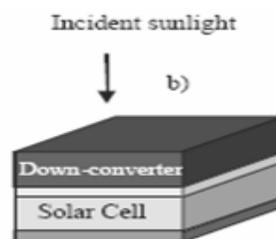


## BAB 3

### KONSEP DASAR

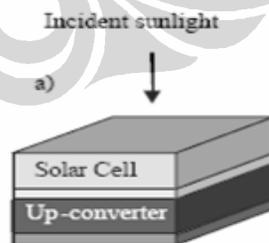
#### 3.1 Konsep Dasar *Up / Down – Conversion*

Sebagaimana diketahui penerapan konsep *up/down conversion* untuk mengurangi rugi – rugi akibat *thermalization* dan *transmission-loss*. Fenomena dari konsep tersebut adalah dengan mengubah atau mengkonversi energi photon untuk memaksimalkan terjadinya pasangan elektron – hole (*e-h pairs*). Untuk kasus *thermalization loss*, dapat terjadi ketika energi photon yang diserap oleh *solar cell* sangat besar melebihi batas minimal energi *gap* pada bahan semikonduktor yang digunakan. Hal tersebut dapat terjadi oleh spektrum cahaya matahari yang memiliki panjang gelombang yang tidak cukup besar. Sebagai contoh pada spektrum cahaya tampak, cahaya biru dengan energi 2,6 eV memiliki intensitas besar dan dapat menimbulkan *thermalization loss* pada silikon *solar cell* yang memiliki energi *gap* 1,12 eV. Oleh karena itu divais *down converter* ditambahkan pada jenis silikon *solar cell* untuk mengurangi rugi yang timbul dengan harapan dapat meningkatkan efisiensi yang dihasilkan. Selain dapat menimbulkan panas, *thermalization loss* dapat mengurangi nilai tegangan *open circuit* (*Voc*). Diketahui penurunan sekitar 0,4 % untuk setiap kenaikan satu derajat celcius pada bahan silikon *solar cell* [3]. Penerapan *up-converter* dilakukan di atas permukaan *solar cell*, seperti terlihat pada Gambar 3.1. Hal tersebut didasari oleh spektrum cahaya atau photon yang memiliki energi lebih besar dari silikon memiliki *absorption depth* yang rendah, sehingga diharapkan sebelum diserap oleh *solar cell*, dikonversi terlebih dahulunya oleh *down-converter*.



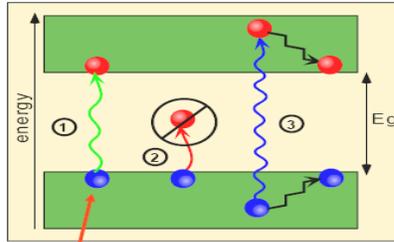
Gambar 3.1. Struktur *solar cell* dengan aplikasi *down-converter* [1].

Untuk mendapatkan hasil yang maksimal, karakteristik *solar cell* harus dirancang sesuai dengan spektrum cahaya optimal yang dikonversi oleh *down-converter*. Untuk konsep divais *down-converter* dijelaskan pada sub-bab 3.2 secara *band diagram*. Kemudian untuk mengurangi *transmission loss* pada *solar cell*, adalah dengan menerapkan divais *up-converter*. *Transmission loss* diakibatkan oleh energi photon yang diserap lebih kecil dari energi *gap*, dan umumnya photon yang memiliki panjang gelombang ( $\lambda$ ) yang cukup besar seperti inframerah ( $\lambda = 10-10^3$  nm). Inframerah merupakan spektrum cahaya yang dipancarkan oleh matahari cukup lama waktunya, namun jika ingin dimaksimalkan oleh *solar cell*, inframerah memiliki *absorption depth* yang dalam. Hal tersebut memaksa kita untuk menentukan kedalaman *junction* yang dalam pula, padahal letak *junction* yang dalam dari permukaan *solar cell* memberikan peluang terjadinya rekombinasi lebih besar, karena jarak antara *junction* dan *contact* juga semakin jauh. Untuk mengurangi masalah – masalah tersebut, maka diterapkan konsep *up-conversion* pada *solar cell*. Letak divais *up-converter* ditambahkan dibawah *solar cell*, mengingat spektrum cahaya yang akan dikonversi memiliki *absorption depth* yang dalam, dan cukup jauh dari *junction* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Seperti penerapan *down-converter*, karakteristik *solar cell* yang digunakan harus dirancang secara optimal pada spektrum cahaya yang dihasilkan oleh *up-converter*. Penjelasan lebih lanjut tentang konsep *up-conversion* dibahas pada sub-Bab 3.2



