

AUGER ETKİLİ ARABAND YAPILI GÜNEŞ PİLLERİNDE AKIMIN ARABAND SEVİYESİNE GÖRE DEĞİŞİMİ

Tuğba Selcen NAVRUZ

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA
selcen@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 19.08.2011; Kabul/Accepted: 23.05.2013)

ÖZET

Araband yapılı güneş pili (ABGP) yasakbandının içinde sahip olduğu araband (AB) sayesinde küçük enerjili fotonları da soğurarak çıkış gerilimini düşürmeden foto-akımı dolayısı ile de verimi artıran bir yapıya sahiptir. ABGP’de hedeflenen verim artışını elde edebilmek için AB’nin optimum enerji seviyesinde bulunması gerekmektedir. Bu çalışmada, Auger etkili üç farklı yapıdaki ABGP için, örtüşmeli ve örtüşmesiz durumlarda, soğurma katsayılarının birbirine eşit olduğu ve enerji ile arttığı koşullarda, ABGP akımlarının AB enerji seviyesi ile değişimleri incelenmiş ve akımın maksimum olduğu noktada verimin de maksimum olduğu ve optimum AB seviyelerinin de bu noktalarda oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, akımın ve verimin maksimum olabilmesi için AB üzerinden üretilen akımların birbirine eşit olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Araband yapılı güneş pili, Auger etkisi, Optimum araband seviyesi

THE VARIATION OF THE CURRENT IN AUGER EFFECT INTERMEDIATE BAND SOLAR CELLS DUE TO THE INTERMEDIATE BAND LEVEL

ABSTRACT

Intermediate band solar cell (IBSC) has a structure that improves the photo-current and efficiency without degrading the output voltage by absorbing the sub-bandgap photons through its intermediate band (IB) inserted inside its forbidden gap. IB should be positioned to an optimum level to achieve the desired efficiency improvement in IBSCs. In this study, the variation of IBSC current due to the IB level is investigated in the cases of overlap and nonoverlap, under the condition of equal and nonequal absorption coefficients for three different Auger effected ABGP and it is obtained that the efficiency is maximum at the point where the current is maximum. The optimum IB levels are also obtained at the same point. Besides, it is obtained that the currents generated through the IB should be equal to each other to provide maximum current and efficiency.

Keywords: Intermediate band solar cell, Auger effect, optimum intermediate band

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

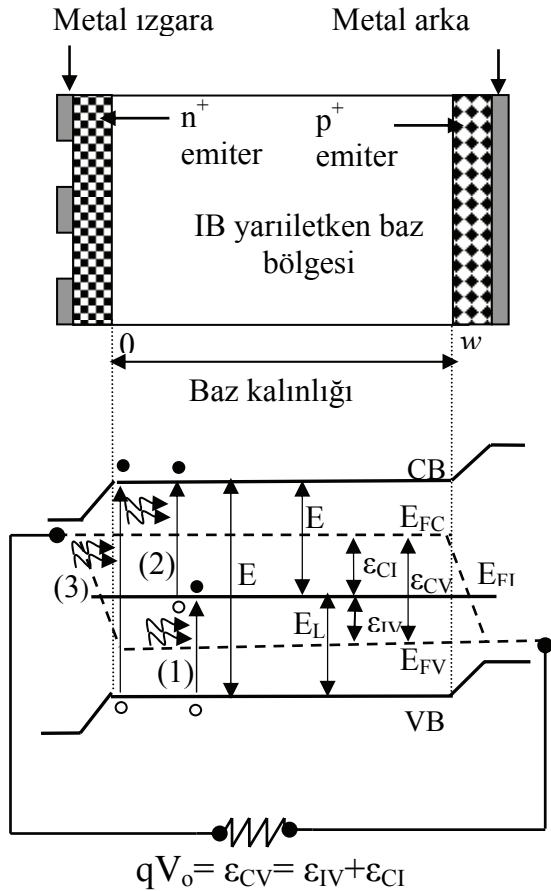
Geleneksel p-n eklem güneş pillerinde verimi sınırlayan en önemli etken, yarıiletkenin band aralığından (E_G) daha küçük enerjiye sahip fotonların soğurulamamasından ve yüksek enerjili fotonların fazlalık enerjilerinin ısı ile harcanmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 1’de görüldüğü gibi, araband yapılı güneş pili, baz bölgesini oluşturan yarıiletkenin yasakband aralığının içine yerleştirilen bir araband sayesinde küçük enerjili fotonları da soğurma kapasitesine sahip bir yapıdadır [1]. 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. Bu tabakaların ışık soğurmadığı ve akıma katkıda bulunmadıkları varsayılmaktadır. Pilin çalışmasında asıl önemli rol baz tabakasına aittir. Araband yapılı baz bölgesine gelen fotonlar; örtüşmesiz durumda, sahip oldukları enerji seviyesine göre ($h\nu$), valans band (VB), iletkenlik bandı (CB) ve AB arasında üç farklı türde elektron geçişine sebep olabilmektedirler (Şekil 1):

- (1) VB→AB, fotonun enerjisi $E_L < h\nu < E_H$ ise,

- (2) $AB \rightarrow CB$, fotonun enerjisi $E_H < h\nu < E_G$ ise,
 (3) $VB \rightarrow CB$, fotonun enerjisi $E_G < h\nu$ ise.

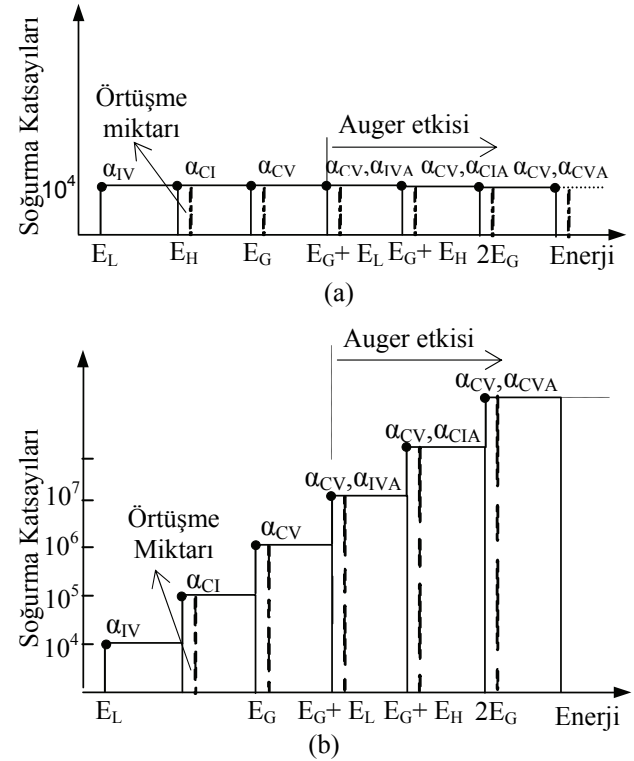
Yukarıdaki geçişlerden her üçünün de verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için, AB'nin yarı dolu olması gerekmektedir. Geleneksel güneş pillerinde, yukarıda sıralanan geçişlerden sadece üçüncüsü gerçekleşmektedir. Yani sadece E_G 'den daha büyük enerjiye sahip fotonlar (3) taşıyıcı üretebilmektedir. ABGP'lerde, $h\nu < E_G$ olan fotonlar da AB üzerinden (1 ve 2) elektron-boşluk çifti üreterek foto-akıma katkıda bulunmaktadır. Böylece çıkış voltajını düşürmeden foto-akımı artırmak mümkün olmaktadır. Şekilde 1'de verilen enerji band diyagramında, AB enerji seviyesinin aynı zamanda fermi enerji seviyesi olarak davrandığı kabul edilmiş [1] ve bu seviye E_{FI} ile gösterilmiştir. AB seviyesi ile VB arasındaki enerji farkı E_L ve AB ile CB arasındaki enerji farkı ise E_H ile temsil edilmektedir. E_{FC} ve E_{FV} sırası ile elektronların ve boşlukların kuasi-fermi seviyelerini göstermektedir. Kuasi-Fermi seviyelerindeki ayrılma miktarı elektronlar için \square_{CI} , boşluklar için \square_{IV} ile gösterilmiştir. Bu yapıda çıkış gerilimi $qV_o = \epsilon_{CV} = \epsilon_{IV} + \epsilon_{CI}$ ile ifade edilmektedir.



