_0^w = 0 \quad (4.9)$$

Test fonksiyonu olarak Bölüm 3.4.6'da verilen, Galerkin'in yaklaşımı kullanılmıştır.

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & 0 & H_2 & 0 \\ 0 & H_1 & 0 & H_2 \\ H_1 & 0 & H_2 & 0 \\ 0 & H_1 & 0 & H_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n_1 \\ \Delta p_1 \\ \Delta n_2 \\ \Delta p_2 \end{bmatrix} = [N][d] \quad (4.10)$$

Burada,  $\Delta n_1$ ,  $\Delta p_1$  herhangi bir sonlu elemanın başlangıç noktasındaki ve  $\Delta n_2$ ,  $\Delta p_2$  son noktasındaki fazlalık taşıyıcı yoğunluklarıdır.  $H_1$  ve  $H_2$ , Eş. 3.58.a ve b ile verilmiştir. Buradan türev ifadesine geçildiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta n}{dx} \\ \frac{d\Delta p}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H'_1 & 0 & H'_2 & 0 \\ 0 & H'_1 & 0 & H'_2 \\ H'_1 & 0 & H'_2 & 0 \\ 0 & H'_1 & 0 & H'_2 \end{bmatrix} [d] = [B][d] \quad (4.11)$$

Eş. 4.10 ve 4.11, Eş. 4.9'da yerine konularak aşağıdaki ifade bulunmuştur.

$$\int [B]^T [B] dx [d] - \int [N]^T [N] dx [d] + \int [N]^T \begin{bmatrix} g_e + g_{eh} \\ g_h + g_{eh} \end{bmatrix} dx + \left[ \begin{array}{c} w_1 \frac{D_e d \Delta n}{dx} \\ w_2 \frac{D_h d \Delta p}{dx} \end{array} \right]_0^w = 0 \quad (4.12)$$

Yukarıdaki eşitlikte ilk iki integralin toplamı, eleman matrisi  $K^e$ 'yi vermektedir.

$$K^e = \int [B]^T [B] dx + \int [N]^T [N] dx \quad (4.13)$$

Eş. 4.12'deki üçüncü integral, eleman vektörü  $F^e$ 'yi vermektedir.

$$F^e = \int [N]^T \begin{bmatrix} g_e + g_{eh} \\ g_h + g_{eh} \end{bmatrix} dx \quad (4.14)$$

Bu çalışmada her bir eleman için, eleman matrislerinin bulunup toplanması ile sistem matrisi; eleman vektörlerinin bulunup toplanması ile de sistem vektörü elde edilmiştir. Sınır koşulları yerine konulduktan sonra, sistem vektörü sistem matrisine bölünmüştür ve sistemde seçilen her bir nokta için fazlalık taşıyıcı yoğunlukları,  $\Delta n$  ve  $\Delta p$  elde edilmiştir. Çözümlemelerde, sistem, kısa devre ve karanlık olmak üzere iki durumda incelenmiştir. Kısa devre durumunda çıkış gerilimi dolayısı ile de kuasi Fermi seviyelerinin ayrılma miktarı sıfır kabul edilip, ışık altındaki kısa devre akım yoğunluğu bulunmuştur. Karanlık durumda ise  $g_e$ ,  $g_h$  ve  $g_{eh}$  terimleri sıfırlanarak, karanlık durum akım yoğunluğunun çıkış gerilimi ile değişimi bulunmuştur. Elektrik alan ve DOT sisteme dahil edilerek, benzer şekilde sistem matrisi ve sistem vektörü elde edilmiştir. Ancak DOT söz konusu olduğunda  $\Delta n$  ve  $\Delta p$ 'yi bulmak için sistem vektörünü sistem matrisine bölmek uygun olmamaktadır. Çünkü sistem vektörümüz  $\Delta n$  ve  $\Delta p$ 'ye ait katsayılar yanında  $\Delta n x \Delta p$ 'ye ( $n_1 x p_1$ ,  $n_2 x p_1$ ....)ait katsayılar da içermektedir. Bu yüzden, her elemanın ilk ve son değerlerinin bulunabilmesi için, eleman sayımız kadar doğrusal olmayan

denklem içeren bir sistemin çözülmesi gerekmektedir. Bu sistemin çözümü için ise uygun bir optimizasyon tekniğinin kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, elde edilen doğrusal olmayan denklem sisteminin çözümü için basit sabit noktalı iterasyon yöntemi kullanılmıştır [96]. Bu yöntemin uygulanışı EK1’de detaylı olarak açıklanmıştır.

#### 4.2.2. ABGP veriminin, taşıyıcı mobilitesi ve DOT ile değişimi

Çalışmanın bu bölümünde, maksimum konsantrasyon altında ( $X=46000$ ),  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV olan ABGP’ler için verimin taşıyıcı mobilitesi ve DOT ile değişimi araştırılmıştır. Hesaplamalarda elektrik alan, soğurma katsayıları arasında örtüşme ve emitter etkileri ihmal edilmiştir. Bu durumda Eş. 3.49.a ve b ile verilen sistem aşağıdaki denklemlere indirgenmiştir.

$$eD_e \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - rg1 \frac{\Delta n}{n_{eq}} - rg3 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} = -g_e - g_{eh} \quad (4.15.a)$$

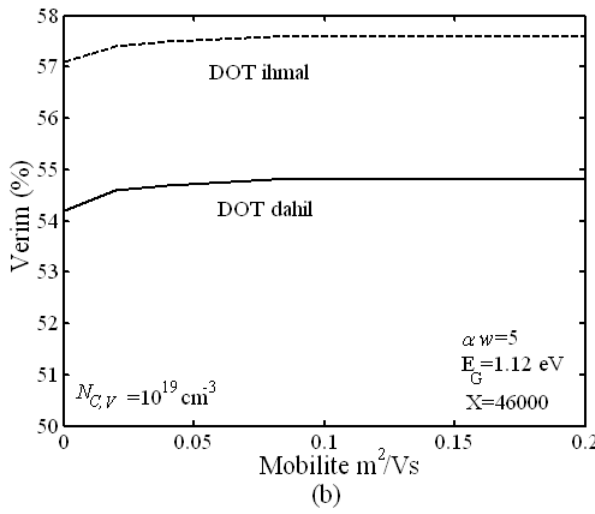
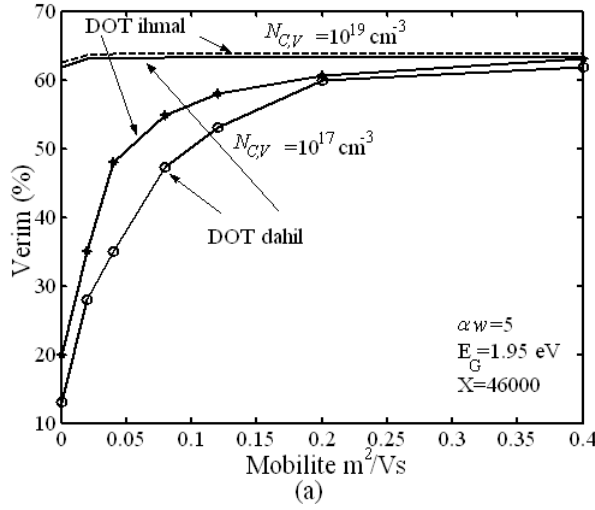
$$eD_h \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - rg5 \frac{\Delta p}{p_{eq}} - rg6 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} = -g_e - g_{eh} \quad (4.15.b)$$

Eş. 4.15 çifti, Eş. 3.50 ile verilen sınır koşulları kullanılarak, sonlu elemanlar metodu ile çözülmüştür. Etkin enerji durum yoğunluğunun ve DOT’un verime etkisini incelemek için,  $E_G=1,95$  eV seçilmiş, iletkenlik ve valans bandındaki etkin enerji durum yoğunluğunun ( $N_C$  ve  $N_V$ ) iki farklı değeri için, ABGP’de verimin mobilitelere karşı değişimi Şekil 4.13’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, etkin enerji durum yoğunluğunun küçük ( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) olduğu ABGP’nin verimi, taşıyıcı mobilitesinden daha fazla etkilenmektedir. Özellikle, mobilitenin  $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ’den küçük olduğu durumlarda verim hızla düşmektedir. Bunun sebebi, mobiliteler ile doğru orantılı olan difüzyon uzunluğunun azalmasıdır. Difüzyon uzunluğu baz kalınlığından daha küçük

olduğunda, üretilen taşıyıcılar akıma katkıda bulunamadan yok olmakta ve sonuç olarak, devrenin akımı ve verimi azalmaktadır. Etkin enerji durum yoğunluğu büyük ( $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) olan ABGP'de ise, kuasi-sürüklenme-difüzyon modeli ile elde edilen verim değeri, detaylı denge modeli ile elde edilen verim değerine yaklaşmaktadır. Ancak, mobilitenin çok küçük değerlerinde ( $\mu < 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) verimde bir miktar azalma görülmektedir. Sonuç olarak, etkin enerji durum yoğunluğu  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ve daha büyük olduğunda ve mobilité de yeteri kadar büyük olduğunda ( $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ), detaylı denge modeli ile hesaplanan verim hedefine ulaşılmaktadır. Bir başka deyişle difüzyon uzunluğu baz kalınlığından büyük olmakta ve üretilen taşıyıcılar akıma katkıda bulunabilmektedir. Maksimum konsantrasyon altında çalıştığımız için mobilité değerlerinin düşmesi kaçınılmazdır [100]. Mobilitédeki azalmadan en az etkilenmek için etkin enerji durum yoğunluğu büyük olan malzemeler tercih edilmelidir. Şekil 4.13.b'de,  $E_G=1,12 \text{ eV}$  olan ABGP veriminin mobilité ile değişimi görülmektedir. Bu ABGP için silisyumun etkin enerji durum yoğunluğu değerleri kullanılmıştır ( $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinde) ve şekilden de görüldüğü gibi verim, mobilitenin çok küçük değerlerinde biraz etkilenmektedir.

Şekil 4.13.a ve b'de verim değerleri, DOT modele dahilken ve değilken bulunmuştur. DOT modele dahil edilmediğinde verim, detaylı denge modeli ile elde edilen değerden ( $E_G=1,95 \text{ eV}$  için %63,2,  $E_G=1,12 \text{ eV}$  için %54,8) bile daha yüksek ( $E_G=1,95 \text{ eV}$  için %63,8,  $E_G=1,12 \text{ eV}$  için %57,6) bulunmuştur. DDM ile bulunan termodinamik verim maksimum sınırdır. DOT ihmal edildiğinde verimin termodinamik verim sınırından büyük çıkmasının sebebi, yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarında meydana gelen hatadır. DOT modele dahil edildiğinde ve etkin enerji durum yoğunluğu  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  alındığında verim, mobilitenin yeteri kadar büyük değerleri için detaylı denge modelinde elde edilen sonuçlarla uyum sağlamaktadır. Aynı ışık konsantrasyonu ve etkin enerji durum yoğunluğu için ( $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), verimin DOT ile değişiminin küçük bant aralıklı ( $E_G=1,12 \text{ eV}$ ) olan ABGP'de daha fazla olduğu tesbit edilmiştir (%3).

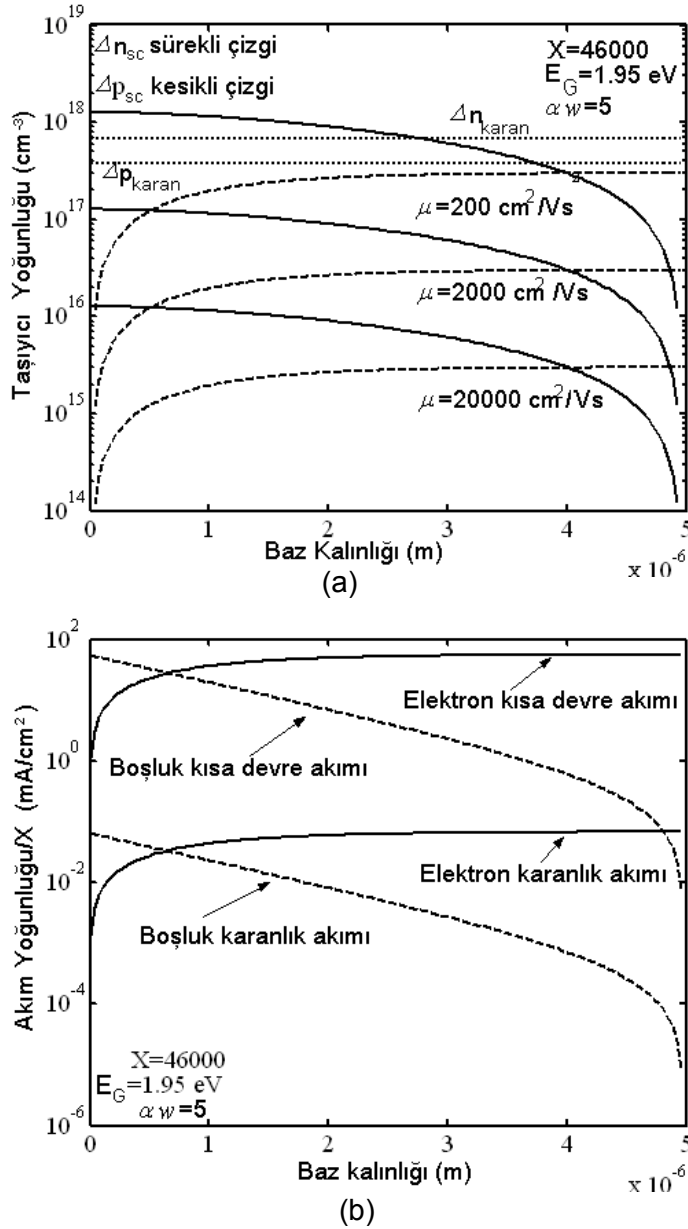
Işık konsantrasyonunun ve bant aralığının farklı değerleri için verimin DOT ile değişimi sırasıyla, Bölüm 4.2.3 ve 4.2.4’de sunulmuştur.



Şekil 4.13. Verimin taşıyıcı mobilitesi ile değişimi; (a)  $E_G=1,95$  eV için,  $N_{C,V}$   $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  (yuvarlak ve yıldızla gösterilen eğriler) ve  $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$  (sürekli ve kesikli çizgiler) mertebelerinde, (b)  $E_G=1,12$  eV için  $N_{C,V}$   $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$  mertebesinde

Etkin enerji durum yoğunluğunun  $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$  mertebesinde olma durumunda,  $E_G=1,95$  eV için, taşıyıcı mobilitelerindeki değişimin, elektron ve boşluk konsantrasyonları üzerindeki etkisi Şekil 4.14.a’da, elektron ve boşluk akım yoğunlukları üzerindeki etkisi ise Şekil 4.14.b’de sunulmuştur. Buna göre ışık altında, kısa devre durumunda, mobiliteler azaldıkça elektron ve boşluk

konsantrasyonlarının arttığı görülmüştür. Kısa devre akım yoğunlukları ise mobilitenin değişmesinden etkilenmemiştir (Bkz Şekil 4.14.b).



Şekil 4.14. Taşıyıcı mobilitelerinin farklı değerleri için, kısa devre ve karanlık durumlarda, (a) elektron ve boşluk konsantrasyonlarının, (b) elektron ve boşluk akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimleri

Karanlık durumda, mobilitenin değişimi ne taşıyıcı konsantrasyonunu ne de akım yoğunluklarını etkilemiştir. Etkin enerji durum yoğunlukları azaltıldığında

( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinde), mobilitenin azalması, kısa devre akım yoğunluğunun azalmasına dolayısı ile de verimin düşmesine sebep olmaktadır.

Son olarak, mobilite ve etkin enerji durum yoğunluğunun ABGP verimi üzerindeki etkilerini özetleyecek olursak, ABGP fotoakımının maksimum olabilmesi için mobilitenin ve etkin enerji durum yoğunluğunun büyük olması gerekmektedir. Mobilite, taşıyıcıların difüzyon mesafesini belirleyen etkenlerden biridir. Mobilite azalırsa difüzyon uzunluğu azalmaktadır. Difüzyon uzunluğu, baz kalınlığından küçük olduğunda, taşıyıcılar devre akımına katkıda bulunamadan rekombinasyonla yok olmaktadır. Etkin enerji durum yoğunluğu ise taşıyıcı sayısını belirleyen etkenlerden biridir. Etkin enerji durum yoğunluğu küçük olursa, taşıyıcı sayısı azalmaktadır. Hem mobilite hem de etkin enerji durum yoğunluğunun küçük olması durumunda ise, akıma katkıda bulunabilen taşıyıcı sayısı hızla düşmekte ve foto akım azalmaktadır. Mobilite ve etkin enerji durum yoğunluğu parametrelerinden birinin büyük olması ise diğerinin etkisini kompanse edebilmekte ve verimin düşmesini engellemektedir.

#### 4.2.3. ABGP veriminin ışık konsantrasyonu ile değişimi

Bu bölümde  $E_G=1,95 \text{ eV}$  ve  $E_G=1,12 \text{ eV}$  için ışık konsantrasyonu değiştiğinde verimin nasıl değiştiği araştırılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.15 ve 4.16'daki gibi bulunmuştur.  $E_G=1,95 \text{ eV}$  için etkin enerji durum yoğunluğuna  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  değeri verilerek,  $\mu=200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\mu=2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ve  $\mu=20000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  için verim hesaplanmıştır.  $E_G=1,12 \text{ eV}$  için yapılan çözümlemelerde ise silisyum elementine ait etkin enerji durum yoğunluğu ve mobilite değerleri kullanılmıştır ( $N_{C,V}=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu=200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ). Yapılan çalışmada, konsantrasyondaki artışın taşıyıcı mobilitelerini etkilemediği varsayılmıştır.