**Gambar 3.2. Struktur *solar cell* dengan aplikasi *up – converter* [1].**

Gambar 3.3 menunjukkan proses timbulnya *losses* saat terjadi *electron absorption* secara *band diagram*.



**Gambar 3.3. Mekanisme *losses* pada proses *electron absorption* [7].**

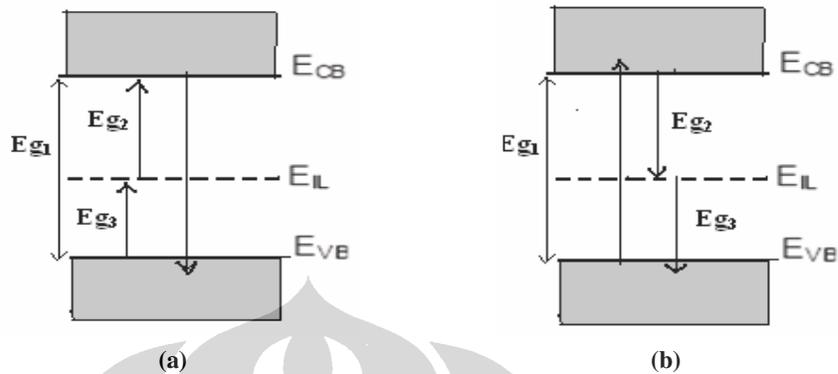
Mekanisme *losses* yang dapat terjadi adalah :

- (1) Energi photon lebih besar dari  $E_g$ , ( $E_p > E_g$ ) mengeksitasi elektron membentuk muatan,
- (2) energi photon lebih kecil dari  $E_g$  ( $E_p < E_g$ ) tidak dapat menghasilkan mengeksitasi elektron maka terjadi *transmission loss*,
- (3) energi yang terdapat pada photon melebihi  $E_g$  akan terbuang menjadi panas pada *solar cell* sehingga timbul *thermalization loss*.

### 3.2 Konsep *Up / Down – Conversion Secara Band Diagram*

Penjelasan konsep *up/down-conversion* secara *band diagram*, tidak terlepas dari kehadiran *sub-band gap* yang dibentuk atau adanya tingkat energi yang berada didalam *gap* yang disebut *intermediate level* (IL). Terbentuknya *intermediate level* mampu sebagai tempat transit elektron baik dari pita konduksi maupun dari pita valensi, hal tersebut tergantung dari jenis impuritas yang diberikan. Impuritas dapat membentuk tingkat energi didalam *gap* yang berlaku seperti *electron trap*. Oleh karena itu, divais *up/down-converter* dibentuk dari bahan *photoluminescence* jenis *rare earth* setelah dilakukan proses impuritas. *Band diagram* yang ditunjukkan Gambar 3.4 menunjukkan karakteristik *up/down-conversion*. Dalam implementasinya, banyak referensi yang menyatakan bahwa untuk membentuk divais dengan karakteristik *up/down-converter* memerlukan jenis material khusus seperti  $BaCl_2$ ,  $NaYF_4$  atau  $YF_3$  yang didoping *Trivalent*

Erbium ( $\text{Er}^{3+}$ ) [6], menghasilkan karakteristik energi *band* seperti yang dijelaskan tersebut.