Şekil 1. (a) ABGP'ninyapısı, (b) enerji band diyagramı ((a) IBSC structure, (b) IBSC energy band diagram)

ABGP'nin verim sınırı; güneş 6000 K'de siyah cisim ışınması yapan bir kaynak kabul edildiğinde, pil sıcaklığı 300 K iken $E_G = 1,95$ eV için %63,2'dir [1-3]. Araband sayısı sonsuz olduğunda verim sınırı %85'e çıkmaktadır [4]. ABGP yapımında kullanılan yarıiletkende Auger üretim ve rekombinasyonu mevcut ise verimde tek araband için %73 civarında bir teorik verim elde edilmektedir [5-7].

ABGP, α_{VB} , α_{IC} ve α_{CV} olmak üzere üç soğurma katsayısına sahiptir. Bu katsayılar, gelen bir fotonun yukarıda belirtilen üç farklı yolla soğurulma ihtimalini belirlemektedir. Şekil 2'de soğurma katsayılarının enerji ile değişimi, Auger etkisini ve soğurma katsayıları arasındaki örtüşmeyi de içerecek şekilde, soğurma katsayılarının birbirine eşit olması ve olmaması durumları için sunulmuştur. α_{VIA} , α_{ICA} ve α_{CVA} , Auger etkisi altındaki soğurma katsayılarıdır. İdeal ABGP modelinde, soğurma katsayıları arasında örtüşme bulunmadığı kabul edilmişti [1-3]. Bunun anlamı; belli bir enerji aralığında soğurma katsayılarından sadece birinin sıfırdan farklı değere sahip olmasıdır. Örtüşmenin ABGP performansı üzerindeki etkileri [2, 3 ve 8]'de detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 2. Soğurma katsayılarının Auger etkisini de içeren enerji ile değişimi; (a) soğurma katsayıları birbirine eşit, (b) soğurma katsayıları eşit değil (The variation of absorption coefficients due to energy including auger effect; (a) absorption coefficients are equal, (b) absorption coefficients are nonequal)

Auger üretimi, yüksek enerjili fotonlarla üretilen sıcak elektronlara bağlı olarak, çarpışma iyonizasyonu ile

elektronların ve boşlukların bandlar 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.

Önceki çalışmalarımızda, auger ve örtüşme etkilerinin ABGP verimi ve optimum AB enerji seviyeleri üzerindeki etkileri incelenmişti [6,7]. AB enerji seviyesinin elektron ve boşluk akımlarında sebep olduğu değişimler detaylı olarak sunulmuştu [9]. Bu çalışmada, daha önce önerilen üç farklı yapıdaki auger etkili ABGP'lerde foto-akımın AB enerji seviyesi ile değişimi ilk kez incelenmiştir. İncelemeler için, [6,7]'de auger etkili ABGP'lerde optimum band aralığı olarak tespit edilen $E_G=1,42$ eV kullanılmıştır. Bu çalışma, daha önceki çalışmaları tamamlayıcı bir özelliğe sahiptir. Önceki çalışmalarda maksimum verimi sağlamak için optimum AB enerji seviyeleri bulunmuştu. Bu çalışmada, bulunan enerji seviyeleri foto-akım ile ilişkilendirilerek, maksimum verimin neden bu noktalarda sağlandığına açıklık getirilmiştir.

2. MATEMATİKSEL MODEL (MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada, auger etkili ABGP'lerde akımın AB enerji seviyesi ile değişimi detaylı denge yaklaşımı ile incelenmiştir [6-8]. Yapılan hesaplamalarda aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır [1-3]: (i) Bandlar arasında sadece optik ve auger etkili geçişler mümkündür. Termal üretim ve Shockley-Read-Hall rekombinasyonu (SRH) etkileri ihmal edilmiştir. (ii) AB'den akım çıkışı yoktur. (iii) Taşıyıcı mobiliteleri sonsuzdur. (iv) Baz bölgesi tam soğurmayı sağlayacak kalınlıktadır. (v) Işık konsantrasyonu maksimumdur (46000).

Emitterlerde soğurma ve üretim olmadığı kabul edilerek emiter akım katkıları ihmal edildiğinde ve SRH rekombinasyonu hesaba katılmadığında, ABGP'de elektron ve boşlukların üretimi ve rekombinasyonuna bağlı akım yoğunluğu ifadeleri aşağıdaki gibi olmaktadır [7]:

$$J_{gen} = e \int_0^w \left[G_{CV} + G_{IC/VI} + G_{CV}^{Auger} + G_{IC/VI}^{Auger} \right] dx \quad (1.a)$$

$$J_{rec,1} = e \int_0^w \left[\begin{array}{l} R_{CV}^{Rad} + R_{CI}^{Rad} + R_{CV,CI}^{int} \\ + R_{CI,IV}^{int} + R_{CV}^{Auger} + R_{CI}^{Auger} \end{array} \right] dx \quad (1.b)$$

$$J_{rec,2} = e \int_0^w \left[\begin{array}{l} R_{CV}^{Rad} + R_{IV}^{Rad} + R_{CV,IV}^{int} \\ + R_{IV,CI}^{int} + R_{CV}^{Auger} + R_{IV}^{Auger} \end{array} \right] dx \quad (1.c)$$