Şekil 4.15 ve 4.16'daki değişimler aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilirler.

a)  $E_G=1,95$  eV için,

i) DOT ihmal edildiğinde:

$$\mu=20\ 000\ \text{cm}^2/\text{Vs'de} \quad \text{Verim}=44,84+4,06\log_{10}(X) \quad (4.16.a)$$

$$\mu=2000\ \text{cm}^2/\text{Vs'de} \quad \text{Verim}=42,62+3,88\log_{10}(X) \quad (4.16.b)$$

$$\mu=200\ \text{cm}^2/\text{Vs'de} \quad \text{Verim}=33+2,85\log_{10}(X) \quad (4.16.c)$$

ii) DOT dahil edildiğinde:

$\mu=20\ 000\ \text{cm}^2/\text{Vs'de}$ ,

$$X \leq 1000 \text{ için: } \text{Verim}=44,84+4,06\log(X) \quad (4.17.a)$$

$$X > 1000 \text{ için: } \text{Verim}=44,84+4,06\log(X)-0,1287\log(X) \quad (4.17.b)$$

$\mu=2000\ \text{cm}^2/\text{Vs'de}$ ,

$$X \leq 1000 \text{ için: } \text{Verim}=42,62+3,88\log(X) \quad (4.18.a)$$

$$X > 1000 \text{ için: } \text{Verim}=42,62+3,88\log(X)-0,1716\log(X) \quad (4.18.b)$$

$\mu=200\ \text{cm}^2/\text{Vs'de}$   $X \leq 1000$  için Eş. 4.16.c geçerlidir.  $X > 1000$  için ise, verimdeki değişim doğrusal olmadığı için bir eşitlik çıkarılmamıştır.

b)  $E_G=1.12$  eV için,

i) DOT ihmal edildiğinde:

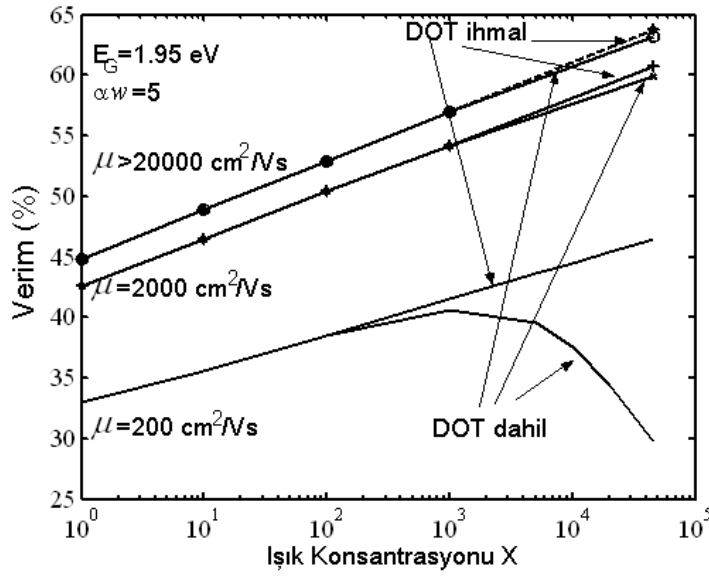
$$\text{Verim}=29,9+5,9\log(X) \quad (4.19.a)$$

ii) DOT dahil edildiğinde:

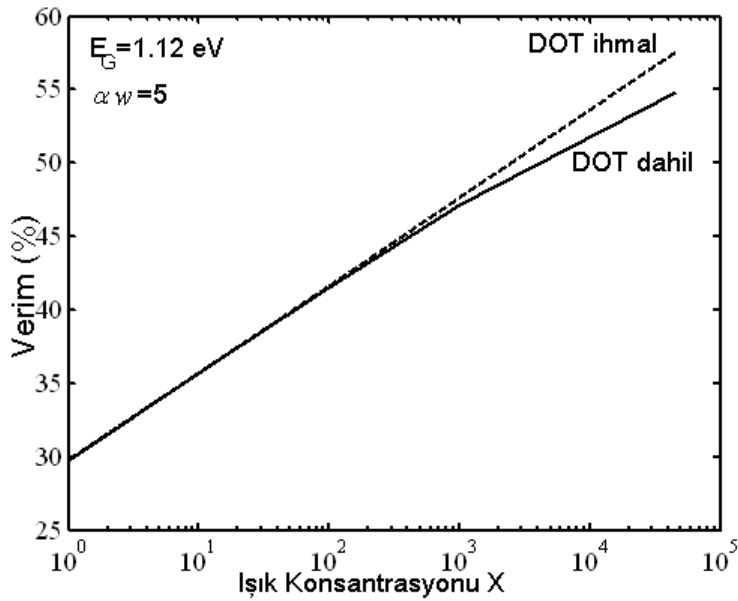
$$X \leq 1000 \text{ için: } \text{Verim}=29,9+5,9\log(X) \quad (4.19.b)$$

$$X > 1000 \text{ için: } \text{Verim}=29,9+5,9\log(X) -0,57\log(X) \quad (4.19.c)$$

Şekil 4.15'de,  $E_G=1,95$  eV için,  $\mu=2000\ \text{cm}^2/\text{Vs}$  ve  $\mu=20000\ \text{cm}^2/\text{Vs}$  değerlerinde, ABGP veriminin ışık konsantrasyonu ile arttığı, DOT'un ise  $X=2000$ 'den daha büyük değerlerde çok küçük bir hataya sebep olduğu görülmüştür (%1).  $\mu=200\ \text{cm}^2/\text{Vs}$  için, DOT ihmal edildiğinde, verim ışık konsantrasyonu ile artmakta, DOT modele dahil edildiğinde ise,  $X=1000$ 'den daha büyük ışık konsantrasyonlarında, verim hızla azalmakta ve  $X=46000$  için %29,7'ye düşmektedir.



Şekil 4.15.  $E_G = 1.95$  eV için  $N_{CV} = 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> durumunda, farklı mobilite değerleri için, DOT dahilken ve değilken, verimin ışık konsantrasyonu ile değişimi

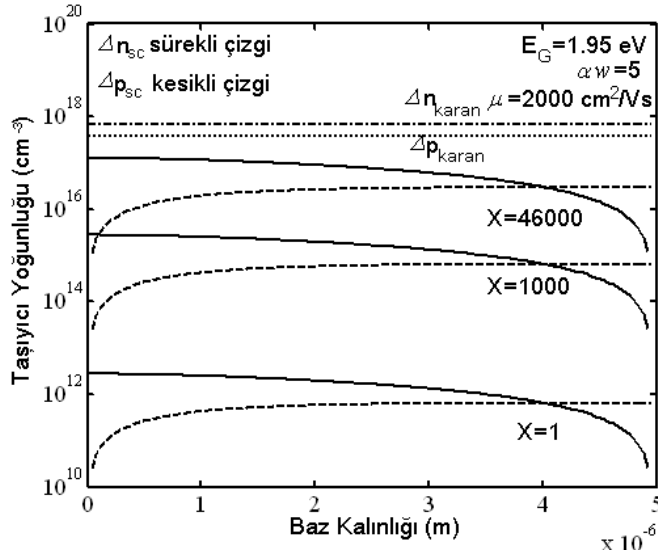


Şekil 4.16.  $E_G = 1.12$  eV için,  $N_{CV} = 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> durumunda, DOT dahilken ve değilken, verimin ışık konsantrasyonu ile değişimi

Bölüm 4.2.1'de görüldüğü gibi, mobilite değeri düştükçe, taşıyıcı konsantrasyonu artmaktadır. Bunun sonucu olarak DOT'da yer alan  $\Delta n x \Delta p$  ifadesi artarak, verimin azalmasına yol açmaktadır. Şekil 4.16'da görüldüğü

gibi,  $E_G=1,12$  eV için, ışık konsantrasyonu arttıkça ABGP verimi artmaktadır. Ancak p-n eklem güneş pilleri üzerinde yapılan ölçümlerde, ışık konsantrasyonunun 100'den daha büyük değerleri için verimin artmadığı, tam tersine azaldığı rapor edilmiştir [100].

Işık konsantrasyonundaki değişimin taşıyıcı yoğunluğuna olan etkisi Şekil 4.17'de görülmektedir. Kısa devre durumunda elektron ve boşluk yoğunlukları, ışık konsantrasyonu arttıkça artmaktadır.  $X=1$  kabul edildiğinde  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  mertebelerinde olan taşıyıcı konsantrasyonları,  $X=46000$ 'de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  mertebesine yükselmektedir.

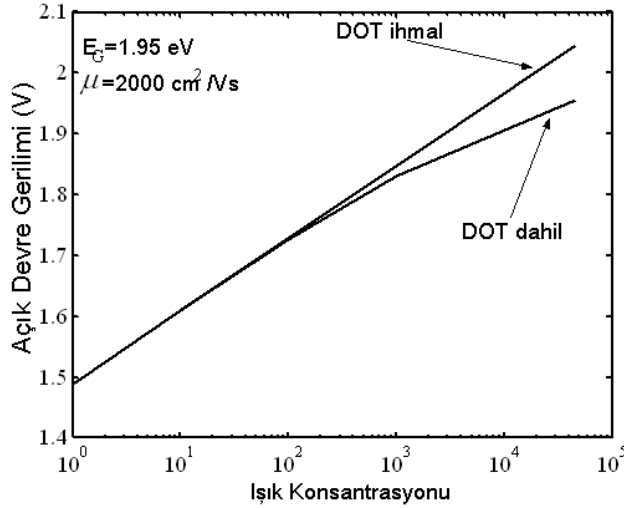


Şekil 4.17.  $E_G=1,95$  eV için kısa devre ve karanlık elektron ve boşluk yoğunluklarının ışık konsantrasyonu ile değişimleri

Karanlık durum taşıyıcı yoğunlukları ise ışık konsantrasyonundan bağımsızdır. Çalışma noktası değiştirilmediği sürece karanlık taşıyıcı yoğunluğunda değişiklik meydana gelmemektedir.

Kısa devre akım yoğunluğu ışık konsantrasyonu ile doğrusal olarak artmaktadır ( $J_{sc}/X$  değişmemektedir). Karanlık durum akım yoğunluğu ise ışık konsantrasyonundan etkilenmemekte ancak çıkış gerilimine bağlı olarak değişmektedir. Çıkış gerilimi değiştirilmeden ışık konsantrasyonu arttırılırsa akımın toplam değerinde de bir artış oluşmaktadır ( $J_{top}=J_{sc}-J_{dark}$ ). Bunun

sonucunda, maksimum çalışma noktasındaki çıkış gerilimi ve açık devre gerilimi artarak ABGP veriminde iyileştirme sağlamaktadır.  $E_G=1,95$  eV için, DOT modele dahilken ve değilken, açık devre geriliminin ışık konsantrasyonu ile değişimi Şekil 4.18’de sunulmuştur.



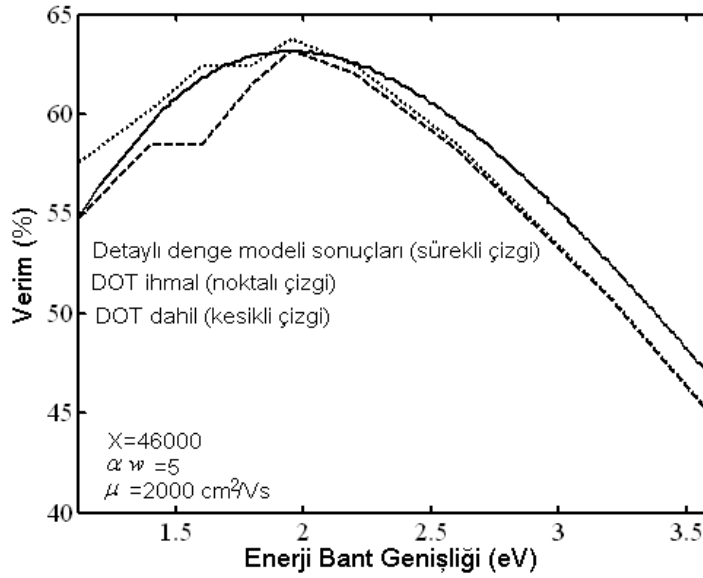
Şekil 4.18.  $E_G=1,95$  eV için açık devre geriliminin ışık konsantrasyonu ile değişimi

Şekil 4.18’de açık devre gerilimindeki değişim, Şekil 4.15’de verilen verim değişimine benzemektedir. Burada ilginç olan, DOT’un verim için ışık konsantrasyonunun 2000’den daha büyük değerlerinde etkin olurken, açık devre gerilimi için 200’den büyük değerlerinde etkin olmasıdır. Yani  $200 < X < 2000$  aralığında DOT verimde bir hataya sebep olmamakta fakat çıkış geriliminde hataya sebep olmaktadır. Bunun anlamı, maksimum çalışma noktasının değişmemesi, sadece çıkış geriliminin, dolayısı ile de doluluk faktörünün değişmesidir.

#### 4.2.4. ABGP veriminin enerji bant genişliği ile değişimi ve DOT etkisi

Bu bölümde farklı enerji bant genişliğine sahip ara bant yapıllı güneş pillerinde, verimin nasıl değiştiği, nonlineeerlik terimi modele dahilken ve değilken incelenmiştir.  $X=46000$ ,  $\mu=2000$  cm<sup>2</sup>/Vs ve  $N_{C,V}=10^{19}$  cm<sup>-3</sup> için elde

edilen neticeler Şekil 4.19'da,  $X=46000$  ve  $1000$ ,  $\mu=200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ve  $N_{C,V}=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  için elde edilen neticeler Şekil 4.20'de sunulmuştur.

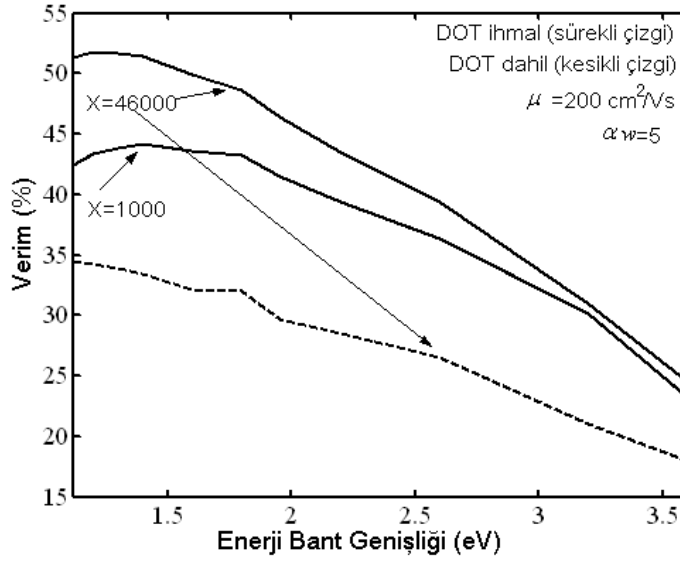


Şekil 4.19. Enerji durum yoğunluğu  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinde iken ABGP veriminin  $E_G$  ile değişimi

Mobilitenin  $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'den daha büyük değerlerinde verim eğrisi, Şekil 4.19'da sürekli çizgi ile gösterilen detaylı denge modeli eğrisi ile uyuşmaktadır.  $N_{C,V}=10^{19} \text{ cm}^{-3}$  için, mobilite azaldığında ve DOT modele dahil edildiğinde verimde az miktarda düşme meydana gelmektedir. DOT'un etkisi, küçük bant genişliklerinde verimde %3'e varan azalmaya sebep olurken, büyük bant genişliklerinde neredeyse hiç etkili olmamaktadır. Çünkü enerji bant aralığı arttıkça taşıyıcı konsantrasyonu azalmaktadır. Detaylı denge modeli sonuçlarında olduğu gibi burada da maksimum verimi sağlayan optimum bant genişliği  $1,95 \text{ eV}$ 'dur.

$N_{C,V}=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  için,  $X=46000$  ve  $\mu=200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  iken, verim-enerji bant genişliği değişimi, detaylı denge modeli sonuçlarından oldukça farklı çıkmıştır (Şekil 4.20). DOT ihmal edildiğinde maksimum verim  $E_G=1,3 \text{ eV}$ 'da yaklaşık %52 iken DOT hesaba katıldığında bu verim %34'e düşmektedir.  $1,3 \text{ eV}$ 'dan itibaren enerji bant genişliği attıkça verim azalmaktadır ( $E_G=1,95 \text{ eV}$  için %29,7). Işık konsantrasyonu arttıkça, taşıyıcı yoğunluğunun artması ve mobilitenin düşmesi kaçınılmazdır. Şekil 4.20'de görüldüğü gibi çok yüksek

ışık yoğunluğunda çalışmak ABGP veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Işık konsantrasyonu 1000 olduğunda, DOT'un etkisi ihmal edilebilecek kadar az olmaktadır. Verim ise  $X=46000$  durumundan daha yüksek olmaktadır. Maksimum verim  $E_G=1,4$  eV'da %44 olarak elde edilmektedir.



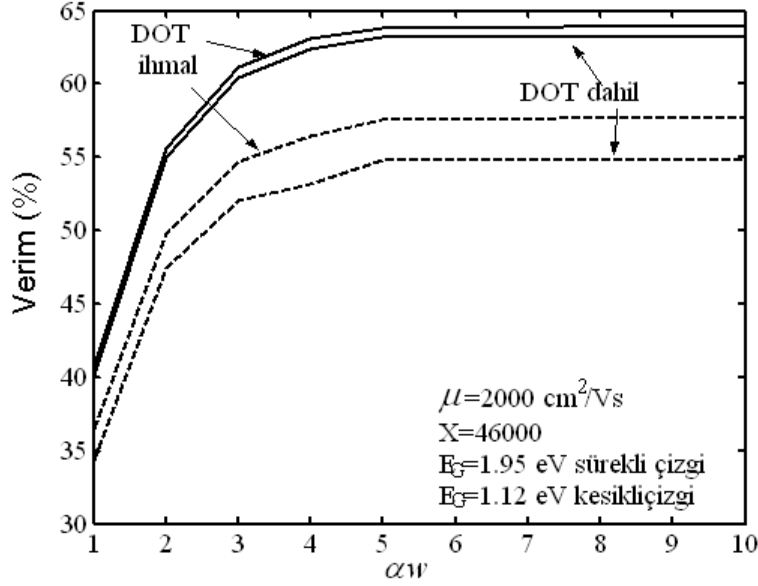
Şekil 4.20. Enerji durum yoğunluğu  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinde iken ABGP veriminin  $E_G$  ile değişimi

Sonuç olarak, ABGP yapımında kullanılan yarı iletken malzemeye göre belirlenen etkin enerji durum yoğunlukları yeteri kadar büyükse ( $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ve üzeri) verim taşıyıcı mobilitesinin azalmasından çok fazla etkilenmemekte ve optimum enerji bant aralığı değişmemektedir. Etkin enerji durum yoğunluklarının küçük olduğu durumlarda ise, yüksek ışık konsantrasyonunda, verimde ciddi miktarda bir azalma meydana gelmekte ve optimum enerji bant aralığı 1,3 eV'a doğru kaymaktadır.