**Gambar 3.4. Karakteristik konsep up / down-conversion secara band diagram;**

**(a) Konsep up - conversion.**

**(b) Konsep down - conversion.**

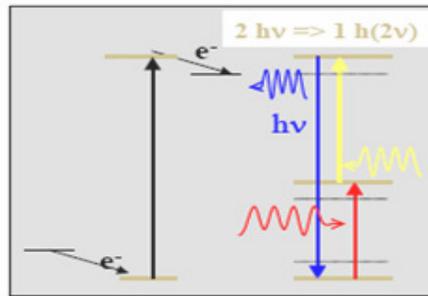
Dari Gambar 3.4.(a), konsep *up-conversion* melibatkan dua langkah dalam eksitasi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi, yaitu elektron menempati *intermediate level* kemudian menempati pita konduksi. Namun saat proses relaksasi atau emisi, elektron tidak melalui *intermediate level*. Konsep ini diharapkan mampu mengkonversi energi photon yang diserap pada bahan semikonduktor yang lemah atau lebih kecil dari energi *gap* menghasilkan energi photon yang lebih besar. Secara struktural bisa dilihat pada transisi dari pita konduksi ke pita valensi, elektron melepaskan energi yang lebih besar dibanding energi yang diserap, dimana elektron melalui *intermediate level*. Pada saat eksitasi elektron, boleh jadi melibatkan dua buah photon dengan energi yang lebih rendah dibanding energi *gap*, namun saat transisi radiasi elektron melepas energi minimal sebesar energi *gap*. Minimal photon yang diserap untuk dapat mengeksitasi adalah sebesar  $E_{g1}$ , begitu juga saat proses emisi melepas energi photon yang sebanding. Sedangkan energi photon yang diperlukan pada *up-converter* untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi ( $V_B$ ) adalah  $E_{g3}$  dan  $E_{g2}$  untuk eksitasi dari IL ke pita konduksi ( $C_B$ ). Diketahui bahwa  $E_{g1} = E_{g2} + E_{g3}$ , maka hal tersebut mengindikasikan bahwa *up-converter* melibatkan dua buah

photon dengan energi lemah dan menghasilkan photon dengan energi yang lebih besar. Konsep ini diharapkan mampu mengurangi *transmission loss* pada *solar cell*. Selain itu *up-converter* dapat mengkonversi spektrum inframerah menjadi cahaya tampak.

Konsep *down-converter* adalah kebalikan dari *up-conversion*, yaitu pada konsep *dow-conversion* terdapat satu langkah dalam eksitasi elektron dan dua buah langkah saat proses emisi atau transisi radiasinya. Konsep ini mampu mengkonversi energi photon yang besar menjadi energi photon yang lebih kecil. Hal tersebut dimungkinkan karena pada saat eksitasi elektron membutuhkan energi yang lebih besar dari energi *gap*, sedangkan saat transisi radiasi melepaskan dua buah photon dengan energi hampir setengah dari energi *gap*. Sebagaimana ditunjukkan Gambar 3.4.(b), untuk eksitasi minimal energi yang dibutuhkan adalah  $E_{g1}$ , sedangkan untuk proses emisi masing – masing melepaskan energi minimal sebesar  $E_{g2}$  dan  $E_{g3}$ . maka diketahui bahwa *down-converter* mengkonversi energi yang besar menjadi energi yang lebih kecil. Konsep *down-conversion* ditujukan untuk mengurangi *thermalization loss*, akibat energi photon yang diserap oleh *solar cell* terlalu besar. Secara teoritis dijelaskan konsep ini mengkonversi spektrum cahaya dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) yang pendek menjadi lebih panjang.