Yukarıdaki eşitliklerde e elektron yüküdür ve w ise baz kalınlığıdır. Eş. 1.a'daki J_{gen} ABGP'nin kısa devre akımını temsil etmektedir ve foto-üretim ve auger üretim hızlarının toplamalarının integralinin alınması ile elde edilmektedir. $J_{rec,1}$ ve $J_{rec,2}$ iletkenlik bandındaki elektronların ve valans bandındaki boşlukların yok olma hızlarına bağlı rekombinasyon akım yoğunluklarıdır. Bu akımlar, ışımali, dâhili ve auger rekombinasyon hız toplamalarının integrallerinin alınması ile bulunmaktadır. Eşitliklerde $R_{CV}^{Rad}(x)$, $R_{CI}^{Rad}(x)$ ve $R_{IV}^{Rad}(x)$ elektronun CB'den VB'ye, CB'den AB'ye ve AB'den VB'ye ışık yayarak düşmesi ile taşıyıcıların yok olmasını temsil eden ışımali rekombinasyon hızlarıdır. $R_{CV}^{Auger}(x)$, $R_{CI}^{Auger}(x)$ ve $R_{IV}^{Auger}(x)$ terimleri ise ilgili bandlar arasındaki auger rekombinasyon hızlarını göstermektedir. $R_{CV,IV}^{int}(x)$, $R_{CV,CI}^{int}(x)$, $R_{CI,IV}^{int}(x)$ ve $R_{IV,CI}^{int}(x)$ terimleri sırası ile; soğurma katsayıları α_{CV} - α_{VI} , α_{CI} - α_{IC} , α_{IC} - α_{VI} ve α_{VI} - α_{IC} aralarındaki örtüşmeden kaynaklanan dâhili rekombinasyon hızlarıdır.

$G_{CV}(x)$, $G_{VI}(x)$ ve $G_{IC}(x)$ sırası ile, VB'den CB'ye, VB'den AB'ye ve AB'den CB'ye elektron geçişine bağlı foto-üretim hızlarıdır. AB üzerinden gerçekleşen taşıyıcı üretimi, $G_{VI}(x)$ ve $G_{IC}(x)$ hızlarından küçük olanı ile sınırlıdır. Bu sebeple, Eşitlik 1.a'da, bu foto-üretim hızlarından sadece küçük olanın hesaba katılacağı belirtilmek için $G_{IC/VI}$ şeklindeki gösterim kullanılmıştır. $G_{CV}(x)$ aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$G_{CV}(x) = \int_{\varepsilon} \alpha_{CV} F_0 \exp(-\alpha_{TOT}x) d\varepsilon \quad (2)$$

Burada, ε enerjidir $\alpha_{TOT} = \alpha_{CV} + \alpha_{CI} + \alpha_{IV}$ ve F_0 , $\varepsilon + d\varepsilon$ enerji aralığında, birim alana birim zamanda düşen foton sayısıdır.

$$F_0 = X \frac{2\pi}{h^3 c^2} \sin^2 \theta_s \frac{\varepsilon^2}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T_s}\right) - 1} \quad (3)$$

Burada, X ışık konsantrasyonudur ve bu çalışmada 46000 olarak alınmıştır. h Planck sabitidir, c ışık hızıdır ve θ_s güneşten gelen ışınların konik dağılımının yarım-tepe açısıdır ($\sin^2 \theta_s = 1/46000$). k_B Boltzmann sabitini ve T_s güneş sıcaklığını temsil etmektedir. $G_{VI}(x)$ ve $G_{IC}(x)$ de benzer eşitliklerle elde edilmektedir [7].

$G_{VC}^{Auger}(x)$, $G_{VI}^{Auger}(x)$ ve $G_{IC}^{Auger}(x)$ üç band arasındaki auger üretim hızlarıdır. Auger etkili ABGP'lerde, yüksek enerjili fotonların ürettiği sıcak elektronlar, enerjilerinin fazlalık kısmını başka bir elektrona vererek onun bir üst banda çıkmasını

sağlarlar. Örneğin, $E_G + E_L < hv < E_G + E_H$ aralığında bir enerjiye sahip bir fotonun ürettiği sıcak elektron, enerjisinin fazlalık kısmını VB'deki bir elektrona vererek onun AB'ye çıkmasını sağlar. Fotonun enerjisi $E_G + E_H < hv < 2E_G$ aralığında ise üretilen sıcak elektron enerjisini AB'deki bir elektrona vererek onu CB'ye çıkarır. Benzer bir mekanizma VB-CB arasında da gerçekleşebilir. Bu bandlar arasındaki auger üretim hızı:

$$G_{VC}^{Auger}(x) = \sum_{i=1}^{m_{max}} \left[\sigma^i \int \alpha_{CVA} F_0 \exp(-\alpha_{TOT} x) d\varepsilon \right] \quad (4)$$

Burada σ elektron çoğullama olasılığıdır ve bu çalışmada verim sınırı bulabilmek için 1 olarak alınmıştır. m_{max} tek fotonun üretebileceği maksimum taşıyıcı sayısıdır ve auger etkili soğurma katsayılarının toplamı $\alpha_{TOT} = \alpha_{CVA} + \alpha_{CIA} + \alpha_{IVA}$ şeklinde ifade edilmektedir. Benzer eşitlikler $G_{VI}^{Auger}(x)$ ve $G_{IC}^{Auger}(x)$ için de yazılabilir.

$G_{CV}(x)$ ve $G_{VC}^{Auger}(x)$ hem geleneksel p-n eklem güneş pillerinde hem de ABGP'lerde mevcuttur. ABGP'lerde akımdaki asıl iyileştirmeyi $G_{VI}(x)$, $G_{VI}^{Auger}(x)$, $G_{IC}(x)$ ve $G_{IC}^{Auger}(x)$ yani AB üzerinden foton soğurulması ile üretilen taşıyıcılar sağlamaktadır. AB üzerinden üretilen akım yoğunlukları aşağıdaki gibidir:

$$J_{genB,1} = e \int_0^w \left[G_{IC}(x) + G_{IC}^{Auger} \right] dx \quad (5.a)$$

$$J_{genB,2} = e \int_0^w \left[G_{VI}(x) + G_{VI}^{Auger} \right] dx \quad (5.b)$$

$J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$ AB'nin elektron vererek boşalması ve elektron alarak dolması işlemlerini içeren akım yoğunluklarıdır. AB'nin akım katkısı AB üzerinden üretilen bu iki akımın küçüğü ile sınırlıdır. Bu sebeple, maksimum verim elde edebilmek için AB enerji seviyesi bu iki akımı eşitleyecek şekilde belirlenmektedir. Bu çalışmada, toplam kısa devre akımının ve $J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$ 'nin AB enerji seviyesi ile değişimleri araştırılmıştır.

Bu çalışmada asıl hedef, kısa devre akımlarının değişimlerini incelemek olduğundan, karanlık akımı oluşturan rekombinasyon terimlerinin matematiksel eşitlikleri burada verilmemiştir. Eş.1'deki rekombinasyon terimlerinin fiziksel anlamları ve matematiksel ifadeleri [1-3,6,7]'de bulunabilir.

Hesaplamalara dâhil edilmeyen SRH rekombinasyon etkisi [2]'de incelenmiş ve SRH rekombinasyon ömür süresi, ışımalı rekombinasyon ömür süresine eşit ya da ondan daha küçük olduğunda verimi etkilediği görülmüştür. Optimum AB seviyesinin ise SRH

rekombinasyonundan bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, ışımalı rekombinasyon ömür süresinin SRH rekombinasyon ömür süresine kıyasla küçük olduğu, bir başka deyişle ışımalı rekombinasyonun daha hızlı olduğu varsayılmıştır. Direkt band yapılı malzemelerde bu yaklaşım doğru kabul edilmektedir [11].