#### 4.2.5. ABGP veriminin baz kalınlığı ile değişimi

Verimin baz kalınlığı ile değişimi detaylı denge modeli kullanılarak elde edilmiş ve Bölüm 2.1.1.5'te sunulmuştu. Burada kuasi sürüklenme difüzyon modeli kullanılarak  $E_G=1,95$  ve 1,12 eV için verimin  $\alpha w$  ile değişimi Şekil

4.21'deki gibi bulunmuş ve detaylı denge modeli ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.21.  $E_G = 1,95$  eV ve  $E_G = 1,12$  eV için verimin  $\alpha w$  ile değişimi

Şekil 4.21'den, ABGP verimini maksimum yapabilmek için  $\alpha w \geq 5$  koşulunun sağlanması gerektiği görülmektedir.  $\alpha w$  için daha küçük değerler verildiğinde, ABGP yüzeyine gelen fotonların tamamı soğurulamadığı için verim düşük olmaktadır. Şekil 4.21'de DOT'un etkisi de gösterilmiştir. Buna göre DOT,  $\alpha w$ 'nın büyük değerlerinde verimi daha fazla etkilemektedir. Burada küçük  $E_G$ 'li ABGP'de (1,12 eV) DOT etkisi, büyük  $E_G$ 'li ABGP'den (1,95 eV) daha fazladır. Çünkü, aynı ışıma konsantrasyonu değerinde, küçük  $E_G$ 'li ABGP'de oluşan fazlalık taşıyıcı sayısı, büyük  $E_G$ 'li ABGP'de oluşandan daha fazladır. Taşıyıcı ve akım yoğunluklarının  $\alpha w$  ile değişimi Bölüm 4.2.7'de elektrik alan etkisi ile birlikte verilmiştir.

#### 4.2.6. ABGP veriminin örtüşme ile değişimi

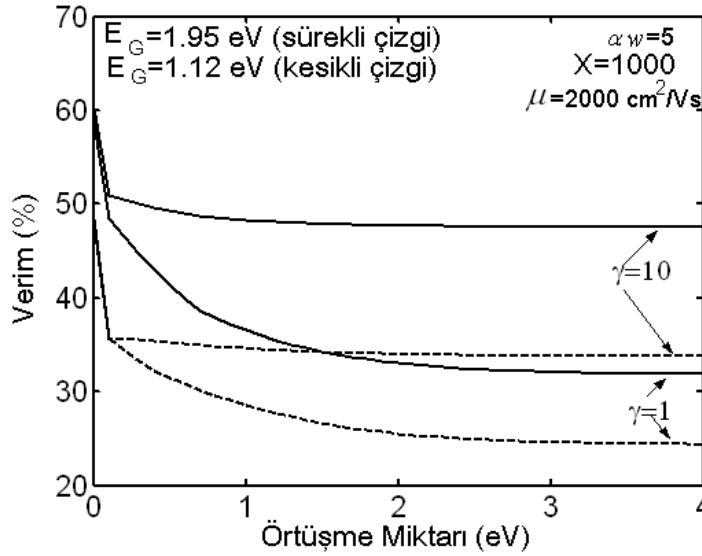
Bu bölüme kadar kuasi sürüklenme difüzyon modeli ile elde edilen sonuçlarda, soğurma katsayıları arasında örtüşme olmadığı varsayılmıştı. Bu

bölümde örtüşme terimleri de hesaba katılarak Eş. 3.49.a ve b ile verilen sistem aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$eD_e \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - rg1 \frac{\Delta n}{n_{eq}} - rg2 \frac{\Delta p}{p_{eq}} - rg3 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} - r_{int}1 \frac{\Delta n}{n_{eq}} - r_{int}2 \frac{\Delta p}{p_{eq}} - r_{int}3 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} = -g_e - g_{eh} \quad (4.20.a)$$

$$eD_h \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - rg4 \frac{\Delta n}{n_{eq}} - rg5 \frac{\Delta p}{p_{eq}} - rg6 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} - r_{int}4 \frac{\Delta n}{n_{eq}} - r_{int}5 \frac{\Delta p}{p_{eq}} - r_{int}6 \frac{\Delta n \Delta p}{n_{eq} p_{eq}} = -g_e - g_{eh} \quad (4.20.b)$$

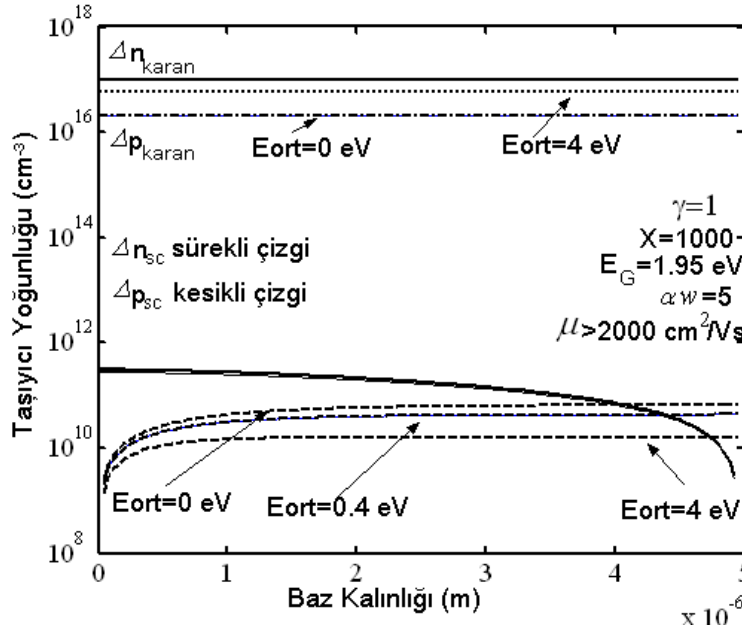
Örtüşmenin ABGP performansı üzerindeki etkileri, detaylı denge modeli kullanılarak Bölüm 4.1’de ayrıntılı bir şekilde incelenmişti. Burada kuasi sürüklenme difüzyon modeli ile örtüşmenin verim üzerindeki etkisinin yanı sıra, detaylı denge modeli ile incelenmesi mümkün olmayan taşıyıcı ve akım yoğunlukları üzerindeki etkileri incelenmiştir.  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV için  $X=1000$ ,  $\mu=2000$  cm<sup>2</sup>/Vs,  $N_{C,V}=10^{19}$  cm<sup>-3</sup> değerleri ve örtüşmesiz optimum AB seviyeleri kullanılarak (örtüşmeli AB seviyelerinin etkisi Bölüm 4.1.1’de verilmiştir),  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında gerçekleştirilen hesaplamalarda, verimin örtüşme miktarı  $E_{ort}$  ile değişimi Şekil 4.22’deki gibi elde edilmiştir. Daha önceki hesaplamalarımıza benzer şekilde, örtüşmenin küçük değerleri için (0,1 eV) verimde hızlı bir düşüş meydana gelmekte, 0,1-2 eV aralığında verimdeki azalma yavaşlamakta ve 2 eV’un üzerinde verimde hemen hemen hiç değişiklik olmamaktadır. Maksimum örtüşme altında (4 eV),  $\gamma=10$  durumunda  $\gamma=1$  durumuna nispetle verimde,  $E_G=1,95$  eV için yaklaşık %20 ve  $E_G=1,12$  eV için yaklaşık %10 iyileştirme sağlanmıştır.



Şekil 4.22.  $E_G = 1,95$  ve  $E_G = 1,12$  eV için, örtüşmesiz AB seviyesi kullanılarak,  $\gamma = 1$  ve  $\gamma = 10$  durumlarında verimin örtüşme miktarı ile değişimi

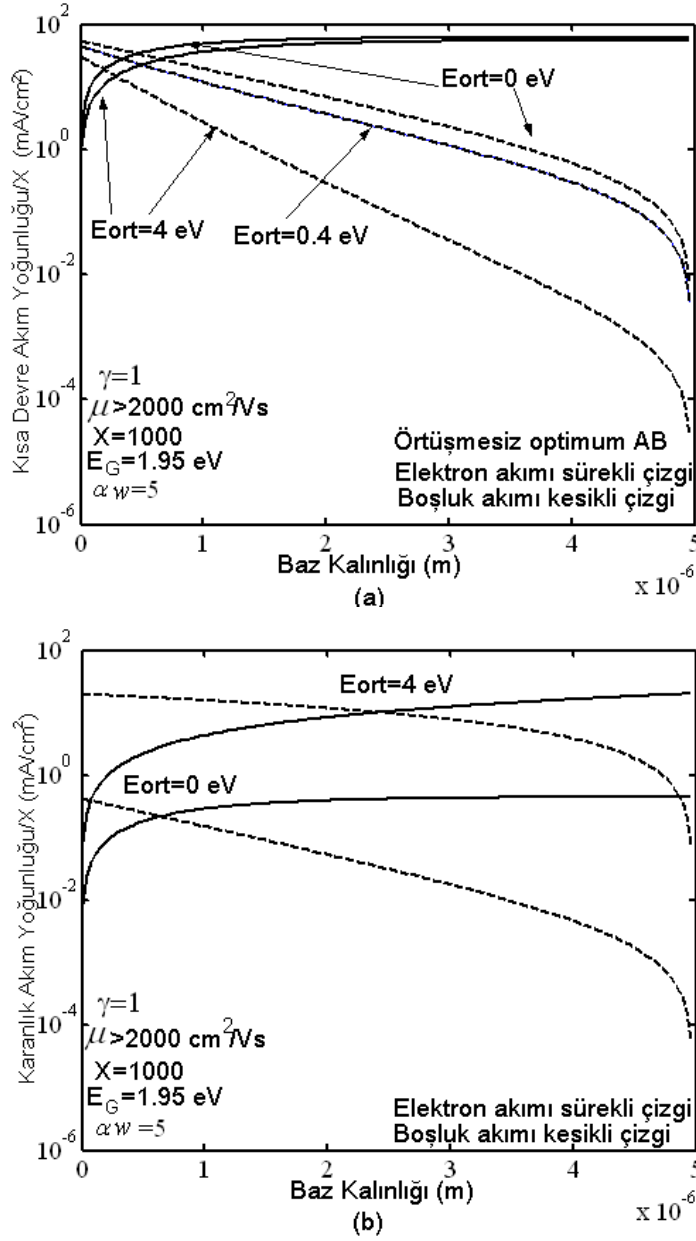
Soğurma katsayıları arasındaki örtüşmenin verimi azaltmasının sebebi, Bölüm 4.1.1'de de belirtildiği gibi, örtüşme ile kısa devre akım yoğunluğunun azalması ve dahili rekombinasyon teriminin ortaya çıkarak karanlık akımını arttırmasıdır. ABGP'de AB optimum seviyeye yerleştirildiğinde elektron ve boşlukların kısa devre akım yoğunlukları birbirine yaklaşık eşit olmaktadır. Örtüşmenin olmadığı durumlarda ABGP yüzeyine gelen foton enerjisi  $E_L < h\nu < E_H$  aralığında ise (AB iletkenlik bandına yakın) ara banttan iletkenlik bandına,  $E_H < h\nu < E_G$  aralığında ise valans banttan arabanda ve  $E_G < h\nu$  ise valans banttan iletkenlik bandına elektron geçişi sağlanmaktadır. Örtüşme meydana geldiğinde ise enerjisi  $E_H$ 'den büyük olan fotonlar ara banttan iletkenlik bandına,  $E_G$ 'den büyük olanlar ise valans banttan ara banda elektron geçirmeye devam etmektedir. Daha önce boşluk üreten ( $E_H < h\nu$ ) fotonların bir kısmının elektron üretmeye başlamasının sonucu olarak boşluk yoğunluğunda azalma meydana gelmektedir (Şekil 4.23). Elektron yoğunluğunda ise önemli bir değişiklik söz konusu değildir. Şekil 4.23'de,  $E_G = 1,95$  eV için, kısa devre ve karanlık durumlarda, örtüşmesiz ve örtüşmeli koşullarda, elektron ve boşluk yoğunluklarının değişimi görülmektedir. Elektron yoğunluğu örtüşme miktarında etkilenmezken boşluk yoğunluğu kısa

devre durumunda yukarıda anlatılan nedenlerden dolayı azalmakta, karanlık durumda ise dahili rekombinasyonun etkisi ile artmaktadır. Eğer AB valans banda yakın seçilseydi tam tersi bir durum ortaya çıkacak, yani boşluk yoğunluğu değil elektron yoğunluğu değişecekti.



Şekil 4.23.  $E_G=1,95$  eV için örtüşmenin farklı değerlerinde, kısa devre ve karanlık durumlarda elektron ve boşluk yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimi

Örtüşmenin taşıyıcı yoğunluklarında sebep olduğu değişiklik kısa devre ve karanlık akım yoğunluklarını da etkilemektedir. Şekil 4.24.a'da görüldüğü gibi kısa devre durumunda elektron akım yoğunluğunda çok az bir değişiklik vardır. Ancak boşluk akım yoğunluğu oldukça düşmüştür. ABGP kısa devre akım yoğunluğunu elektron ve boşluk akımlarından küçük olanı belirlemektedir. Elektron akım yoğunluğu pek fazla değişmese de boşluk akım yoğunluğundaki azalma ABGP kısa devre akım yoğunluğunu azaltmaktadır. Karanlık durum düşünüldüğünde ise çalışma noktası değiştirilmezse, hem elektron hem de boşluk akım yoğunlukları örtüşme ile artmaktadır (Şekil 4.24.b). Bu artışın nedeni örtüşme ile birlikte sisteme dahili rekombinasyonun girmesidir. Sonuç olarak, örtüşmenin etkisi ile fotoakım azalmakta, karanlık akım arttığı için maksimum çalışma noktası daha küçük çıkış gerilimlerine doğru kaymakta ve verim azalmaktadır.



Şekil 4.24.  $E_G=1,95$  eV için örtüşmenin farklı değerlerinde kısa devre (a) ve karanlık (b) akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimleri

#### Örtüşmeli optimum AB ve SRH rekombinasyon etkisi:

Bölüm 4.1.1’de örtüşmenin optimum AB seviyesi üzerindeki etkileri DDM ile incelenmişti. Burada KSDM kullanılarak, örtüşmeli optimum AB seviyesinin değişimi, SRH rekombinasyon etkisi ile birlikte verilecektir. Çizelge 4.10 ve 4.11’de sırası ile  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV olan ABGP’ler için  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$

durumlarında, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullarda,  $X=1000$  iken,  $\mu=2000$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $N_{C,V}=10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ve  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  değerleri için; yeni optimum AB seviyesi, etkin ışısız rekombinasyon ömür süresi  $\tau_{SHR}$  ve verim değerleri sunulmuştur. Çizelge 4.12'de ise,  $E_G=1,95 \text{ eV}$  ve  $E_G=1,12 \text{ eV}$  olan ABGP'ler için aynı koşullarda DDM ile yeniden bulunan verim, etkin  $\tau_{SHR}$ , ve optimum AB seviyesi değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.10.  $E_G=1,95 \text{ eV}$  için  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullarda,  $X=1000$ ,  $\mu=2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $N_{C,V}=10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ve  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  değerleri için, optimum AB seviyesi, etkin  $\tau_{SHR}$  ve verim değerleri

| $N_{C,V}$<br>( $\text{cm}^{-3}$ ) | Örtüş-<br>me<br>(eV) | $\gamma=1$                  |                                            |                                       |              | $\gamma=10$                 |                                         |                                       |              |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
|                                   |                      | Optimum AB<br>seviyesi (eV) | Etkin<br>$\tau_{SHR}$<br>( $\mu\text{s}$ ) | Baz<br>kalınlığı<br>( $\mu\text{m}$ ) | Verim<br>(%) | Optimum AB<br>seviyesi (eV) | Etkin $\tau_{SHR}$<br>( $\mu\text{s}$ ) | Baz<br>kalınlığı<br>( $\mu\text{m}$ ) | Verim<br>(%) |
| $10^{19}$                         | 0                    | 0,71                        | 20                                         | 5                                     | 57           | 0,71                        | 5000                                    | 500                                   | 56,2         |
|                                   | 4                    | Örtüşmesiz AB<br>0,71       | 5                                          | 1,3                                   | 32,7         | Örtüşmesiz AB<br>0,71       | 1000                                    | 350                                   | 47,3         |
|                                   |                      | Örtüşmeli AB<br>0,94        | 5                                          | 1,3                                   | 36           | Örtüşmeli AB<br>0,7         | 1000                                    | 350                                   | 49,2         |
| $10^{17}$                         | 0                    | 0,71                        | 0,2                                        | 5                                     | 56           | 0,57                        | 25                                      | 100                                   | 50,3         |
|                                   | 4                    | Örtüşmesiz AB<br>0,71       | 0,02                                       | 1,3                                   | 22,1         | Örtüşmesiz AB<br>0,57       | 15                                      | 100                                   | 33,2         |
|                                   |                      | Örtüşmeli AB<br>0,8         | 0,02                                       | 1,3                                   | 23,3         | Örtüşmeli AB<br>0,54        | 15                                      | 100                                   | 34,4         |

Çizelge 4.11.  $E_G=1,12 \text{ eV}$  için  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullarda,  $X=1000$ ,  $\mu=2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  değerleri için, optimum AB seviyesi, etkin  $\tau_{SHR}$  ve verim değerleri

| Örtüş-<br>me<br>(eV) | $\gamma=1$                  |                                            |                                       |              | $\gamma=10$                 |                                            |                                       |              |
|----------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
|                      | Optimum AB<br>seviyesi (eV) | Etkin<br>$\tau_{SHR}$<br>( $\mu\text{s}$ ) | Baz<br>kalınlığı<br>( $\mu\text{m}$ ) | Verim<br>(%) | Optimum AB<br>seviyesi (eV) | Etkin<br>$\tau_{SHR}$<br>( $\mu\text{s}$ ) | Baz<br>kalınlığı<br>( $\mu\text{m}$ ) | Verim<br>(%) |
| 0                    | 0,36                        | 500                                        | 50                                    | 47,2         | 0,36                        | 70000                                      | 3000                                  | 45           |
| 4                    | Örtüşmesiz AB<br>0,36       | 150                                        | 13                                    | 23,6         | Örtüşmesiz AB<br>0,36       | 40000                                      | 3000                                  | 34,5         |
|                      | Örtüşmeli AB<br>0,5         | 150                                        | 13                                    | 25,1         | Örtüşmeli AB<br>0,36        | 40000                                      | 3000                                  | 34,5         |

$E_G=1,95 \text{ eV}$  için,  $N_{C,V}=10^{19} \text{ cm}^{-3}$  iken, DDM ve KSDM ile elde edilen sonuçlar, uyumludur (Çizelge 4.10 ve 4.12). Her iki yöntemde de,  $\gamma=1$  durumunda, optimum AB seviyesi örtüşme miktarı ile bant aralığının ortasına doğru kaymış ve verim azalmıştır.  $\gamma=10$  durumunda ise, optimum AB hemen hemen

sabit kalmış, verimdeki azalma kompanze edilmiştir. Buna karşılık, gerekli olan optimum baz kalınlığı arttığı için, etkin  $\tau_{SHR}$  değeri de artmıştır.

Çizelge 4.12.  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV için  $\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, örtüşmeli ve örtüşmesiz koşullarda,  $X=1000$  iken, DDM ile bulunan, optimum AB seviyesi, etkin  $\tau_{SHR}$  ve verim değerleri

| $E_G$<br>(eV) | Örtüş-<br>me<br>(eV) | $\gamma=1$                  |                                      |                                 |              | $\gamma=10$                 |                                   |                                 |              |
|---------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------|
|               |                      | Optimum AB<br>seviyesi (eV) | Etkin<br>$\tau_{SHR}$<br>( $\mu s$ ) | Baz<br>kalınlığı<br>( $\mu m$ ) | Verim<br>(%) | Optimum AB<br>seviyesi (eV) | Etkin $\tau_{SHR}$<br>( $\mu s$ ) | Baz<br>kalınlığı<br>( $\mu m$ ) | Verim<br>(%) |
| 1,95          | 0                    | 0,71                        | 20                                   | 5                               | 57,4         | 0,71                        | 20000                             | 500                             | 57,4         |
|               | 4                    | Örtüşmesiz AB<br>0,71       | 2                                    | 1,3                             | 30,5         | Örtüşmesiz AB<br>0,71       | 2000                              | 190                             | 50,0         |
|               |                      | Örtüşmeli AB<br>0,97        | 2                                    | 1,3                             | 40           | Örtüşmeli AB<br>0,73        | 2000                              | 190                             | 51,3         |
| 1,12          | 0                    | 0,36                        | 800                                  | 5                               | 47,1         | 0,36                        | 20000                             | 5000                            | 47,1         |
|               | 4                    | Örtüşmesiz AB<br>0,36       | 8                                    | 1,3                             | 25,4         | Örtüşmesiz AB<br>0,36       | 1000                              | 1200                            | 38,7         |
|               |                      | Örtüşmeli AB<br>0,56        | 8                                    | 1,3                             | 30,3         | Örtüşmeli AB<br>0,36        | 1000                              | 1200                            | 38,7         |

Çizelge 4.10 ve 4.12 karşılaştırıldığında;  $E_G=1,95$  eV için,  $N_{C,V}=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  iken, DDM ve KSDM ile hesaplanan sonuçlar birbirinden oldukça farklı çıkmıştır.  $\gamma=1$  durumunda, örtüşme yokken, DDM ve KSDM ile bulunan optimum AB seviyesi ve verim değerleri yaklaşık birbirine eşit olmuştur. Örtüşme meydana geldiğinde ise, DDM'de 0,98 eV olan optimum AB seviyesi, KSDM'de 0,8 eV'a kaymış, %40 olan verim ise %23,3'e düşmüştür. DDM'de mikrosaniye mertebesinde olan etkin  $\tau_{SHR}$  değeri, KSDM'de nanosaniye mertebesine düşmüştür.  $\gamma=10$  ve örtüşmesiz durumunda, DDM'de 0,71 eV olarak bulunan optimum AB seviyesi, KSDM'de 0,57 eV olarak bulunmuş, %57,4 olan verim ise %50,3'e düşmüştür. Verimdeki bu azalmanın sebebi, çok büyük baz kalınlıklarında, zaten az olan taşıyıcıların ( $N_{C,V}=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) akıma katkıda bulunamadan kaybolmalarıdır. Örtüşme durumunda, KSDM'de verim oldukça düşmekte (yaklaşık %15), hedeflenen kompanzasyon sağlanamamaktadır. Etkin  $\tau_{SHR}$  değeri ise, DDM'ye kıyasla oldukça küçüktür.

Çizelge 4.11 ve 4.12 karşılaştırıldığında;  $E_G=1,12$  eV için, DDM ve KSDM sonuçları arasında kayda değer bir fark görülmemektedir. Sadece,  $\gamma=10$  durumunda, KSDM ile bulunan etkin  $\tau_{SHR}$  değerleri, DDM'ye göre daha büyüktür.

Sonuç olarak, etkin enerji durum yoğunluğunun, ABGP'nin optimum AB seviyesini, optimum baz kalınlığını, etkin  $\tau_{SHR}$  değerini ve verimini etkileyen çok önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. ABGP tasarımında, öncelikle kullanılan malzemenin etkin enerji durum yoğunluğu ve mobilité değerleri bilinmeli ve bunlara uygun tasarım gerçekleştirilmelidir.

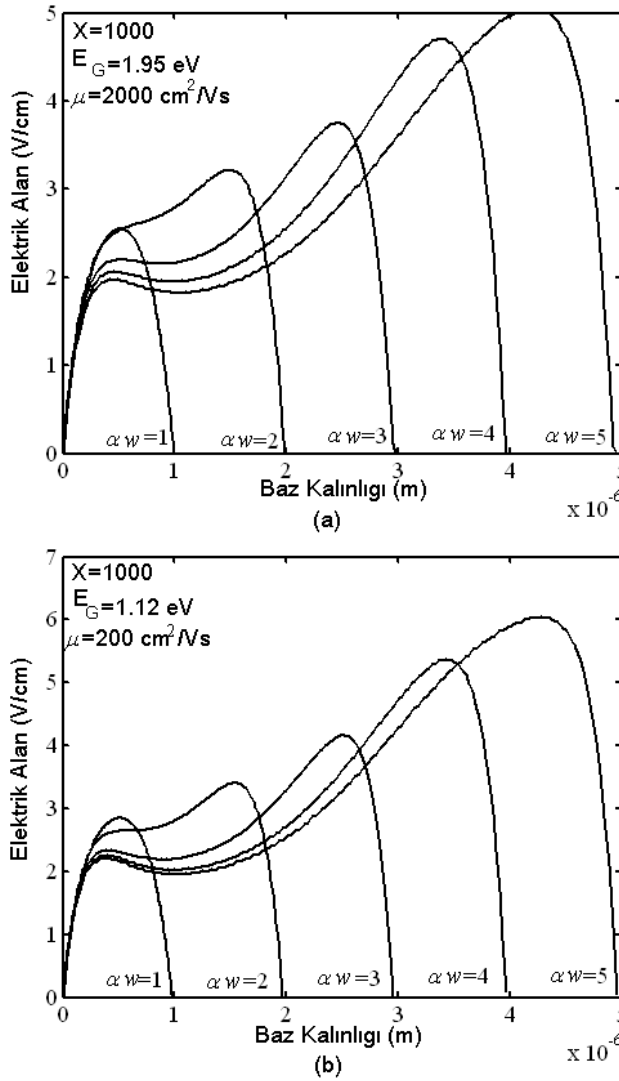
#### 4.2.7. Elektrik alan etkisi

Çalışmanın buraya kadar olan bölümlerinde elektrik alan ihmal edilmiş ve ABGP'de sadece difüzyon akımının aktığı, sürüklenme akımının akmadığı varsayılmıştı. Bu bölümde, AB yapılı baz bölgesinde elektron ve boşlukların fermi seviyelerindeki ayrılma miktarının sabit olmadığı,  $x$  ile değiştiği göz önüne alınarak, taşıyıcı ve akım yoğunlukları yeniden hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda Eş. 3.49 ve 3.50 eş zamanlı olarak çözülmüştür.  $X=1000$  durumunda,  $E_G=1,95$  için  $\mu=2000$  cm<sup>2</sup>/Vs ve  $E_G=1,12$  eV için  $\mu=200$  cm<sup>2</sup>/Vs alınarak farklı baz kalınlıkları için bulunan elektrik alan eğrileri Şekil 4.25.a ve b'de görülmektedir.

Elektrik alanın baz kalınlığı ile ters orantılı olması beklenmektedir. Ancak yapılan hesaplamalarda, elektrik alanın baz kalınlığı ile arttığı görülmüştür. Bunun sebebi ışımasız SHR hesaplamalara dahil edilmediğinden, baz kalınlığı arttıkça soğurulan foton miktarının, dolayısı ile de çıkış geriliminin artmasıdır. Elektrik alan gerilim ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

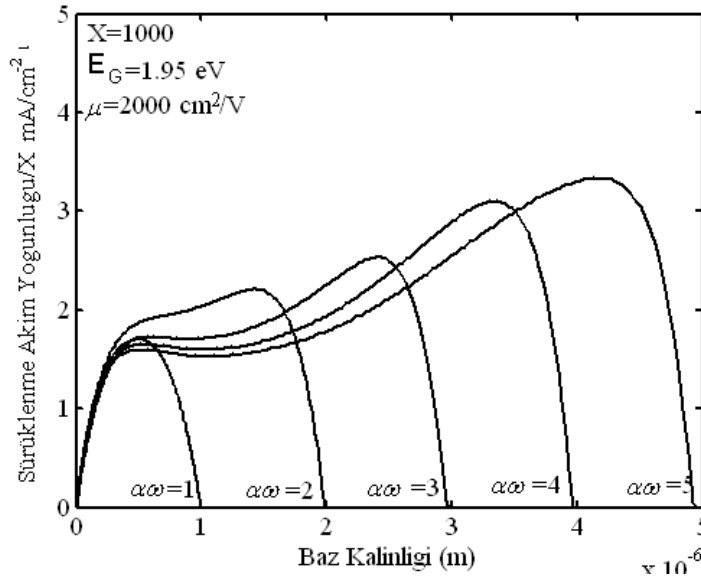
$E_G=1,95$  eV için sürüklenme akım yoğunluğu Şekil 4.26'daki gibi bulunmuştur. Sürüklenme akım yoğunluğu eğrisi elektrik alan eğrisine

benzemektedir. Şekil 4.25 ve 4.26'dan görüldüğü gibi elektrik alan ve sürüklenme akımı emitter uçlarında sıfır olmalıdır. Yani sürüklenme akımı, devrenin toplam akımına katılmamalıdır. Bunu sağlayabilmek için, Eş. 3.48'de verilen, ara banttaki elektron yoğunluğunda meydana gelen değişim,  $\Delta N_{De}$ , uygun değerde olmalıdır. Bu çalışmada, baz kalınlığının her değeri için uygun  $\Delta N_{De}$  değeri seçilmiştir. Her baz kalınlığı için seçilen bu  $\Delta N_{De}$  değerlerinin  $\alpha w$  ile değişimi Şekil 4.27'de verilmiştir.  $\Delta N_{De}$  değeri uygun seçilmediği takdirde elektrik alan emitter uçların sıfırlanmamakta ve sürüklenme akımı baskın hale gelerek ABGP verimini azaltmaktadır.



Şekil 4.25. Elektrik alanın farklı baz kalınlıkları için değişimi (a)  $E_G = 1.95$  eV, (b)  $E_G = 1.12$  eV

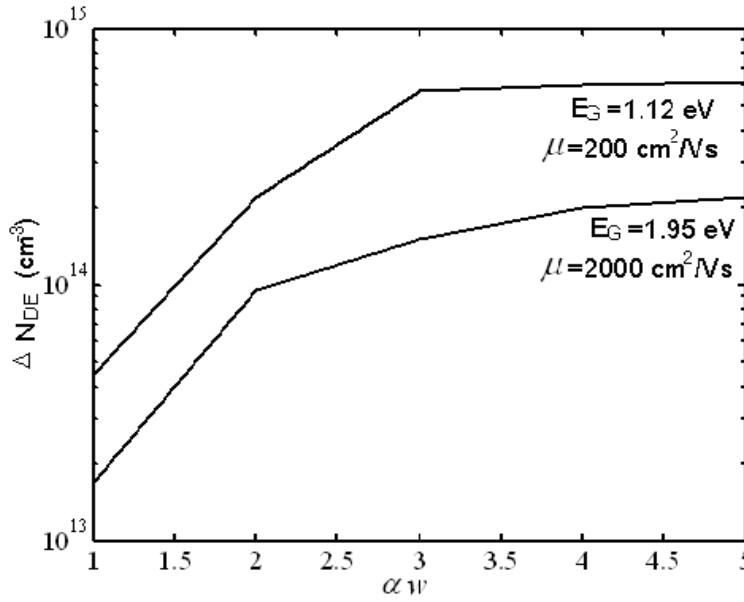
Şekil 4.23'den, taşıyıcı doyum hızları bulunup termal hız ( $v_T=10^7$  cm/s) doyum sınırı ile karşılaştırılmıştır.  $E_G=1,95$  eV için  $v_S=2000 \times 2,5=5 \times 10^3$  cm/s,  $E_G=1,12$  eV için  $v_S=200 \times 3=6 \times 10^2$  cm/s, olduğundan termal hız sınırının aşılmadığı görülmüştür.



Şekil 4.26.  $E_G=1,95$  eV için sürüklenme akım yoğunluğu değişimi

DDM'de, ara banttan akım çıkışı olmadığı varsayımından yola çıkılarak, verim hesapları yapılmıştı. KSDM'de ise, elektrik alan etkisi ile, ara banttan bir miktar akım katılımı olduğu tespit edilmiştir. Elektrik alan etkisi altında oluşan bu akımı sıfırlamak için,  $\Delta N_{De}-\alpha w$  değişimi Şekil 4.27'deki gibi olmalıdır.

Baz kalınlığı değiştikçe, ışık ile üretilen taşıyıcı yoğunlukları da değişmektedir. Şekil 4.28.a ve b'de  $E_G=1,95$  eV için elektrik alan modele dahilken ve değilken bulunan kısa devre taşıyıcı yoğunlukları görülmektedir. Her iki şekilde de görüldüğü gibi, baz kalınlığının artması, soğurulan foton miktarı arttırdığı için, elektron ve boşluk yoğunlukları da artmaktadır.

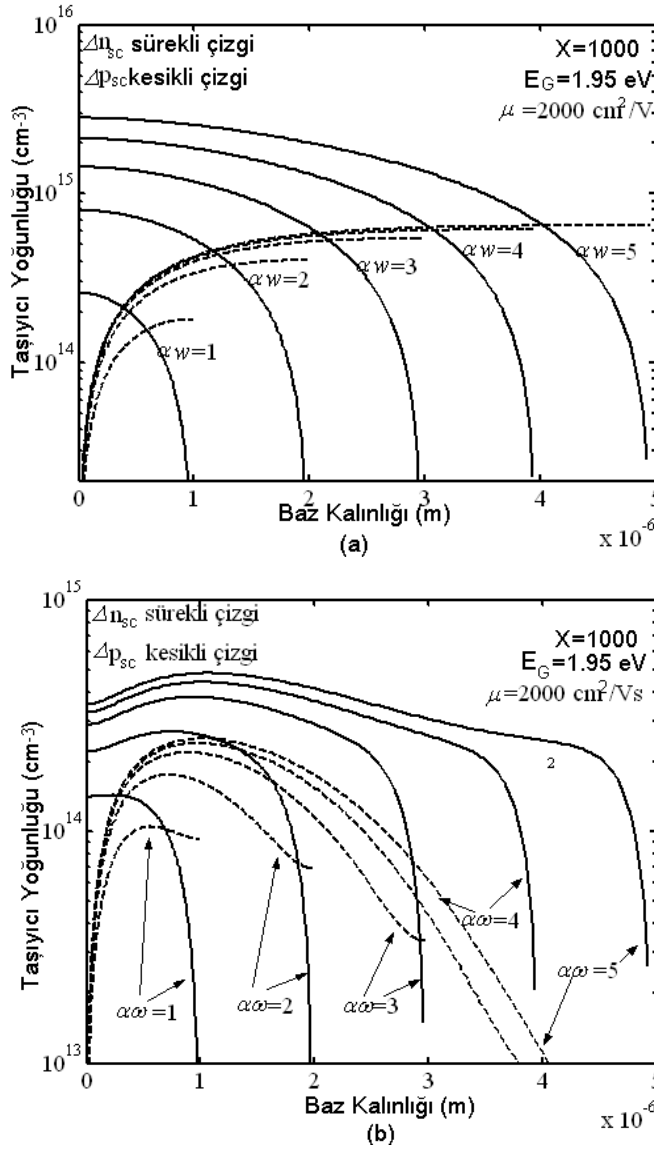


Şekil 4.27.  $E_G=1,95 \text{ eV}$  ve  $1,12 \text{ eV}$  için mobilitenin  $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ve  $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  değerlerinde,  $\Delta N_{DE}$ 'nin  $\alpha w$  ile değişimi

Şekil 4.28.a'da  $\alpha w$ 'nun 3'ten daha büyük değerleri için, boşluk yoğunluğunda önemli bir artış meydana gelmemektedir. ABGP'de fotoakımı elektron ve boşluk akımlarından küçük olanı belirlediği için,  $\alpha w$ 'nun 3'ten daha büyük değerlerinde, elektron yoğunluğu artsa da fotoakımda artış meydana gelmemekte ve verim de hemen hemen aynı kalmaktadır (Bkz. Şekil 4.21) Şekil 4.28.b'de, elektrik alan etkisi altında taşıyıcı yoğunluklarının dağılımında değişiklik olduğu görülmektedir. Elektrik alan emitter uçlarında sıfırlandığından devrenin fotoakımını etkilememektedir fakat taşıyıcı yoğunluğu dağılımını etkilemektedir. Baz kalınlığının küçük değerlerinde bu etki azken, büyük değerlerinde fazladır.  $\alpha w$ 'nun 3'ten daha büyük değerlerinde, boşluk yoğunluğu ABGP'nin arka yüzeyine doğru oldukça düşmektedir.