3. SAYISAL SONUÇLAR ve TARTIŞMA (NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION)

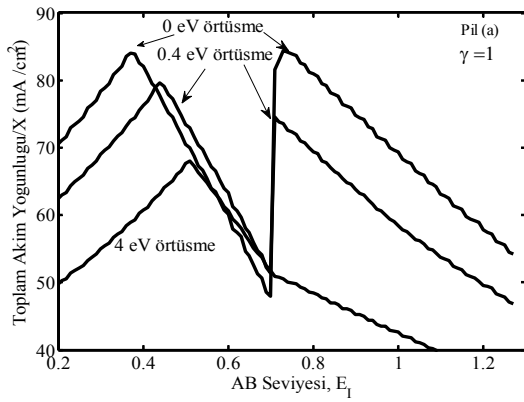
Bu çalışmada, özellikleri aşağıda verilen üç farklı yapıdaki (pil(a), pil(b), pil(c)) ABGP için, optimum araband seviyesinin yerini belirlemede elektron ve boşluk foto-akımlarının rolü; örtüşmeli ve örtüşmesiz durumlar için, soğurma katsayılarının birbirine eşit olması ve olmaması durumlarında incelenmiştir. Pil (a): Her üç band arasında (VB, AB, CB) ışımalı rekombinasyon ve foto-uyarım mümkündür; Auger üretim ve rekombinasyonu sadece araband ile iletkenlik bandı arasında mevcuttur [5]. Pil(b): Araband ile iletkenlik bandı arasında sadece Auger olayına bağlı üretim ve rekombinasyon vardır. VB-AB ve VB-CB arasında ise ışımalı rekombinasyon ve foto-uyarım mümkündür [5]. Pil(c): Her üç band arasında hem ışımalı rekombinasyon ve foto-uyarım hem de Auger üretim ve rekombinasyonu mevcuttur [6,7].

Bu üç ABGP'de, verimin örtüşmeli ve örtüşmesiz durumlarda optimum araband seviyesinin yeri ile değişimi daha önceki çalışmamızda detaylı olarak incelenmiş ve her durum için maksimum verimi sağlayan optimum araband seviyeleri tespit edilmişti [2,3]. Bu çalışmada, toplam akımın ve araband üzerinden gelen elektron ve boşluk akımlarının, araband enerji seviyesine göre değişimleri elde edilerek, daha önce bulunan optimum araband seviyelerinde neden verimin daha yüksek olduğu sorusuna açıklık getirilmiştir. Çalışma boyunca, daha önce Auger etkili pillerde maksimum verimi sağladığı gösterilen $E_G=1,42$ eV olan ABGP kullanılmıştır. Güneşin 6000 K'de siyah cisim ışması yapan bir kaynak olduğu, ABGP sıcaklığının 300 K olduğu, maksimum ışık konsantrasyonu altında ($X=46000$) ve ABGP kalınlığının tam soğurmayı sağlayacak kadar büyük olduğu kabul edilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda çoğullama olasılığının maksimum olduğu varsayılmıştır. Her pil için elde edilen sonuçlar Bölüm 3.1-3.3'de sunulmuştur.

3.1. Pil(a)'da Akımın Araband Enerji Seviyesine Göre Değişimi (The Variation of the Current in Cell (a) Due to the Intermedite Band Energy Level)

Yukarıda belirtilen şartlar altında pil (a) için toplam akımın; 0, 0,4 ve 4 eV örtüşme koşullarında, $\gamma=1$ ($\gamma = \frac{\alpha_{CI}}{\alpha_{IV}} = \frac{\alpha_{CV}}{\alpha_{CI}}$) durumunda E_1 ile değişimi Şekil

3'deki gibi elde edilmiştir. Bu Şekil daha önceki çalışmamızda bulunan, verim- E_1 değişimi ile karşılaştırıldığında [7], verim ve akımın değişim eğrilerinin birbirine çok benzediği ve akımın maksimum olduğu noktalarda verimin de maksimum olduğu, optimum enerji seviyelerinin bu noktalarda tespit edildiği görülmüştür. Örtüşme 0 eV iken akım, E_1 ile M harfine benzer bir değişim göstermekte ve $E_1=0,38$ ve $0,73$ eV'da iki tepe değeri sergilemektedir. Örtüşme meydana geldiğinde ise, verimin [3,7] ve akımın tepe değerleri azalmaktadır. Yasakbandın alt yarısındaki optimum AB seviyesi, örtüşme ile yasakbandın ortasına doğru kaymakta ve 4 eV örtüşme için $0,51$ eV'a ulaşmaktadır. Böylece, örtüşmesiz durumda iki optimum arabandı bulunan pil(a)'da, örtüşmeli durumda optimum AB seviyesi sayısı bire düşmektedir.

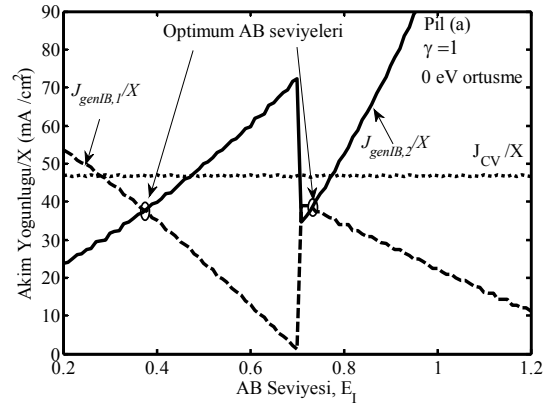


Şekil 3. Pil (a) için toplam akımın, 0, 0,4 ve 4 eV örtüşme koşullarında E_1 ile değişimi (The variation of total current due to E_1 under 0, 0,4 and 4 eV overlap conditions for cell(a))

Verimin ve toplam akımın E_1 ile değişimini daha net açıklayabilmek için, VB'den AB'ye geçen elektronların oluşturduğu akımın $J_{genB,1}$, AB'den CB'ye geçen elektronların oluşturduğu akımın $J_{genB,2}$ ve VB'den CB'ye geçen elektronların oluşturduğu akımın E_1 ile değişimleri örtüşmenin 0, 0,4 ve 4eV değerleri için Şekil 4, 5 ve 6'daki gibi elde edilmiştir. Örtüşmesiz durumda, E_1 'nin küçük değerlerinde AB valans banda yakın olduğu için, valans banddaki elektronlar kolaylıkla arabanda geçebilmekte; AB, iletkenlik bandına uzak olduğundan buradaki elektronların CB'ye geçişi çok hızlı olamamaktadır. Dolayısı ile $J_{genB,1}$ büyük, $J_{genB,2}$ ise daha küçük olmaktadır. AB, VB'den uzaklaştıkça VB'den AB'ye elektron geçiş hızı azalmakta, AB'den CB'ye elektron geçiş hızı ise artmaktadır. $J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$ seri bağlı iki akım kaynağı gibi davranmakta ve AB'nin akım katkısı bu iki akımdan küçüğü ile sınırlanmaktadır. Maksimum akımı eldeabilmek için, $J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$ 'nin birbirine eşit olduğu AB enerji seviyesi optimum AB seviyesi olarak belirlenmektedir. J_{cv} ise AB enerji seviyesinden bağımsız değer almaktadır. Auger etkisiz ABGP'lerde biri yasak bandın $1/3$ 'ünde ve diğeri $2/3$ 'ünde olmak üzere iki optimum AB

seviyesi elde edilmiştir [3,8].

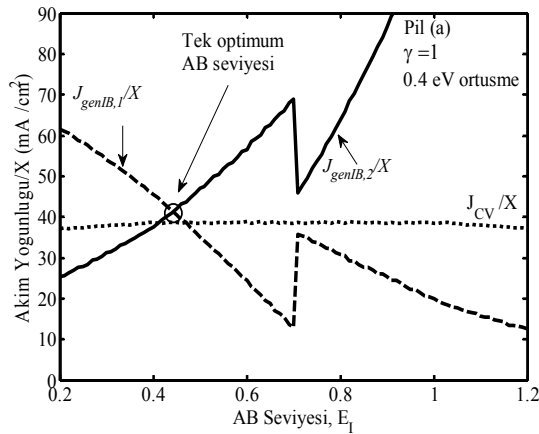
Şekil 4'deki örtüşmesiz durumda, AB, valans banddan uzaklaştıkça $J_{genB,1}$ azalırken $J_{genB,2}$ artmaktadır. Pil(a)'da $J_{genB,2}$ foton soğurulmasına ek olarak, sıcak elektronların sağladığı Auger üretim etkisini de içerdiği için, Auger etkisi içermeyen ABGP'ye kıyasla daha hızlı artmakta ve $E_1=0,38$ eV'da $J_{genB,1}$ 'e eşit hale gelmektedir. AB iletkenlik bandına yakın olduğunda $J_{genB,2}$ çok büyük olmakta, iletkenlik bandından uzaklaştıkça $J_{genB,2}$ azalmakta, $J_{genB,1}$ artmaktadır. Ancak Auger etkisi de içeren $J_{genB,2}$ yasak bandın üst yarısında çok büyük değerlere sahip olduğu için, iki akım yasak bandın ortasına çok yakın bir noktada ($E_1=0,73$ eV) eşitlenebilmektedirler. Böylece, pil (a)'da AB'nin akım katkısı Auger etkisiz pile kıyasla arttığı için bu yapı daha yüksek verim sağlamaktadır [3].



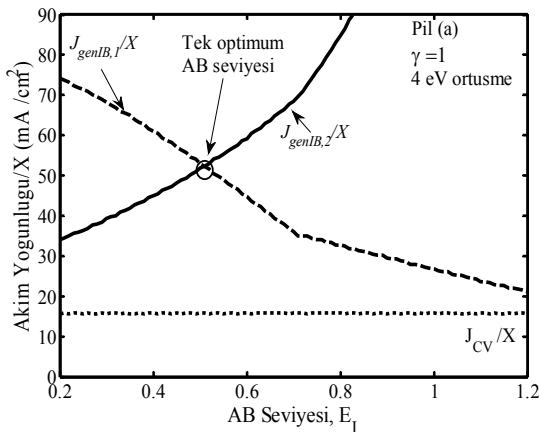
Şekil 4. Örtüşmesiz durumda AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB-CB (J_{CV}) due to E_1 under nonoverlap condition)

ABGP'lerde soğurma katsayıları arasında örtüşme meydana geldiğinde, yüksek enerjili fotonların bir kısmı küçük enerji band aralığında soğurulmaktadır. Örneğin enerjisi $E_H \leq E \leq E_G$ olan bir foton örtüşmesiz durumda, sadece AB'den CB'ye elektron geçişi sağlayacak şekilde soğurulabilir. Ancak örtüşme söz konusu olduğunda bu foton VB'den AB'ye elektron geçişine sebep olacak şekilde de soğurulabilir. Böylece fotonun fazlalık enerjisi boşa gitmiş olur. Benzer şekilde enerjisi E_G 'den büyük olan fotonlar örtüşmesiz durumda sadece VB'den CB'ye elektron geçirerek soğurulurken, örtüşmeli durumda alt bandlardan herhangi biri tarafından soğurulabilir. Bunun sonucu olarak, küçük band aralığında üretilen akım artarken, yüksek band aralıklarında üretilen akım azalmaktadır. Böylece, Auger etkisiz ABGP'lerde daha önce bulunduğu gibi, örtüşme arttıkça, $J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$ eşitlendiği optimum AB seviyesi yasakbandın ortasına doğru kaymakta ve maksimum örtüşme altında (4 eV) yasakbandın tam ortasında tek bir optimum AB elde edilmektedir [2,3]. Pil(a) için örtüşmenin etkisi incelendiğinde, Şekil 5 ve 6'da da görüldüğü gibi E_1 yasakbandın alt yarısında

iken, $J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$ 'nin birbirine eşit olduğu optimum AB seviyesi yasakbandın ortasına doru kaymış; 0,4 eV örtüşme için 0,44 eV ve 4 eV örtüşme için 0,51 eV olmuştur. E_1 yasakbandın üst yarısına çıktığında ise; zaten Auger etkisi sebebiyle çok büyük olan $J_{genB,2}$, örtüşme etkisiyle daha da artmış ve $J_{genB,1}$ hiçbir AB enerji seviyesi için $J_{genB,2}$ 'ye eşit olacak kadar artamamıştır. Bunun neticesi olarak pil(a)'nın örtüşmeli durumda tek optimum AB seviyesine sahip olduğu görülmüştür. J_{cv} 'nin değişimine bakıldığında ise örtüşme miktarı arttıkça yüksek enerjili fotonların altbandlarda soğurulması sonucu bu akımda hızlı bir azalma olduğu ve verimin de bu azalmaya paralel bir azalma gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır [7].



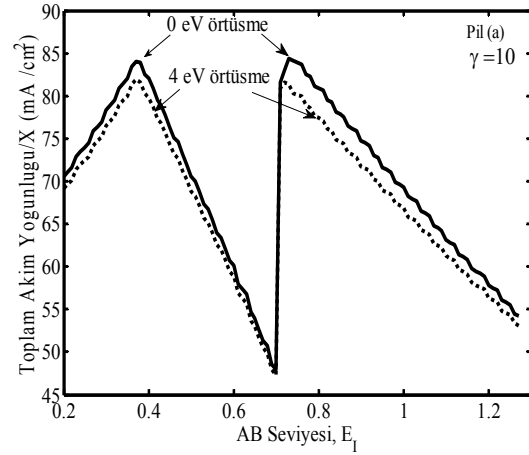
Şekil 5. 0.4 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB- CB (J_{CV}) due to E_1 under 0,4 eV overlap condition)