Sürüklenme akımı da emitter uçlarında sıfırlanmakta ve devrenin akımına katılmamaktadır fakat elektrik alan taşıyıcı yoğunluğu dağılımını değiştirdiği için devrenin karanlık akımı artmaktadır. Karanlık akımının artması da çalışma noktasının gerilimini düşürerek verimin azalmasına sebep olmaktadır.  $\alpha w$ 'nun 1-5 değerlerinde,  $E_G=1,95 \text{ eV}$  için elektrik alan modele

dahilken ve değilken elde edilen verim değeri Çizelge 4.13'te sunulmuştur. Elektrik alan ihmal edildiğinde,  $\alpha w = 5$  durumunda %56 civarında olan verim, elektrik alan dahil edildiğinde %47'ye düşmektedir. Bunun yanı sıra elektrik alan modele dahil edildiğinde karanlık akımı mobilite ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Karanlık akımını küçük tutabilmek için mobilitenin de küçük olması gerekmektedir.



Şekil 4.28. Kısa devre durumunda elektron ve boşlukların, farklı baz kalınlıkları için baz bölgesi boyunca dağılımları (a) Elektrik alan ihmal, (b) Elektrik alan dahil

Çizelge 4.13.  $E_G=1,95$  eV için elektrik alan modele dahilken ve değilken hesaplanan verim değerleri

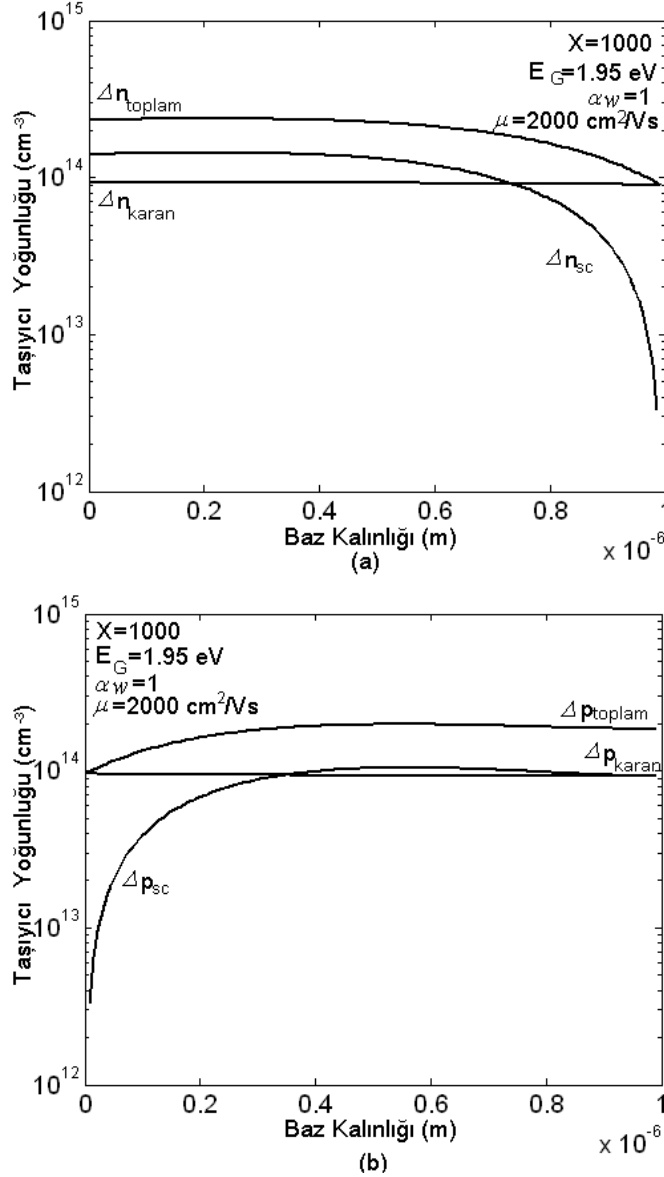
| $A_w$ | Verim (%)<br>(Elektrik alan ihmal) | Verim (%)<br>(Elektrik alan dahil) |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1     | 36                                 | 29                                 |
| 2     | 49                                 | 39                                 |
| 3     | 54                                 | 45                                 |
| 4     | 55                                 | 46                                 |
| 5     | 56                                 | 47                                 |

Şekil 4.29.a ve b’de,  $E_G=1,95$  eV için  $\alpha_w=1$  alınarak, aydınlık ve karanlık durumlardaki elektron ve boşluk yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimleri verilmiştir. Şekillerde maksimum güç noktasındaki toplam taşıyıcı yoğunlukları da sunulmuştur. Şekil 4.29.a ve b’de görüldüğü gibi  $\Delta n_{toplam}$  ve  $\Delta p_{toplam}$  yoğunlukları baz bölgesi boyunca çok az miktarda değişim göstermektedirler. Taşıyıcı yoğunluklarının baz bölgesi boyunca sabit kalması, kuasi-Fermi seviyelerinin ayrılma miktarının da baz bölgesi boyunca sabit olması anlamına gelmektedir.

$E_G=1,95$  eV için  $\alpha_w=1$  alınarak, elektron ve boşluklara ait, difüzyon ve toplam akım eğrileri, elektrik alanın/sürüklenme akımının ihmal (Şekil 4.30.a) ve dahil (Şekil 4.30.b) edilmesi durumları için elde edilmiştir.

Elektrik alan ihmal edildiğinde, toplam akım, baz bölgesi boyunca sabittir ve difüzyon akımları emitter uçlarında sıfırlanmaktadır. Elektrik alan dahil edildiğinde ise, toplam akımın baz bölgesi boyunca pek fazla değişim göstermediği, ancak, difüzyon akımlarının emitter uçlarına ulaşmadan azaldıkları görülmüştür. Difüzyon akım değişimlerindeki farklılığa rağmen, devrenin emitter uçlarındaki akım (devrenin çıkış akımı), elektrik alanın ihmal ve dahil edilmesi durumlarında aynı kalmaktadır. Çizelge 4.13’te verimin elektrik alan etkisi ile azalmasının sebebi ise, maksimum güç noktasındaki gerilim değerinin azalmasıdır. Maksimum güç noktasındaki çıkış gerilimi; elektrik alan ihmal edildiğinde 1,66 V iken, elektrik alan dahil edildiğinde 1,28

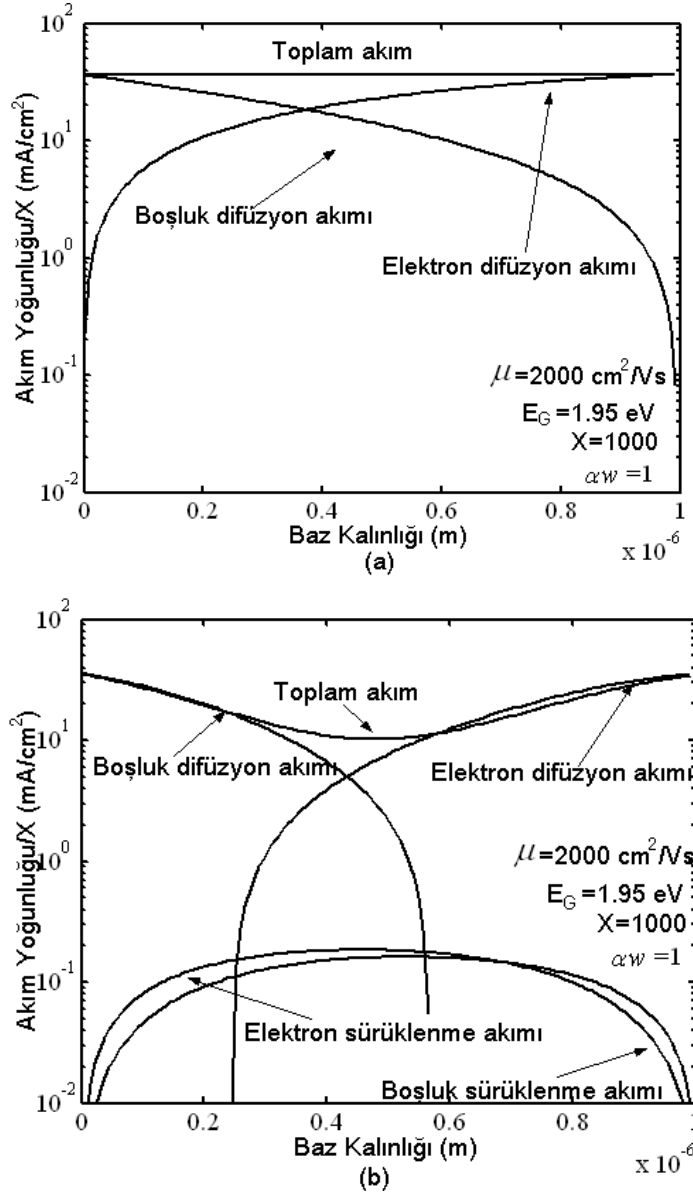
V'a düşmektedir. Ayrıca, Şekil 4.30.b'ye göre sürüklenme akımının, difüzyon akımına kıyasla çok küçük olduğu tespit edilmiştir.



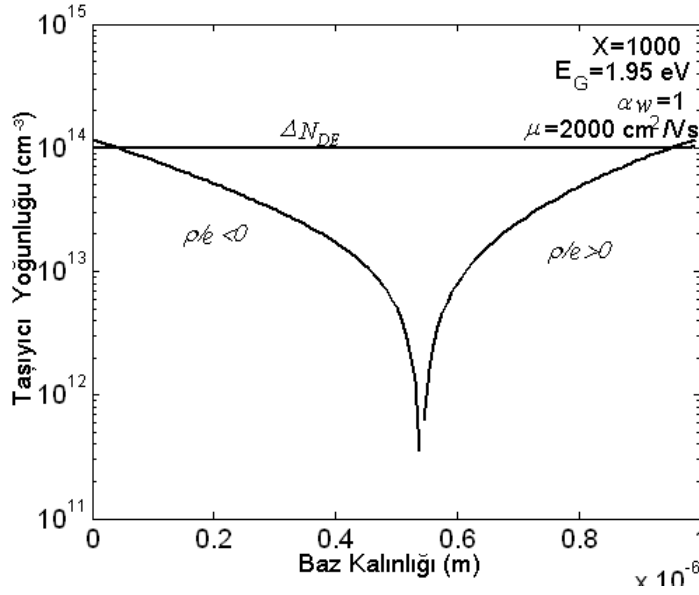
Şekil 4.29.  $E_G=1,95 \text{ eV}$  için  $\alpha_W=1$  iken, kısa devre, karanlık durum ve toplam elektron (a) ve boşluk (b) yoğunluğunun baz bölgesi boyunca değişimi

Eş. 3.48 ile verilen, devrenin toplam yükünün baz bölgesi boyunca değişimi Şekil 4.31'de sunulmuştur.  $\Delta n_{\text{toplam}}$ ,  $\Delta p_{\text{toplam}}$  ve  $\Delta N_{DE}$  yoğunluklarını içeren toplam yük, baz kalınlığının yaklaşık ortalarına kadar negatif iken (elektron yoğunluğu daha büyük), yarısından sonra pozitif olmaktadır (boşluk

yoğunluğu daha büyük). Toplam yükün negatiften  $\Delta N_{DE}$  yoğunluğu ise, baz bölgesi boyunca değişim göstermemektedir.



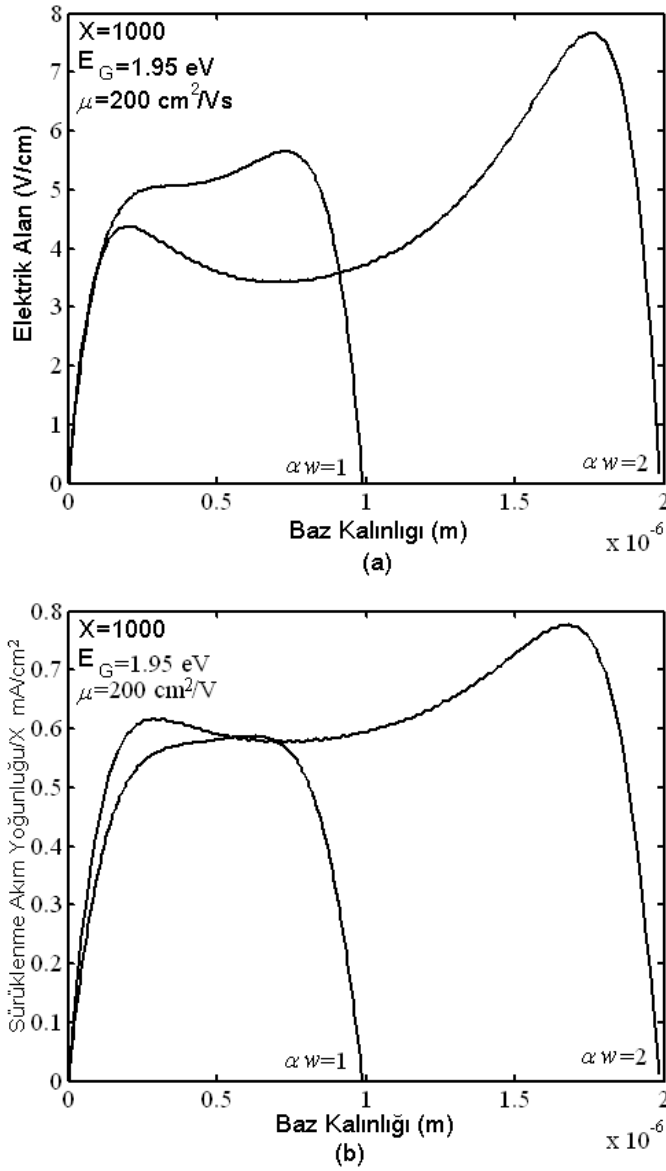
Şekil 4.30.  $E_G=1,95 \text{ eV}$  için  $\alpha w=1$ 'de elektrik alanın/sürüklenme akımının ihmal (a) ve dahil (b) edilmesi halinde difüzyon ve toplam akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimi



Şekil 4.31. ABGP'nin toplam yükünün ( $\rho/e$ ) ve  $\Delta N_{DE}$ 'nin baz bölgesi boyunca değişimleri

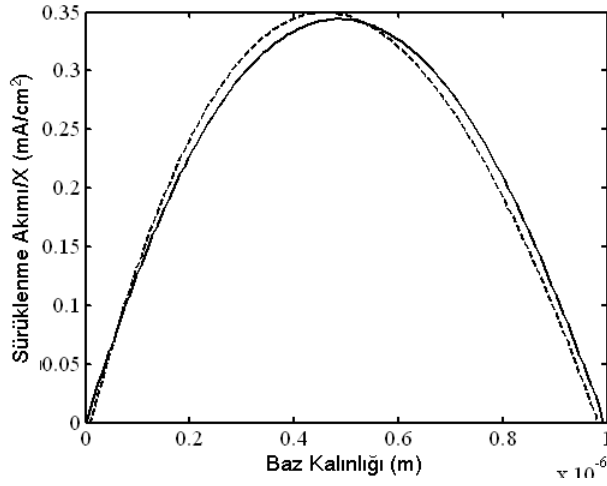
$E_G=1,95$  eV için,  $\mu=200$  cm<sup>2</sup>/Vs değerinde, elektrik alanın ve sürüklenme akımlarının değişimi Şekil 4.32.a ve b'deki gibi elde edilmiştir. Buna göre mobilite azaldıkça, taşıyıcı yoğunluğu arttığından, elektrik alanın tepe değeri artmış, iletkenlik azaldığından, sürüklenme akımı azalmıştır.

*Elektrik alan hesabının A.Luque [85] ile karşılaştırılması:* Kaynak [85]'de, ABGP'de elektrik alan bulunurken, elektrik alanın taşıyıcı yoğunluğunu etkilemediği varsayılarak, önce sürüklenme akımı bulunmuş, daha sonra  $J_{AB}=\sigma E$  ( $\sigma$ , ara bandın iletkenliği) ifadesi kullanılarak elektrik alan hesaplanmış ve son olarak da elektrik alandan yola çıkılarak  $\Delta N_{De}$  değişimi bulunmuştur. Bu çalışmada ise, önce  $\Delta N_{De}$ 'nin baz bölgesi boyunca sabit olduğu varsayılıp, Eş. 3.48-49 çözülerek, elektrik alan bulunmuş, daha sonra sürüklenme akımına geçilmiştir.  $\alpha_w=1$  için, iki hesaplama yöntemi ile elde edilen sürüklenme akım yoğunluğu değerleri hemen hemen aynıdır (Şekil 4.33). Fakat  $\alpha_w=5$  olduğunda iki yöntemle hesaplanan sürüklenme akım yoğunluğu eğrileri birbirinden farklı olmaktadır (Şekil 4.34).

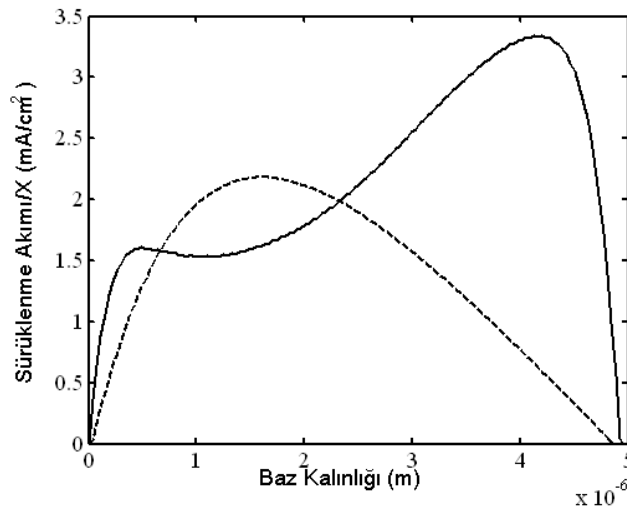


Şekil 4.32.  $E_G=1,95\ eV$  için  $\mu=2000\ cm^2/Vs$  değerinde (a) elektrik alanının değişimi, (b) sürüklenme akımının değişimi

Kaynak [85]'de taşıyıcı yoğunluğu değişiminin elektrik alandan bağımsız olduğu kabul edilmişti. Halbuki bu çalışmada yapılan hesaplamalarda, elektrik alanın taşıyıcı yoğunluğunu değiştirdiği ve  $\alpha w$  değeri arttıkça değişiklik miktarının da arttığı görülmüştür (Bkz. Şekil 4.29.a veb). İşte bu farklılıktan dolayı, sürüklenme akım yoğunluğu eğrileri de farklı olmuştur.



Şekil 4.33.  $E_G=1,95$  eV için  $\alpha w=1$  iken kaynak [85] yöntemi (kesikli çizgi) ve KSDM (süreklili çizgi) ile bulunan sürüklenme akım yoğunluğu eğrileri



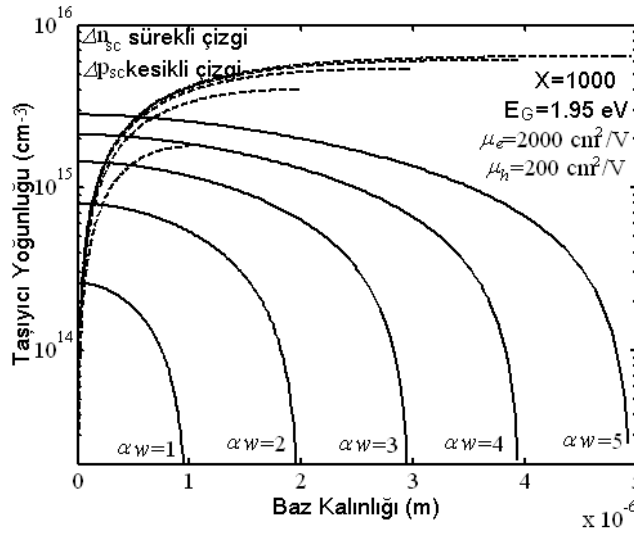
Şekil 4.34.  $E_G=1,95$  eV için  $\alpha w=5$  iken kaynak [85] yöntemi (kesikli çizgi) ve KSDM (süreklili çizgi) ile bulunan sürüklenme akım yoğunluğu eğrileri

#### 4.2.8. Elektron ve boşluk mobilitelerinin birbirinden farklı olmasının ABGP verimine taşıyıcı dağılımına etkileri

Buraya kadar yapılan çalışmalarda, elektron ve boşluk mobiliteleri birbirine eşit kabul edildi. Ancak pratikte, elektron mobilitesi, boşluk mobilitelerinin iki ila üç katı büyüklüğündedir. Taşıyıcı yoğunluğu arttığında elektron ve boşluk mobiliteleri arasındaki fark da artmaktadır (Şekil 2.14). Bu kısımda elektron

mobilitesi  $2000 \text{ cm}^2/\text{V}$  ve boşluk mobilitesi de  $200 \text{ cm}^2/\text{V}$  alınarak, hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.34'de, elektrik alan modele dahil değilken,  $\alpha w$ 'nun 1'den 5'e kadar olan değerlerinde, kısa devre durumunda, elektron ve boşluk yoğunluklarının değişimi görülmektedir.

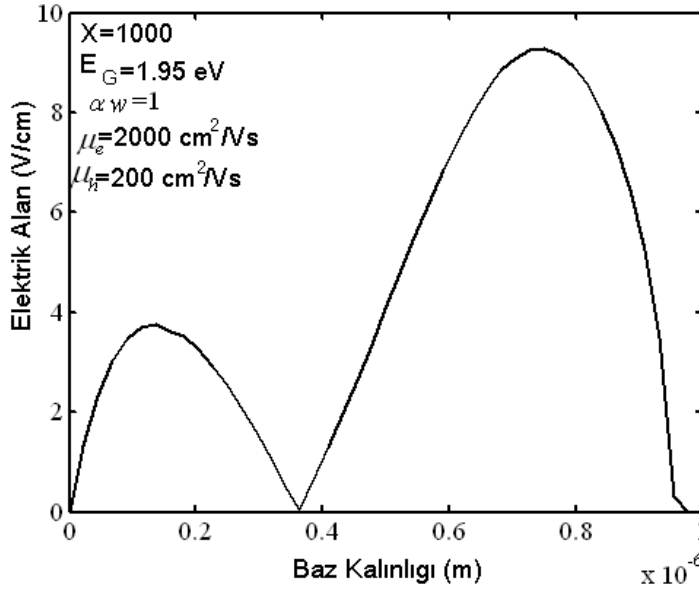


Şekil 4.34.  $\mu_e=2000 \text{ cm}^2/\text{V}$  ve  $\mu_h=200 \text{ cm}^2/\text{V}$  için, kısa devre durumunda elektron ve boşlukların, farklı baz kalınlıkları için baz bölgesi boyunca dağılımları

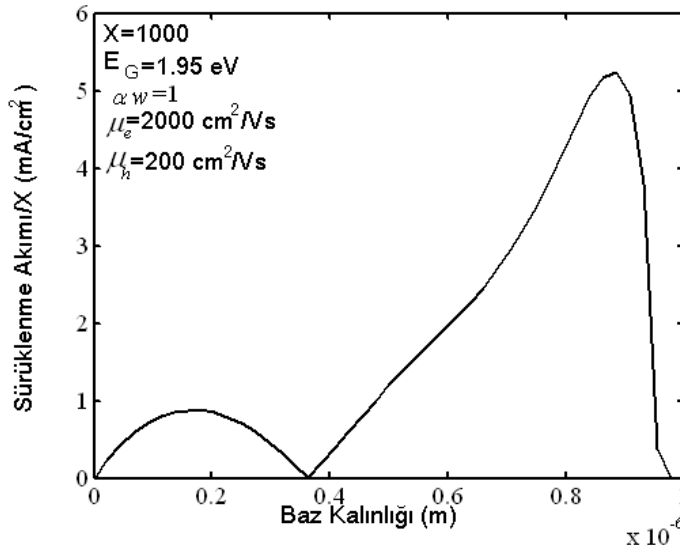
Şekil 4.34, elektron ve boşluk mobilitelerinin eşit varsayıldığı Şekil 4.28.a ile karşılaştırıldığında, elektron yoğunluğunun değişmediği, ancak, boşluk yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Şekil 4.28.a'da, elektron ve boşluk yoğunlukları, ABGP'nin arka yüzeyine yakın bir noktada eşitlenmekteydi. Şekil 4.34'de ise ABGP'nin ön yüzeyine yakın bir noktada eşitlenmektedir.  $\alpha w$ 'nun 3 ve daha küçük değerleri için, boşluk yoğunluğu, elektron yoğunluğundan çok çok fazladır. Örneğin,  $\alpha w=1$  için, boşluk yoğunluğu  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  civarında iken, elektron yoğunluğu  $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  civarındadır.

Elektron ve boşluk mobilitelerinin, birbirinden farklı olması durumunda, elektrik alanın etkisini incelemek için,  $\alpha w=1$  kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve elektrik alanın ve sürüklenme akımının baz bölgesi boyunca

değişimleri Şekil 4.35 ve 4.36'daki gibi elde edilmiştir. Hesaplamalarda  $\Delta N_{De}$  için  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 'den  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 'e kadar değişen değerler verilerek, elektrik alanın ve sürüklenme akımının emitter uçlarında sıfırlanması sağlanmıştır. Şekil 4.35, Şekil 4.23.a ile karşılaştırıldığında en önemli fark, elektrik alanın, iki tane tepe değerinin bulunmasıdır. İlki yaklaşık 4 V/cm ve ikincisi de 9 V/cm olan bu tepe değerlerinin her ikisi de, Şekil 4.23.a'da  $\alpha w=1$  için elde edilen tek tepe değerinden (2,5 V/cm) daha büyüktür. Sürüklenme akımının şekli, yine elektrik alan ile aynı elde edilmiştir (Şekil 4.36). Sürüklenme akımının iki tepe değerinden ikincisi  $6 \text{ mA/cm}^2$ 'ye kadar çıkmıştır ki, bu değer Şekil 4.24'deki sürüklenme akımına göre ( $1,6 \text{ mA/cm}^2$ ) oldukça büyüktür. Verim ise, mobilitelerin birbirine eşit alındığı duruma göre %2 iyileşerek, %31'e yükselmiştir.



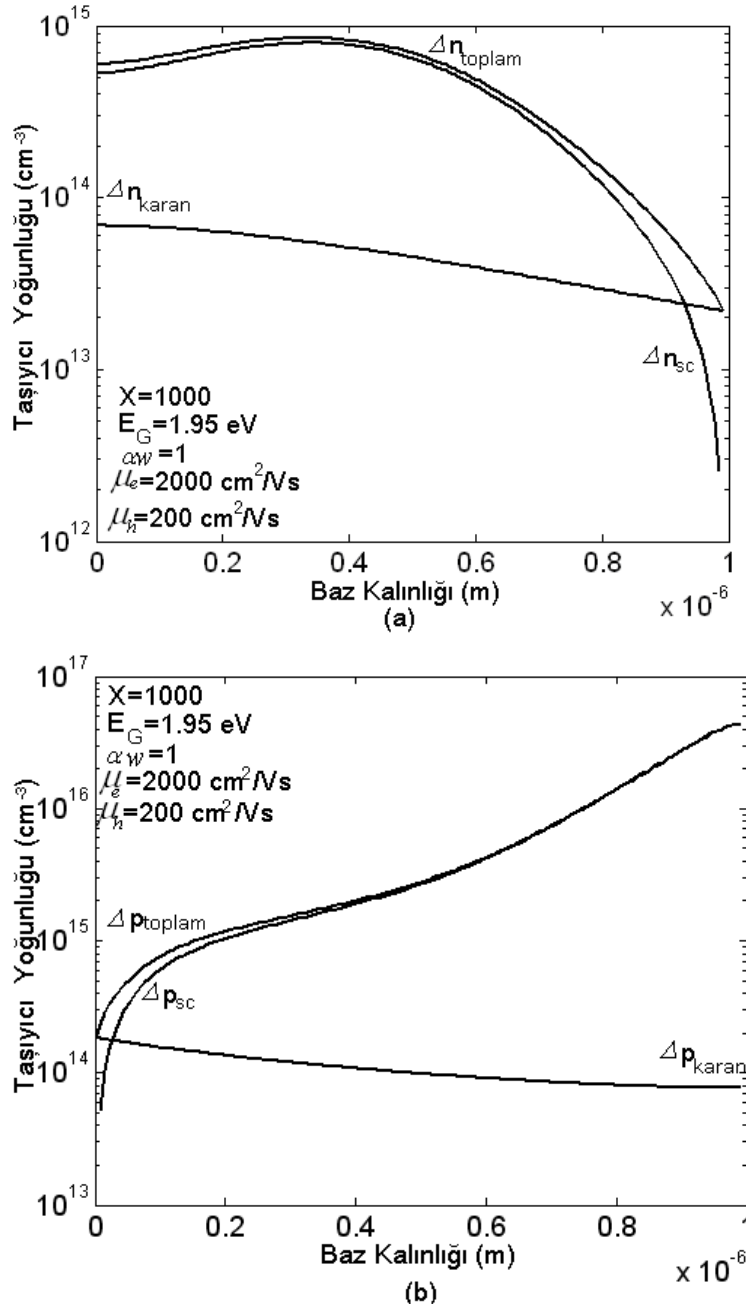
Şekil 4.35.  $E_G=1,95 \text{ eV}$  için,  $\mu_e=2000 \text{ cm}^2/\text{V}$  ve  $\mu_h=200 \text{ cm}^2/\text{V}$  durumunda, elektrik alanın baz bölgesi boyunca değişimi



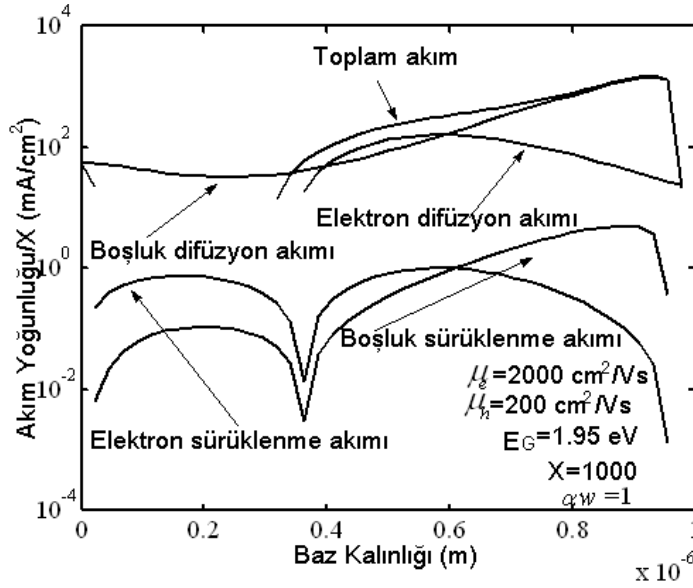
Şekil 4.36.  $E_G=1,95$  eV için,  $\mu_e=2000$  cm<sup>2</sup>/V ve  $\mu_h=200$  cm<sup>2</sup>/V durumunda, sürüklenme akımının baz bölgesi boyunca değişimi

Elektrik alanın ve sürüklenme akımlarının Şekil 4.35 ve 36'daki gibi bulunmasını daha iyi izah edebilmek için, elektron ve boşluk yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimleri Şekil 4.37.a ve b'deki gibi elde edilmiştir. Burada, Şekil 4.29'dakinin tersine, karanlık durum taşıyıcı yoğunlukları, kısa devre taşıyıcı yoğunluklarından çok küçük olduğu için, toplam taşıyıcı yoğunluğu, kısa devre taşıyıcı yoğunluğuna benzemektedir. Elektron ve boşluk yoğunlukları baz bölgesi boyunca sabit değildir. Boşluk yoğunluğu, pilin arka yüzeyine doğru oldukça artmaktadır. Arka yüzeye yakın noktada, elektron ve boşluk yoğunlukları arasındaki fark arttığından, elektrik alan da artmaktadır.

Şekil 4.37'deki taşıyıcı yoğunluklarına ait, difüzyon, sürüklenme ve toplam akım yoğunluklarının değişimleri Şekil 4.38'de verilmiştir. Burada boşluk difüzyon akımı sürekli ve büyükken, elektron difüzyon akımı küçüktür ve 0-0.3  $\mu$ m arasında hemen, hemen sıfırdır. Toplam akım ise baz bölgesi boyunca sabit değildir. Toplam akım değişiminin farklılığına rağmen, her iki emitter uçlarından alınan toplam akım birbirine ve Şekil 4.30.b'dekine eşittir. Yani mobilitelerin farklı seçilmesi, taşıyıcı ve akım yoğunluğu dağılımlarını değiştirmesine rağmen, devreden çıkan akım değerini değiştirmemiştir.



Şekil 4.37.  $E_G=1,95$  eV için,  $\mu_e=2000$   $\text{cm}^2/\text{V}$  ve  $\mu_h=200$   $\text{cm}^2/\text{V}$  durumunda,  $\alpha_W=1$  iken, kısa devre, karanlık durum ve toplam elektron (a) ve boşluk (b) yoğunluğunun baz bölgesi boyunca değişimi



Şekil 4.38.  $E_G=1,95$  eV için,  $\mu_e=2000$  cm<sup>2</sup>/V ve  $\mu_h=200$  cm<sup>2</sup>/V durumunda,  $\alpha w=1$  iken, difüzyon, sürüklenme ve toplam akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimi

#### 4.3. DDM ve KSDM Sonuçlarının Karşılaştırması

Bu çalışmada, ABGP'leri incelemek için DDM ve KSDM olmak üzere, iki farklı matematiksel model geliştirilmiştir. Her iki model için aynı başlangıç denklemleri kullanılmıştır (Bölüm 3.2). Güneş pillerinde verimlilik sınırını bulmak için kullanılan DDM'de, taşıyıcı mobilitelerinin çok büyük olduğu, elektron ve boşluk yoğunluklarının ( $\Delta n$  ve  $\Delta p$ ) AB yapılı baz bölgesi boyunca sabit kaldığı varsayılarak, akım denklemleri türetilmiştir. KSDM'de ise, taşıyıcı yoğunluklarındaki değişim hesaba katılarak, önce süreklilik denklemleri çözülmüş, daha sonra difüzyon ve sürüklenme akımları hesaplanmıştır. KSDM uygulanırken, DDM ile hesaplanan örtüşmesiz durum optimum AB enerji seviyeleri kullanılmıştır.