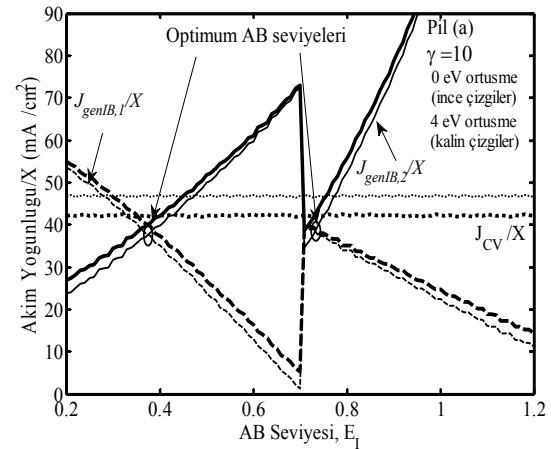
Şekil 6. 4 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi ile (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB- CB (J_{CV}) due to E_1 under 4 eV overlap condition)

Auger etkisiz ABGP'lerde örtüşme etkisinin azaltılması için soğurma katsayılarının enerji ile arttığı $\gamma=10$ durumu önerilmiştir [2,3,10]. Bu durumda küçük band aralığının soğurma katsayısı küçük olduğunda, büyük band aralığına göre daha yavaş

soğurma yapmakta, böylece altbandlar tarafından soğurulan foton sayısı azalmakta ve örtüşme etkisiyle verimde meydana gelen azalma büyük oranda engellenmektedir [2,3,7]. Şekil 7 ve 8'den görüldüğü gibi; Pil(a)'da $\gamma=10$ durumunda, örtüşme akım- E_1 eğrilerini çok çok az etkilemiştir. Akımın az etkilenmesi verimin de az etkilenmesini sağlamıştır [7].



Şekil 7. Pil (a) için, $\gamma=10$ durumunda, toplam akımın, 0 ve 4 eV örtüşme koşullarında E_1 ile değişimi (The variation of total current due to E_1 under 0 and 4 eV overlap conditions, in the case of $\gamma=10$ for cell(a))

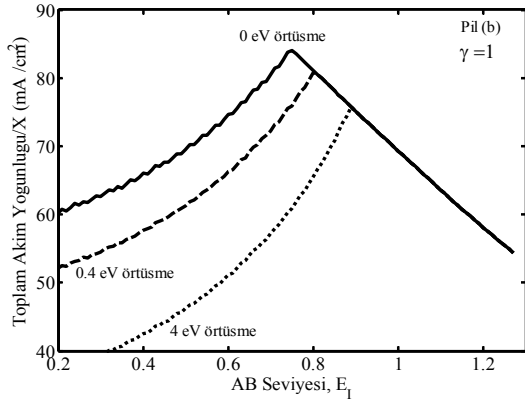


Şekil 8. 0 ve 4 eV örtüşme altında, $\gamma=10$ durumunda, AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi ile (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB- CB (J_{CV}) due to E_1 under 0 and 0,4 eV overlap conditions in the case of $\gamma=10$)

3.2. Pil(b)'de Akımın Araband Enerji Seviyesine Göre Değişimi (The Variation of the Current in Cell (b) Due to the Intermedite Band Energy Level)

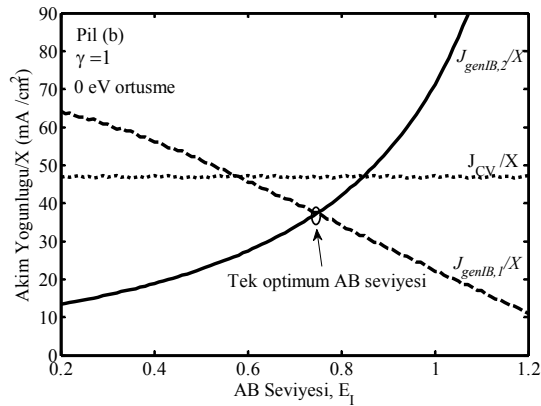
Şekil 9'da, pil (b) için, $\gamma=1$ durumunda, 0, 0,4 ve 4 eV örtüşme koşullarında toplam akım yoğunluğunun AB enerji seviyesine göre değişimi görülmektedir. Akım yoğunluğu örtüşmesiz durumda yasak bandın ortasına yakın bir noktada maksimum değerine ulaşmaktadır.

Bu noktada verimin de maksimum olduğu daha önce gösterilmişti [7].

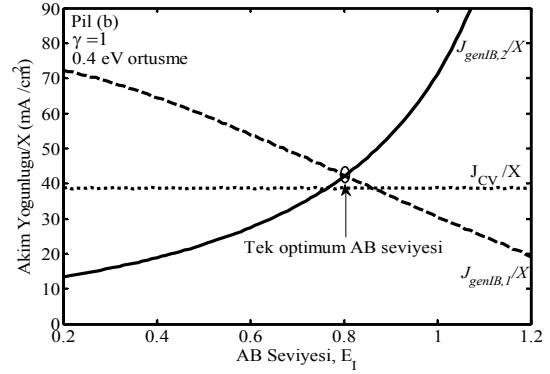


Şekil 9. PİL (b) için, $\gamma=1$ durumunda, toplam akımın, 0, 0.4 ve 4 eV örtüşme koşullarında E_1 ile değişimi (The variation of total current due to E_1 under 0, 0.4 and 4 eV overlap conditions for cell(b) in the case of $\gamma=1$)

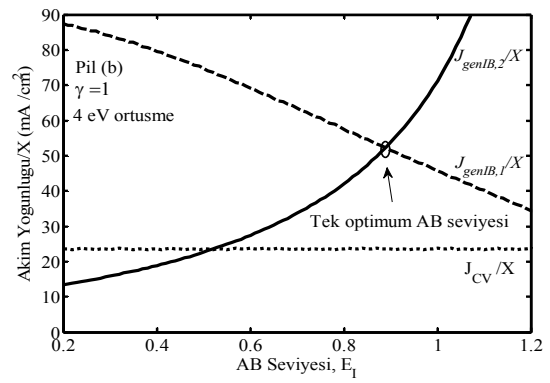
Örtüşme arttıkça, maksimum akımı ve verimi sağlayan optimum AB seviyesi iletkenlik bandına doğru kaymaktadır. Bu değişimi daha iyi açıklayabilmek için Şekil 10, 11 ve 12'de AB üzerinden üretilen akımlar $J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$ ve VB-CB arasındaki elektron geçişinden kaynaklanan akımı temsil eden J_{CV} akımının AB enerji seviyesi ile değişimleri incelenmiştir. PİL(b)'de AB-CB arasında optik geçiş olmadığı sadece Auger etkili geçiş olduğu için yasakbandın alt yarısında $J_{genB,1}$ oldukça küçüktür. Burada AB, CB'ye uzak olduğundan Auger üretimi yavaştır. $J_{genB,1}$ ancak yasak bandın ortasına yakın bir noktada $J_{genB,2}$ 'ye eşit olabilmektedir. Bu sebeple pİL(b)'de sadece bir optimum AB seviyesi elde edilmektedir. Örtüşme meydana geldiğinde, yüksek enerjili fotonların bir kısmı altbandlar tarafından soğurulduğu için AB-CB arasındaki Auger üretimi ve VB-CB arasındaki optik geçişler yavaşlamaktadır. Bunun neticesi olarak örtüşme ile J_{CV} azalmakta, $J_{genB,1}$ 'in $J_{genB,2}$ 'e eşit olduğu optimum AB seviyesi kaymaktadır.