KSDM ile ilk olarak, taşıyıcı mobilitelerindeki değişimin, ABGP verimine etkisi, DOT modele dahilken ve değilken araştırılmıştır. Çizelge 4.14'de,  $X=46000$ 'de,  $E_G=1,95$  ve  $1,12$  eV için farklı mobilitelerinde, DOT dahil edilerek hesaplanan neticeler görülmektedir.  $\mu > 2000$  cm<sup>2</sup>/Vs durumunda, etkin enerji durum yoğunluğunun büyük değerleri için, KSDM ve DDM

sonuçları uyumludur.  $N_{C,V}=10^{19} \text{ cm}^{-3}$  olduğunda, mobilitenin küçük değerlerinde de DDM ve KSDM arasında çok büyük bir fark oluşmamaktadır. Ancak  $N_{C,V}=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  olduğunda,  $\mu < 2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  için KSDM verim sonuçları hızla düşmektedir. Işık konsantrasyonunun çok yüksek değerlerinde taşıyıcı yoğunluğunun artması ile mobilitenin düşmesi kaçınılmazdır. Bu durumda ABGP veriminde de çok büyük azalma meydana gelmektedir. Sonuç olarak ABGP verimini, DDM ile hesaplanan verim sınırına yakın tutabilmek için, etkin enerji durum yoğunluğu  $N_{C,V} \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ve  $\mu > 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  olan malzemeler tercih edilmelidir.

Çizelge 4.14.  $X=46000$  ve DOT modele dahilken, mobilitenin farklı değerleri için DDM ve KSDM sonuçlarının karşılaştırılması

|                                     | Verim (%)                         |                                   |                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                                     | $E_G=1,95 \text{ eV}$             |                                   | $E_G=1,12 \text{ eV}$             |
|                                     | $N_{C,V}=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ | $N_{C,V}=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ | $N_{C,V}=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ |
| DDM                                 | 63,2                              | 63,2                              | 54,8                              |
| $\mu > 4000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ | 63,2                              | 63,2                              | 54,8                              |
| $\mu = 2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ | 63,17                             | 59,9                              | 54,8                              |
| $\mu = 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  | 63,0                              | 29,7                              | 54,6                              |
| $\mu = 20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$   | 62,5                              | 13,0                              | 54,2                              |

KSDM ile ikinci olarak, verimin ışık konsantrasyonu ile değişimi araştırılmıştır.  $\mu > 2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  için, KSDM ve DDM sonuçları arasında kayda değer bir fark bulunmazken, mobilitenin daha küçük değerlerinde KSDM ile hesaplanan verim değerlerinde azalma görülmüştür.  $X \leq 1000$  durumunda, her iki modelde de verim ışık konsantrasyonu ile artmaktadır. Ancak,  $X > 1000$  durumunda  $N_{C,V}$ 'nin küçük değerlerinde mobilite düştüğünde, ABGP verimi de azalmaktadır. Çizelge 4.15'te  $E_G=1,95 \text{ eV}$  için  $N_{C,V}=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  durumunda hesaplanan DDM ve KSDM sonuçları özetlenmiştir.

Çizelge 4.15. Farklı ışık konsantrasyonlarında  $E_G=1,95$  eV için  $N_{C,V}=10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  durumunda, DDM ve  $\mu=2000$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  ve  $\mu=200$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  için KSDM verim sonuçları

| X      | Verim (%) |                                    |                                   |
|--------|-----------|------------------------------------|-----------------------------------|
|        | DDM       | KSDM                               |                                   |
|        |           | $\mu=2000$ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ | $\mu=200$ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ |
| 1      | 44,84     | 42,6                               | 33,0                              |
| 100    | 48,9      | 46,5                               | 38,5                              |
| 1000   | 57        | 54,2                               | 40,6                              |
| 10 000 | 61,3      | 58,8                               | 37,5                              |
| 46 000 | 63,2      | 59,9                               | 29,7                              |

KSDM ile incelenen bir diğer parametre enerji bant genişliğidir. ABGP veriminin enerji bant genişliği,  $E_G$  ile değişimi incelenmiş,  $N_{C,V}=10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  ve  $\mu=2000$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  için, DDM ve KSDM sonuçları hemen hemen aynı iken (optimum bant genişliği 1,95 eV),  $\mu=200$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  için KSDM'de hem verim çok azalmış hem de optimum  $E_G$  1,3 eV'a doğru kaymıştır. DDM ve KSDM ile hesaplanan optimum  $E_G$  ve maksimum verim değerleri Çizelge 4.16'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.16.  $E_G=1,95$  eV için  $N_{C,V}=10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  durumunda, DDM ve  $\mu=2000$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  ve  $\mu=200$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  optimum  $E_G$  ve maksimum verim değerleri

|                       | X      | DDM  | KSDM                               |                                   |
|-----------------------|--------|------|------------------------------------|-----------------------------------|
|                       |        |      | $\mu=2000$ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ | $\mu=200$ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ |
| Optimum $E_G$<br>(eV) | 46 000 | 1,95 | 1,95                               | 1,3                               |
|                       | 1000   | 1,95 | 1,95                               | 1,4                               |
| Maksimum<br>verim (%) | 46 000 | 63,2 | 59,9                               | 34,5                              |
|                       | 1000   | 57   | 54,2                               | 44,1                              |

KSDM kullanılarak verimin  $\alpha_w$  ile değişimi de incelenmiş ve DDM'dekine benzer şekilde, optimum verim için  $\alpha_w \geq 5$  koşulunun sağlanması gerektiği tesbit edilmiştir. KSDM ile örtüşme etkisi incelendiğinde, yine DDM'dekine

benzer şekilde  $\gamma=1$  durumunda (örtüşmesiz AB seviyesi ile), verimin örtüşme ile hızla düştüğü,  $\gamma=10$  durumunda ise örtüşme etkisinin azaldığı ve verimdeki düşüşün kompanze edildiği görülmüştür. Ancak,  $N_{C,V}=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  olması durumunda, DDM ile bulunan optimum AB seviyesinin, KSMD ile uyuşmadığı görülmüştür. Etkin enerji durum yoğunluğunun küçük olması, optimum AB seviyesi, optimum baz kalınlığı, etkin ışımaz rekombinasyon ömür süresi ve verim gibi ABGP parametrelerini değiştirmiştir.

KSMD kullanılarak, DDM ile incelenemeyen, taşıyıcı yoğunluklarının AB yapılı baz bölgesi boyunca değişimleri hesaplanmış ve maksimum çalışma noktasındaki toplam taşıyıcı yoğunluğunun hemen hemen sabit olduğu görülmüştür.

Son olarak KSMD ile taşıyıcı mobiliteleri birbirine eşitken ( $\mu_{e/h}=2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) ve değilken ( $\mu_e=2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ve  $\mu_h=200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) elektrik alan etkisi incelenmiş, elektrik alanın ve sürüklenme akımının baz bölgesi boyunca değişimleri elde edilmiştir. Uygun  $\Delta N_{DE}$  değerleri seçildiğinde, sürüklenme akımının emitter uçlarında sıfırlanarak, toplam akıma katkısı olmadığı belirlenmiştir. Ancak elektrik alan etkisi verimde yaklaşık %10'luk bir azalmaya sebep olmuştur.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, enerji bant aralığından daha küçük ve daha büyük enerjiye sahip fotonları, daha verimli olarak elektrik enerjisine dönüştürebilmek için, ara bant yapılı güneş pilleri (ABGP) üzerinde incelemeler yapıldı. Burada, ABGP'nin verimini optimize etmek için gerekli parametreler, iki farklı yöntemle incelendi. Birinci yöntem, detaylı denge modeli (DDM), diğeri ise kuasi-sürüklenme-difüzyon modeli (KSDM)'dir.

DDM'de, taşıyıcı mobilitelerinin çok büyük olduğu kabul edilerek, örtüşmeli ve örtüşmesiz durumlarda;

- i) verim-ara bant (AB) seviyesi değişimi,
  - ii) verim-baz kalınlığı değişimi,
  - iii) verim- $E_G$  değişimi,
  - iv)  $J-V$  karakteristiği,
  - v) ışımasız rekombinasyon ömür süresinin etkisi,
  - vi) Auger üretim/rekombinasyon etkisi
- incelendi.

Maksimum ışık konsantrasyonunda (46000),  $\alpha_w \geq 10$  iken, örtüşmesiz durumda,  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV olan ABGP'ler için verim sırasıyla, %63,2 ve %54,8 olarak bulundu.

Verim-AB eğrisi "M" şeklinde elde edildi. Optimum AB seviyesinin, bant aralığının 1/3 ve 2/3'ünde olduğu görüldü.

$\gamma=1$  ve maksimum örtüşme (4 eV) durumlarında,  $E_G=1,95$  eV ve  $E_G=1,12$  eV olan ABGP'ler için verimin %20 azaldığı ve optimum AB seviyesinin de anabandın yarısına doğru kaydığı görüldü.

$\gamma=1$  ve  $\gamma=10$  durumlarında, optimum  $\alpha w$  çarpımının örtüşme ile 5'den 1'e düştüğü gözlemlendi.

$\gamma=10$  durumunda, örtüşme etkisinin azaldığı, ancak, gerekli baz kalınlığının artması nedeniyle, Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyon etkisinin arttığı tespit edildi.

Auger mekanizması, DDM'ye dahil edildiğinde, en yüksek verim, silisyumun bant genişliğine yakın bantlarda ve %70 civarında bulundu.

KSDM ile, doğrusal olmayan terimler (DOT) modele dahilken ve değilken;

- i) verim-mobilite değişimi,
- ii) verim-ışık konsantrasyonu değişimi,
- iii) verim- $E_G$  değişimi,
- iv) verim-  $\alpha w$  değişimi
- v) verim-örtüşme miktarı değişimi,
- vi) SRH rekombinasyon etkisi
- vii) elektrik alan etkisi,
- viii) elektron ve boşluk mobilitelerinin birbirinden farklı olmasının etkileri incelendi.

Etkin enerji durum yoğunluğu  $N_{C,T} \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  olduğunda,  $\mu > 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  için DDM ile KSDM'nin aynı neticeleri verdiği görüldü. Mobilitenin daha küçük değerlerinde ise verimin düştüğü tespit edildi.

Yüksek ışık konsantrasyonu ve etkin durum yoğunluğu ( $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) için, DOT'un küçük bant aralıklı ( $E_G=1,12 \text{ eV}$ ) olan ABGP verimini daha fazla etkilediği tespit edildi.

DOT ihmal edildiğinde,  $\mu=200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  için, verimin ışık konsantrasyonu ile arttığı, DOT modele dahil edildiğinde ise,  $X=1000$ 'den daha büyük ışık konsantrasyonlarında, verimin hızla azaldığı ve  $X=46000$ 'de ise,  $E_G=1,95 \text{ eV}$  için %29,7'ye düştüğü görüldü.

KSDM'de, etkin enerji durum yoğunluğu  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'den  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'e düştüğünde, sadece verim azalmamış, aynı zamanda optimum AB ve optimum baz kalınlığı da değişmiştir. Yeni optimum AB ve optimum baz kalınlığı değerleri kullanıldığında ise, verimde %15 civarında bir iyileşme sağlanmıştır.

Baz bölgesindeki elektron ve boşlukların homojen olmayan üretim ve rekombinasyonundan kaynaklanan dahili elektrik alan etkisi, KSDM kullanılarak incelenmiştir. Ara bandın, baz bölgesi boyunca yarı dolu tutulabilmesi halinde, dahili elektrik alanın, verimi değiştirmeyeceğine sonucuna varılmıştır.

$E_G=1,95 \text{ eV}$  için, elektron ve boşluk mobiliteleri birbirinden farklı seçildiğinde ( $\mu_e=2000 \text{ cm}^2/\text{V}$  ve  $\mu_h=200 \text{ cm}^2/\text{V}$ ) ise, boşluk taşıyıcı yoğunluğunun artması nedeniyle verimde bir miktar artış gözlemlendi.

Sonuç olarak, p-n eklem güneş pillerin termodinamik verim sınırı %33 iken, ABGP'de bu verim sınırının %63,2'ye çıktığı görüldü. Literatürde ABGP modeli laboratuvar ortamında üretildi, ara bant etkisi gözlemlendi, ancak verimli bir ABGP elde edilemedi [76-79]. Bu çalışmanın sonucuna göre, verimli ABGP elde edilememesi, örtüşme durumunda AB seviyesinin ve baz kalınlığının uygun seçilememesine bağlandı. Şu anda, ABGP üretiminde, pratikte hangi malzemelerin kullanılabileceği üzerinde çalışmalar yoğun bir şekilde sürmektedir. Hem optimum anabanda sahip malzemenin, hem de bu malzeme için optimum AB malzemesinin seçimi, ABGP verimini arttırmada çok önemli olacaktır. İleriye yönelik çalışmalarda, burada geliştirilen KSDM,

son nesil güneş pili malzemelerine uygulanarak, yüksek verimli ABGP'ler tasarlanabilir.

Ayrıca, bu çalışmada, güneş ışıma spektrumunun siyah-cisim ışıma spektrumu ile aynı olduğu varsayıldı. AM1 ve AM2 ışıma spektrumları için, uygun  $E_G$ 'ler ve AB'ler seçilerek, incelemeler tekrarlanabilir.

ABGP'lerin detaylı olarak analiz edildiği bu çalışmada, hesaplamaların tamamı, AB yapılı baz bölgesi için gerçekleştirildi, emitter etkileri ise ihmal edildi. İleri aşamada, emitter kalınlıkları, katkı konsantrasyonları ve yüzey rekombinasyonları modele dahil edilerek incelemeler yapılabilir.

Bu çalışmada, tek ara banda sahip ara bant yapılı güneş pilleri incelendi. Benzer incelemeler, örtüşme de dahil edilerek, birden fazla ara banda sahip piller için tekrarlanabilir, ara bant sayısındaki artışa bağlı olarak verimde artış olup olmadığı araştırılabilir.

Bu çalışmada, SRH rekombinasyon etkisi ihmal edildiğinde, elektrik alanın baz kalınlığı ile arttığı tespit edildi. Farklı baz kalınlığı değerlerinde, SRH rekombinasyon ve elektrik alan etkisi bir arada incelenebilir.

Bu çalışmada, KSDM kullanılarak,  $n^+-n-p^+$  yapısındaki ABGP incelendi. KSDM,  $p^+-n-n^+$  ve  $p^+-p-n^+$  yapılarına da uygulanabilir.

## KAYNAKLAR

1. Morgan G., Apt J., Lave L., "The U.S. electric power sector and climate change mitigation", **Pew Center on Global Climate Change, USA**, 1-76 (2005).
2. İnternet: Energy Information Administration Official Energy Statics from the U.S. Government, "Next Generation by Energy Source by Type of Producer", <http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epa>, (2006).
3. İnternet: Energy Information Administration Official Energy Statics from the U.S. Government, "Solar Thermal and Photovoltaic Collector Manufacturing Activities", <http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/page/solarreport/solar>, (2008).
4. Sarbani B., Antia, H. M., "Helioseismology and Solar Abundances", **Physics Reports, USA**, 1-116 (2007).
5. Stanford University Global Climate and Energy Project, "An assessment of solar energy conversion technologies and research opportunities", **Stanford University GCEP, USA**, 5-40 (2006).
6. International Energy Agency, "World energy outlook 2005", **IEA/OECD, Paris**, 43-55 (2004).
7. Smil V., "Energies", **The MIT Press**, Cambridge, 72 (1999).
8. Hermann W., "Quantifying global exergy resources", **Energy**, 31(12): 1349-1366 (2006).
9. Shafey H.M., Ismail I.M., "Thermodynamics of the conversion of solar radiation", **Journal of Solar Energy Engineering**, 112 (2), 140-145 (1990).
10. Albert P., Bennartz R., Fischer J., "Remote sensing of atmospheric water vapor from backscattered sunlight in cloudy atmospheres", **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 18(6): 865-874 (2001).
11. Smith, E. V. P., Gottlieb, D. M., "Solar flux and its variations," **Space Science Reviews**, 16 (5): 771-802 (1974).
12. SolarBuzz Company, "The Leading Annual World Solar PV Industry Report", **SolarBuzz Company**, 1-320 (2008).

13. Luque A., "Ideal efficiency of monolithic, series-connected multijunction solar cells", ***Progress in Photovoltaics***, 10(5): 323-329 (2001).
14. Saritas M., \*Review paper on solar cell technology\*, ***Proceedings of ECO Electronics Technology Workshop***, Turkey, 83-128 (1988).
15. Partain L. D., "Solar Cells and Their Applications", ***John Wiley and Sons***, New York, 32 (1995).
16. Murr L. E., "Solar Material Science", ***Academic Press***, London, (1980).
17. Streetman B. G., "Solid state electronic devices 3<sup>rd</sup> edition", ***Prentice Hall***, New Jersey, 87 (1990).
18. Bilgin Z., "Güneş takip sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi", Yüksek lisans, ***Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-112 (2006).
19. Kangal H., "Fotovoltaik sistem analizi ve labview tabanlı MPPT simülasyonu", ***Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-97 (2006).
20. Butti K., Perlin J., "A golden thread – 2500 years of solar architecture and technology", ***Marion Boyars***, London, 72 (1981).
21. Becquerel E., "On electric effect under the influence of solar radiation", ***Comtes Rendus de l'Academie des Sciences***, 9: 31-33 (1839).
22. Adams W. G., Day R. E., "The action of light on selenium", ***Proc. Roy. Soc.***, 25, 113-117 (1877).
23. Lange B., "New Photovoltaic Cell", ***Zeitschrift Fur Physik (Zeit. Phys.)***, 31: 139 (1930).
24. Grondahl L. O., "The Copper-Cuprous-Oxide Rectifier and Photoelectric Cell", ***Rev. Modern Physics***, 5: 141-168 (1933).
25. Schottky W., "Cuprous Oxide Photoelectric Cells", ***Zeitschrift Fur Physik (Zeit. Phys.)***, 31: 913, (1930).
26. Chapin D.M., Fuller C.S., Pearson G.L., "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power", ***Journal of Applied Physics***, 25: 676-677 (1954).

27. Zulehner W., "Status and future of silicon crystal growth", ***Materials Science and Engineering B***, 4 : 1-10 (1989).
28. Fischer H., Pschunder W., "Investigation of photon and thermal induced changes in silicon solar cells", ***Proceedings of the 10th IEEE PV Specialists Conference***, Palo Alto, CA, USA, 405-411 (1973).
29. Saitoh T., Wang X., Hashigami H., Abe T., Igarashi T., Glunz S.W., Wettling W., Ebong A., Damiani B.M., Rohatgi A., Yamasaki I., Nunoi T., Sawai H., Ohtuka H., Yazawa Y., Warabisako T., Zhao J., Green M.A., "Light degradation and control of low-resistivity of Cz-Si solar cells - an international joint research", ***Technical Digest of the 11th International Photovoltaic Science and Engineering Conference***, Sapporo, Japan, 553–556 (1999).
30. Zhao J., Wang A., Green M.A., "24.5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates", ***Progress in Photovoltaics: Research and Applications***, 7: 471-474 (1999).
31. Dietl J., Helmreich D., Sirtl E., "Solar silicon", ***Crystals: Growth, Properties and Applications***, 5: 43-107 (1981).
32. Goetzberger A., Shockley W., "Metal Precipitates in Silicon p-n Junctions" ***Journal of Applied Physics***, 31(10): 1821-1824 (1960).
33. Wolf M., "High efficiency silicon solar cells", ***14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference***, San Diego, 674-679 (1980).
34. Spitzer M., Shewchun J., Vera E.S., Loferski J.J., "Ultra high efficiency thin silicon p-n junction solar cells using reflecting surfaces", ***14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference***, San Diego, 375-380 (1980).
35. Goetzberger A., "Optical confinement in thin Si-solar cells by diffuse back reflectors" ***15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference***, Kissimmee, 867-870 (1981).
36. Hebling C., Eyer A., Faller F.R., Hurre A., Lüdemann R., Reber S., Wettling W., "The crystalline silicon thin-film solar cell - The high temperature approach", ***Advances in Solid State Physics***, 38: 607-622 (1999).
37. Catchpole K.R., McCann M.J., Blakers A.W., Weber K.J., "Crystalline silicon thin-film solar cells—recent results at Fraunhofer ISE", ***Solar Energy***, 77(6): 865-875 (2004).

38. Chittick R.C., Alexander J.H., Sterling H.F., "The preparation and properties of amorphous silicon", *J. Electrochemical Society*, 116: 77-81 (1969).
39. Carlson D., Wronski C.R., "Amorphous silicon solar cell", *Applied Physics Letters*, 28: 671-673 (1976).
40. Fritzsche H., "Early research on amorphous silicon: Errors and missed opportunities", *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 609: A17.1 (2000).
41. Suntola T., "Thin Film Solar Cells", *Proceedings of the 11th EC Photovoltaic Solar Energy Conference*, Montreux, Switzerland, 977-980 (1992).
42. Wagner S., Shay J.L., Migliorato P.P., Kasper H.M., "CuInSe<sub>2</sub>/CdS heterojunction photovoltaic detectors", *Applied Physics Letters*, 25 (8): 434-435 (1974).
43. Kazmerski L.L., White F.R., Morgan G.K., "Thin film CuInSe<sub>2</sub>/CdS heterojunction solar cells" *Applied Physics Letters*, 29 (4): 268-270 (1976).
44. Mitchell K., Ermer E.J., Pier D., "Single and Tandem Junction CuInSe<sub>2</sub> cell and Module Technology", *Proceedings of the Conference Record on 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Las Vegas, 1384-1389 (1988).
45. Cusano D.A., "CdTe Solar Cells & Photovoltaic Heterojunctions in II-VI Compounds", *Solid-State Electronics*, 6: 217-232 (1963).
46. Fahrenbruch A.L., Bube R.H., "Fundamentals of Solar Cells", *Academic Press*, New York, 49-387 (1983).
47. Bube R.H., "Photovoltaic Materials", *Imperial College Press*, London, 135-183 (1998).
48. Ferekides C., Britt J., Ma Y., Killian L., "High efficiency CdTe solar cells by close spaced sublimation", *Proceedings of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Louisville, USA, 389-393 (1993).
49. Alferov Zh. I., Zhilyaev Yu. V., Shmartsev Yu. V., "The splitting of the conduction band in 'superlattice' on the base GaP<sub>x</sub>As<sub>12x</sub>" *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, 5: 174 (1971).

50. Anspaugh B. E., Weiss R. S., "Results of the 1988 NASA/JPL Balloun Flight Solar Cell Calibration Program," **JPL Publication, Jet Prapulsion Laboratory, Pasadena**, 88-36 (1988).
51. S.P. Tobin S.M. Vernon C. Bajgar V.E. Haven L.M. Geoffroy M.M. Sanfacon D.R. Lillington R.E. Hart, Jr. K.A. Emery R.J. Matson, "High efficiency GaAs/Ge monolithic tandem solar cells", **20th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.**, Las Vegas, 405-410 (1988).
52. Green M.A., Emery K. , Hisikawa Y., Warta W., "Solar cell efficiency tables (version 30)", **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 15 (5): 425-430 (2007).
53. Goetzberger A., Hebling C., Schock H.W., "Photovoltaic materials, history, status and outlook", **Materials Science and Engineering**, 40:1-46 (2003).
54. Meissner D., "Plastic Solar Cells", **Photon**, 2: 34-37 (1999).
55. J. Schön, Ch. Kloc, B. Batlogg, "Doped pentacene for efficient photovoltaic devices", **16th International Photovoltaic Solar Energy Conference**, Glasgow, 43 (2000).
56. Mikoshiba S., Murai S., Sumino H., Hayase S., "Anomalous increase in photocurrent density for quasi-solid dye sensitized solar cells by addition of tetra (bromomethyl) benzene", **Chemistry Letters**, 31(9): 918-919 (2002).
57. Hinsch A., Kroon J.M., Späth M., Van Roosmalen J.A.M., Bakker N.J., Sommeling P., Burg N., Van Der Kinderman R., Kern R., Ferber J., Schill C., Schubert M., Meyer A., Meyer T., Uhlendorf I., Holzbock J., Niepmann R., "Long-term stability of large area power applications" **16th International Photovoltaic Solar Energy Conference**, Glasgow, 32-39 (2000).
58. Barham K. W. J., Duggan G., " A new approach to high-efficiency multi-band-gap solar cells", **Journal of Applied Physics**, 67(7): 3490-3493 (1990).
59. Bushnell D.B., Ekins-Daukes N.J., Mazzer M., Connolly J.P., Barnham K.W.J., Roberts J.S., Clark J., Hill G., Forbes I., "Strain-balanced GaAsP/InGaAs quantum well solar cells", **Applied Physics Letters**, 75: 4195-4197 (1999).
60. Ekins-Daukes N.J., Zhang J., Bushnell D.B., Barnham K.W.J., "Strain-balanced materials for high-efficiency solar cells", **28th IEEE PV Specialist Conference**, Anchorage, AK, 1273–1276 (2000).

61. Luque A., Martí A., "Fullspectrum: A new PV wave of more efficient use of solar spectrum", ***Solar Energy Materials and Solar Cells***, 87(4): 467-479 (2005).
62. Honsberg C.B., "Approaches for Ultra High Efficiency Solar Cells", ***School of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware***, Newark, DE, 19711, 1-3 (2005).
63. Green M.A., Emery K., King D.L., Igari S., Warta W., "Solar cell efficiency tables (version 23)", ***Progress in Photovoltaics***, 13: 55-62 (2003).
64. Trupke T., Green M.A., Wurfel P., "Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light", ***Journal of Applied Physics***, 92(7): 4117-22 (2002).
65. Trupke T., Green M.A., Wurfel P., "Improving solar cell efficiencies by down-conversion", ***Journal of Applied Physics***, 92(3): 1668-1674 (2002).
66. Schaller R.D., Klimov V.I., "High efficiency carrier multiplication in PbSe nanocrystals: Implications for solar energy conversion", ***Physical Review Letters***, 92(18): 186601/1-4, (2004).
67. Brendel R., Werner J. H., Quessier H.J., "Thermodynamic efficiency limits for semiconductor solar cells with carrier multiplication", ***Solar Energy Materials and Solar Cells***, 42: 419-425 (1996).
68. Luque A., Martí A., "Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels", ***Physical Review Letters***, 78(26): 5014-5017 (1997).
69. Brown A.S., Green M. A., "Intermediate band solar cell with many bands: Ideal performance", ***Journal Of Applied Physics***, 94(9): 6150-6158 (2003).
70. Martí A., Luque A., "Present status of the metallic intermediate band solar cell research", ***Thin Solid Film***, 451: 593-599 (2004).
71. Wahnou P., Tablero C., "Ab initio electronic structure calculations for metallic intermediate band formation in photovoltaic materials", ***Physical Review B***, 65(16): 165115 1-10 (2002).
72. Tablero C., "Survey of intermediate band material candidates", ***Solid State Communications***, 133: 97-101 (2005).

73. Tablero C., Wahnnon P., "Analysis of metallic intermediate-band formation in photovoltaic materials", ***Applied Physics Letters***, 82(1): 151-153 (2003).
74. Tablero C., "Analysis of the optical properties for Ga<sub>4</sub>P<sub>3</sub>Ti compound with a metallic intermediate band", ***Computational Materials Science*** 36: 263–267 (2006).
75. Marti A., Cuadra L., Luque A., "Quantum Dot Intermediate Band Solar Cell", ***Photovoltaic Specialists Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE***, Anchorage, AK, USA, 940-943 (2002).
76. Luque A., Marti A., "General Equivalent Circuit For Intermediate Band Devices: Potentials, Currents and Electroluminescence", ***Journal of Applied Physics***, 96(1) 903-908 (2004).
77. Marti A., Lopez N., Antolin E., Canovas E., Stanley C., Farmer C., Cuadra L., Luque A., "Novel semiconductor solar cell structures: The quantum dot intermediate band solar cell", ***Thin Solid Films*** 511–512: 638 – 644 (2006).
78. Luque A., Marti A., Lopez N., Antolin E., Canovas E. Stanley C., Farmer C., Diaz P., "Operation of the intermediate band solar cell under nonideal space charge region conditions and half filling of the intermediate band", ***Journal of Applied Physics***, 99(9): 094503 1-9 (2006).
79. Lopez N., Marti A., Luque A., Stanley C., Farmer C., Diaz P., "Experimental Analysis of the Operation of Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells", ***Journal of Solar Energy Engineering***, 129(3): 319-322 (2007).
80. Wahnnon P., Tablero C., Palacios P., Fernandez J.J., "Characterisation of optical transitions by first principles for new photovoltaic material with isolated metallic intermediate band", ***3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion***, Osaka, Japan, 55-58 (2003).
81. Konenkamp R., Dloczik L., Ernst K., Olesch C., "Nanostructures for solar cells with extremely thin absorbers", ***Physica E***, 14 (1–2): 219-223 (2002).
82. Marti A. Cuadra L., Luque A., "Quantum dot super solar cell", ***2nd Spanish Electronic Devices Conference***, Spain, 363-366 (1999).

83. Hoyer P., Könenkamp R., "Photoconduction in porous TiO<sub>2</sub>/sub 2/sensitized by PbS quantum dots", *Applied Physics Letters*, 66(3): 349-351 (1995).
84. Luque A., Marti A., "A metallic intermediate band high efficiency solar cell", ***Prog. Photovolt***, 9(2): 73–86 (2001).
85. Marti A., Cuadra L., Luque A., "Quasi drift-diffusion model for the quantum dot intermediate band solar cell", ***IEEE Trans. Electron Dev.***, 49 (9): 1632–1639 (2002).
86. Navruz T.S., Saritaş M., "Intermediate Band Solar Cells", ***International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO '2005***, Bursa, 72-75 (2005).
87. Luque, A.; Marti, A.; Cuadra, L., "Impact-ionization-assisted intermediate band solar cell", ***Electron Devices IEEE Transactions***, 50(2): 447-454 (2003).
88. Ley M., Boudaden J., Kuznicki Z.T., "Thermodynamic efficiency of an intermediate band photovoltaic cell with low threshold Auger generation", ***Journal of Applied Physics***, 98(4): 44905 1-5 (2005).
89. Navruz T. S., Saritas M., "The effect of Auger mechanism on the efficiency of the intermediate band solar cell", ***22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference***, Milan, Italy, 641-647 (2007).
90. Cuadra L., Marti A., Luque A., "Influence of the overlap between the absorption coefficients on the efficiency of the intermediate band cell", ***IEEE Trans. Elec. Dev.***, 51(6): 1002-1007 (2004).
91. Cuadra L., Marti A., Luque A., "Modelling of the absorption coefficient of the intermediate band solar cell", ***Sixteenth European Photovoltaic Solar Energy Conference***, Glasgow, 15-21 (2000).
92. Navruz T. S., Saritas M., "Efficiency variation of the intermediate band solar cell due to the overlap between absorption coefficients", ***Solar Energy Materials and Solar Cells***, 92(3): 273-282 (2008).
93. Saritas M., "Optimization of Short Circuit Photo Current and Open Circuit Photo Voltage on N+/P and N+/P/P+ Silicon Solar Cell Structures", ***5th National Con. on Electrical Engineering***, KTU, Trabzon, Turkey, 518-524 (1993).
94. Casey H. C., Panish M. B., "Heterostructure Lasers", ***Academic Press***, New York, 161 (1978).

95. Buturla E. M., Cottrell P. E., Grossman B. M., Salsburg K. A., "Finite-element analysis of semiconductor devices: The FIELDAY program", **IBM Journal of Research and Development**, 25( 4): 218-231 (1981).
96. Arifoğlu U., Kubat C., "MATLAB ve mühendislik uygulamaları", **ALFA**, İstanbul, 230-232 (2003).
97. Saritas M., Mckell H.D., "Absorption coefficient of silicon in the wavelength region between 0.80-1.16 micrometer", **Journal of Applied Physics**, 61(10): 4923-4925 (1987).
98. Saritas M., Mckell H.D., "Absorption Coefficient of Silicon in the Wavelength Region Between 0.80-1.16 Micrometer", **Journal of Applied Physics**, 61(10): 4923-4925 (1987).
99. Saritas M., Mckell H. D., "Comparison of Minority Carrier Diffusion Length Measurements in Silicon by the PCD and SPV Methods", **Journal of Applied Physics**, 63(9): 4561-4567 (1988).
100. H. D. Mohring, Hansjörg Gabler, "Solar electric concentrators with small concentration ratios: field experience and new developments", **Photovoltaic Specialists Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE**, Stuttgart, Germany, 1608-1611 (2002).

## **EKLER**

### EK-1. Basit Sabit Noktalı İterasyon Yöntemi [96]

n adet doğrusal olmayan denklem sistemimiz olduğunu düşünelim:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ &\dots\dots\dots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (1.1)$$

Bu denklem sisteminin çözümü için, n adet değişkenin başlangıç değeri verilmelidir.

$$x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} \quad (1.2)$$

Buna göre Eş. 1.1'deki her bir eşitlikte bir değişkeni yalnız bırakarak:

$$\begin{aligned} x_1 &= g_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ x_2 &= g_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ &\dots\dots\dots \\ x_n &= g_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (1.3)$$

Eş. 1.2 ile verilen başlangıç değerleri, Eş. 1.3'de yerine konularak iterasyon algoritması başlatılır.

$$\begin{aligned} x_1^{(1)} &= g_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ x_2^{(1)} &= g_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ &\dots\dots\dots \\ x_n^{(1)} &= g_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Hesaplanan yeni x değerleri başlangıç değerleri ile karşılaştırılır.

EK-1. (Devam) Basit Sabit Noktalı İterasyon Yöntemi [96]

$$\begin{aligned}
 & \left| x_1^{(1)} - x_1^{(0)} \right| \leq \epsilon \\
 & \left| x_2^{(1)} - x_2^{(0)} \right| \leq \epsilon \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \left| x_n^{(1)} - x_n^{(0)} \right| \leq \epsilon
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

Yukarıdaki eşitsizliklerden biri bile sağlanamazsa,  $x_1^{(0)}$  Eş. 1.3'de yerine konulur ve bu süreç Eş. 1.5 sağlanıncaya kadar devam eder.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : NAVRUZ, Tuğba Selcen  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 02. 11. 1975 Ilgaz  
 Medeni Hali : Evli ve çocuklu  
 Telefon : 0 (312) 231 74 00/2303  
 e-mail : [selcen@gazi.edu.tr](mailto:selcen@gazi.edu.tr)

### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                        | Mezuniyet tarihi |
|---------------|--------------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | Gazi Üniversitesi/ Elk-Elektronik M. | 2002             |
| Lisans        | Gazi Üniversitesi/ Elk-Elektronik M. | 1997             |
| Lise          | Çankırı Anadolu Lisesi               | 1993             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                        | Görev               |
|-----------|----------------------------|---------------------|
| 1998-2003 | Ankara Ü. Çankırı MYO      | Öğretim Görevlisi   |
| 2003-2008 | Gazi Ü., Elk-Elektronik M. | Araştırma Görevlisi |

### Görev Aldığı Laboratuar Dersleri

EM-212 Elektroniğe Giriş  
 EM-315 Analog Elektronik  
 EM-317 Analog ve Sayısal Elektronik

### Yabancı Dil

İngilizce

**Yayınlar**

1. SARITAŞ M., TONBUL T. S., “Beş Eksenli Bir Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar ve Yörünge Planlaması”, ELECO’2002 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa.
2. TONBUL T.S., SARITAŞ M., “Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar ve Yörünge Planlaması”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18(1): (2003).
3. NAVRUZ T. S., SARITAS M., ‘Intermediate Band Solar Cells’, ELECO’2005 International Conference on Electrical Electronics Engineering, Bursa, (2005).
4. NAVRUZ T. S., SARITAS M., “Efficiency variation of the intermediate band solar cell due to the overlap between absorption coefficients”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 92(3): 273-282 (2008).
5. NAVRUZ T. S., SARITAS M., “The effect of Auger mechanism on the efficiency of the intermediate band solar cell”, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 641-647 (2007).

**Hobiler**

Kitap okumak, şiir yazmak ve okumak, tiyatro.