Şekil 10. 0 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB-CB (J_{CV}) due to E_1 under 0 eV overlap condition)

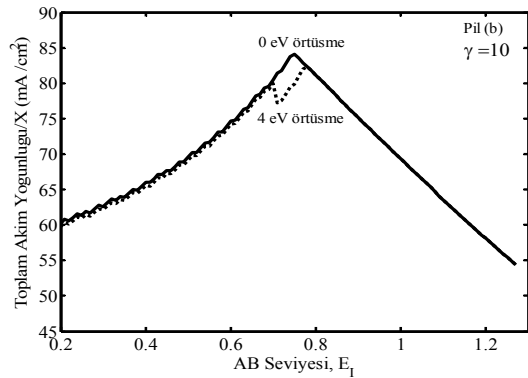


Şekil 11. 0.4 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB-CB (J_{CV}) due to E_1 under 0.4 eV overlap condition)

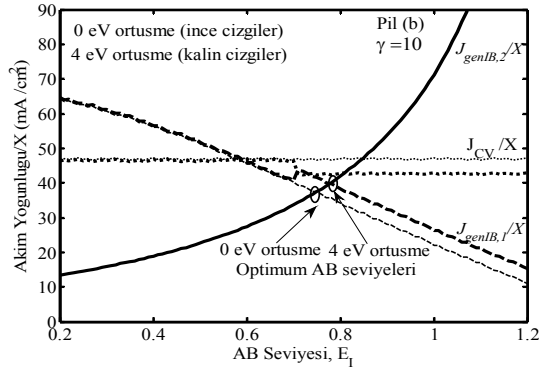


Şekil 12. 4 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB-CB (J_{CV}) due to E_1 under 4 eV overlap condition)

Şekil 13 ve 14'de $\gamma=10$ durumunda akım değişimlerini göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi $\gamma=10$ durumunda, yüksek enerji bandlarında soğurma, küçük enerji bandlarına göre daha hızlı olduğundan örtüşme etkisi azalmaktadır. Hem toplam akımda ve hem de AB üzerinden akan akımlarda çok küçük değişimler meydana gelmektedir.



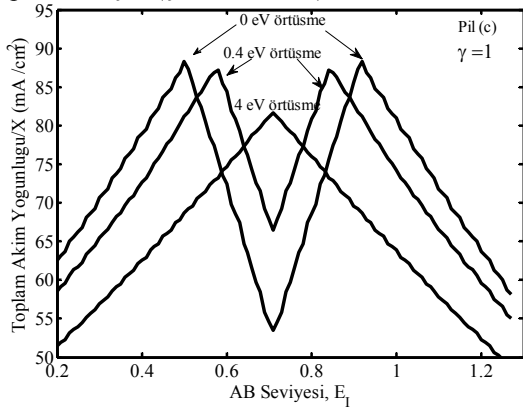
Şekil 13. PİL (b) için, $\gamma=10$ durumunda, toplam akımın, 0 ve 4 eV örtüşme koşullarında E_1 ile değişimi (The variation of total current due to E_1 under 0 and 4 eV overlap conditions, in the case of $\gamma=10$ for cell(b))



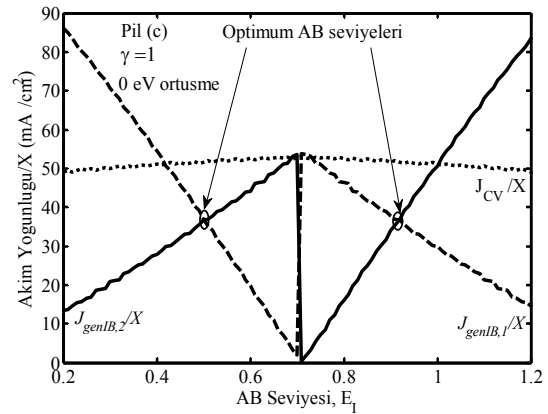
Şekil 14. 0 ve 4 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB-CB (J_{CV}) due to E_1 under 0 and 4 eV overlap condition)

3.3. Pil(c)'de Akımın Araband Enerji Seviyesine Göre Değişimi ((The Variation of the Current in Cell (c) Due to the Intermedite Band Energy Level)

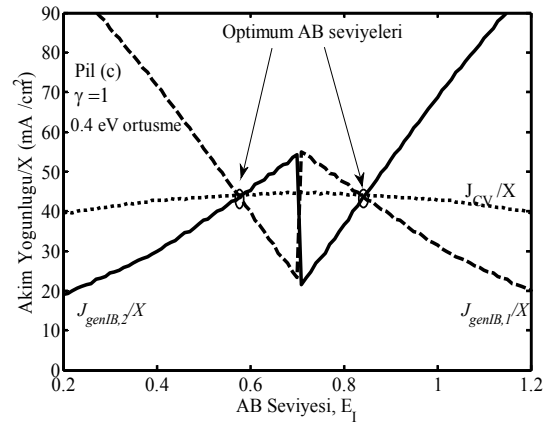
Şekil 15'de görülen pil(c) toplam akımının AB seviyesine göre değişimi, Auger etkisiz ABGP toplam akımının E_1 ile değişimine çok benzerdir [3,7]. Tek farkı pil(c)'de Auger etkisi ile yüksek enerjili fotonlar da soğurulduğundan üretilen akım dolayısı ile de verim daha yüksektir [7]. Pil(c)'de tıpkı Auger etkisiz ABGP'de olduğu gibi AB üzerinden akan akımlar örtüşmesiz durumda yasak bandın 1/3 ve 2/3'ünde birbirine eşitlenerek bu noktalarda üretilen akımın ve verimin maksimum olmasını sağlamaktadırlar (Bkz Şekil 16). Örtüşme arttıkça, Şekil 17 ve 18'de görüldüğü üzere diğer yapılar da olduğu gibi yüksek enerjili fotonların küçük band aralıkları tarafından soğurulması sonucu optimum AB seviyeleri yasak bandın ortasına doğru kaymakta ve maksimum örtüşme durumunda tek optimum AB seviyesi görülmektedir [2,3]. Pil(c) akımları $\gamma=10$ durumunda incelendiğinde, yine değişimin Auger etkisiz pildeki ile aynı olduğu [7] ve pil akımının ve optimum AB seviyelerinin örtüşmeden çok fazla etkilenmediği tespit edilmiştir (Şekil 19 ve 20).



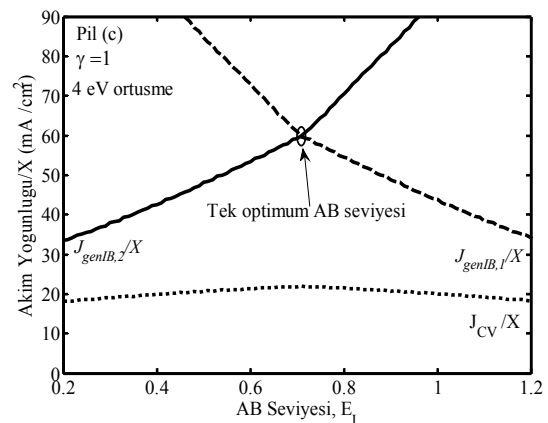
Şekil 15. Pil (c) için, $\gamma=1$ durumunda, toplam akımın, 0, 0.4 ve 4 eV örtüşme koşullarında E_1 ile değişimi (The variation of total current due to E_1 under 0, 0.4 and 4 eV overlap conditions for cell(c) in the case of $\gamma=1$)



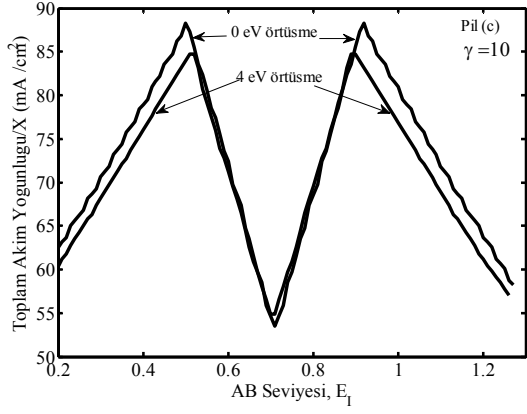
Şekil 16. 0 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB-CB (J_{CV}) due to E_1 under 0 eV overlap condition)



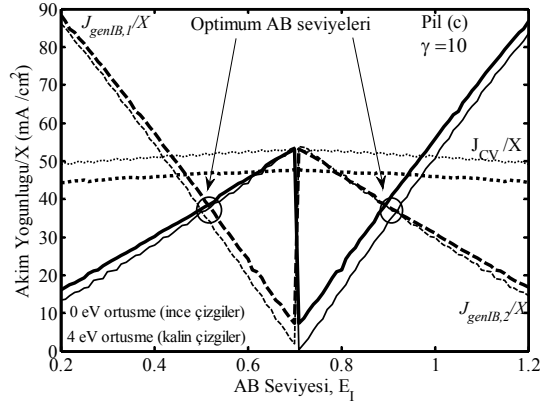
Şekil 17. 0.4 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB-CB (J_{CV}) due to E_1 under 0.4 eV overlap condition)



Şekil 18. 4 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB-CB (J_{CV}) due to E_1 under 4 eV overlap condition)



Şekil 19. PİL (c) için, $\gamma=10$ durumunda, toplam akımın, 0, 0,4 ve 4 eV örtüşme koşullarında E_1 ile değişimi (The variation of total current due to E_1 under 0, 0,4 and 4 eV overlap conditions for cell(c) in the case of $\gamma=10$)



Şekil 20. 0 ve 4 eV örtüşme altında AB üzerinden üretilen akımların ($J_{genB,1}$ ve $J_{genB,2}$) ve VB-CB üzerinden üretilen akımın J_{CV} E_1 ile değişimi (The variation of currents generated through IB ($J_{genB,1}$ and $J_{genB,2}$) and through VB- CB (J_{CV}) due to E_1 under 0 and 4 eV overlap conditions)

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTION)

Bu çalışmada, daha önceki çalışmalarımızda önerilen Auger etkili üç farklı yapıdaki ABGP için [7] $E_G=1,42$ eV alınarak toplam akımın ve VB-AB, AB-CB ve VB-CB bandları arasında soğurulan fotonların ürettikleri akımların AB enerji seviyesi ile değişimleri incelenmiş ve bu incelemelerden yola çıkılarak, önceki çalışmalarda tespit edilen optimum AB seviyelerinin neden bu noktalarda oluştuğuna açıklık getirilmiştir.

ABGP'lerde, geleneksel güneş pillerindeki VB-CB arasında soğurulan fotonlara ek olarak, VB-AB ve AB-CB arasında da küçük enerjili fotonlar soğurulmaktadır. ABGP'lerde verimi artıran etken de bu arabandlarda üretilen akımdır. Bu çalışmada, AB enerji seviyesinin AB üzerinden foton soğurulması neticesi üretilen akımları değiştirdiği ve ABGP veriminin de buna bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Maksimum verimi sağlayan optimum AB seviyesi VB-AB üzerinden üretilen akım ile AB-CB üzerinden üretilen akımın eşitlendiği noktada elde edilmiştir.

PİL (a), (b) ve (c) için örtüşmeli ve örtüşmesiz durumlarda, soğurma katsayılarının eşit olduğu ve enerji ile arttığı koşullar için akımın AB seviyesi ile değişimleri detaylı olarak incelenmiştir. $\gamma=1$ durumunda, pİL (a) örtüşmesiz durumda iki, örtüşmeli durumda yasak bandın alt yarısında tek optimum AB sergilemiştir. PİL (b) örtüşmesiz ve örtüşmeli durumlarda tek optimum AB sergilemiş ve örtüşme atıkça optimum AB seviyesi VB'den uzaklaşmıştır. PİL (c) örtüşmesiz durumda Auger etkisiz ABGP'lerdeki gibi örtüşmesiz durumda yasak bandın 1/3 ve 2/3'ünde iki optimum AB'ye sahiptir. Örtüşme ile bu optimum AB'ler yasakbandın ortasına doğru kaymakta ve maksimum örtüşme altında EG'nin ortasında tek araband oluşmaktadır. $\gamma=10$ durumunda ise bütün piller örtüşmeden daha az etkilenmişlerdir. Optimum AB'lerin yeri ise hemen hemen hiç değişmemektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Luque A., Martí A., "Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels", **Phys Rev Lett**, Cilt 78, No 26, 5014-5017, 1997.
2. Navruz T. S., Sarıtaş M., "Efficiency variation of the intermediate band solar cell due to the overlap between absorption coefficients", **Sol Energ Mat Sol C**, Cilt 92, No 3, 273-282, 2008.
3. Navruz T.S., **Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinde Verim Optimizasyonu**, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
4. Cuadra L., Martí A., Luque A., "Influence of the overlap between the absorption coefficients on the efficiency of the intermediate band cell", **IEEE Trans. Elec. Dev.**, Cilt 51, No 6, 1002-1007, 2004.
5. Brown A.S., Green M. A., "Intermediate band solar cell with many bands: Ideal performance", **J Appl Phys**, Cilt 94, No 9, 6150- 6158, 2003.
6. Ley M., Boudaden J., Kuznicki Z.T., "Thermodynamic efficiency of an intermediate band photovoltaic cell with low threshold Auger generation", **J Appl Phys**, Cilt 98, No 4, 44905 1-5, 2005.
7. Navruz T. S., Sarıtaş 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.
8. Navruz T. S., Sarıtaş M. "The detailed analysis of Auger effect on the efficiency of intermediate band solar cells" **Sol Energ Mat Sol C**, Cilt 93, No 11, 1913-1922, (2009).
9. Navruz T. S., "The Effect of Overlap between Absorption Coefficients on the Variation of Current Densities in Intermediate Band Solar Cells", **ELECO'2009 International Conference on Electrical Electronics Engineering**, Bursa, 1-19 -23, 2009.