### 3.2.1 Spektrum Cahaya Dalam Konsep *Up / Down – Conversion*

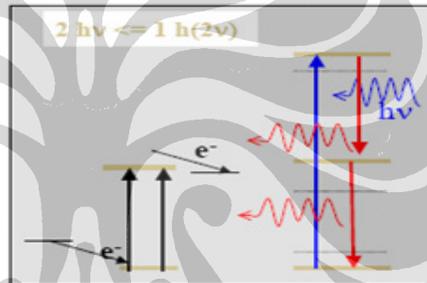
Sebagaimana konsep *up/down-conversion* diterapkan untuk mengkonversi energi photon, tentunya panjang gelombang photon juga dipengaruhi oleh konsep ini dan spektrum cahaya yang dihasilkan tentunya juga berbeda – beda. Dalam sub-bab ini dibahas konsep *up/down-conversion* dari sisi panjang gelombang photon yang akan dikonversi maupun hasil dari konversi tersebut. Sebagai contoh Gambar 3.5 menunjukkan beberapa spektrum cahaya yang dihasilkan oleh *up-converter*, hal ini dapat terjadi karena tergantung dari besar energi *gap* dan jarak tingkat energi *intermediate level* terhadap pita valensi atau pita konduksi.



**Gambar 3.5.** Spektrum cahaya yang melibatkan konsep *up – converter* [8].

Dari Gambar 3.5 menunjukkan pada proses radiasi photon menghasilkan spektrum cahaya biru. Hal ini menunjukkan bahwa jarak energi *gap* pada *up-converter* sekitar 2,6 eV, karena untuk mengemisikan cahaya biru dengan panjang gelombang 455 – 499 nm, elektron minimal melepas energi sebesar 2,6 eV. Kemudian pada proses *electron absorption* terdapat dua langkah yang melibatkan dua buah photon dengan spektrum cahaya yang berbeda. Pertama, elektron tereksitasi dari pita valensi melalui *intermediate level* menyerap energi photon dengan spektrum pada cahaya merah. Cahaya merah memiliki panjang gelombang sekitar 630 – 700 nm, sehingga energi yang dimiliki lebih kecil dibanding cahaya biru yang dihasilkan oleh *up-converter*. Kedua, elektron dapat tereksitasi dari *intermediate level* ke pita konduksi dengan menyerap energi photon dalam spektrum cahaya kuning yang memiliki panjang gelombang yang lebih pendek namun memiliki energi sedikit lebih besar dari cahaya merah. Dari pernyataan diatas, maka karakteristik *solar cell* yang dapat dibuat sebaiknya optimal pada spektrum cahaya biru, karena *up-converter* sebagaimana ditunjukkan Gambar 3.5 mengkonversi dua spektrum cahaya merah dan kuning menghasilkan cahaya biru. Penerapan konsep *up-conversion* ini memungkinkan untuk diimplementasikan, karena pada *solar cell* yang optimum pada cahaya biru, merah, kuning, dan cahaya yang panjang gelombangnya lebih panjang dari cahaya biru kurang maksimal menghasilkan e-h pairs, karena cahaya tersebut memiliki *absorption depth* dan kedalaman *junction* yang lebih dalam.

Pada konsep *down-conversion*, proses *electron absorption* hanya dalam satu langkah, yaitu elektron tereksitasi langsung dari pita valensi ke pita konduksi tanpa melalui *intermediate level*. Sedangkan pada transisi radiasi terdapat dua langkah yaitu dari pita konduksi menuju *intermediate level*, kemudian dilanjutkan dari *intermediate level* ke pita valensi. Sebagai contoh pada Gambar 3.6 menunjukkan spektrum cahaya yang yang dihasilkan ataupun yang dilibatkan untuk mengeksitasi elektron. Cahaya biru sebagai photon datang yang diserap oleh *down-converter* untuk mengeksitasi elektron dalam proses *electron absorption*. Hal tersebut menunjukkan bahwa divais *down-converter* memiliki energi *gap* sebesar 2,6 – 2,7 eV yang berdasarkan panjang gelombang cahaya biru.



**Gambar 3.6.**Spektrum cahaya yang melibatkan konsep *down – conversion* [8].

Kemudian untuk transisi radiasinya, terlihat *down-converter* tersebut mengemisikan cahaya merah. Hal ini disebabkan karena jarak energi *gap* antara pita konduksi ke *intermediate level*, maupun dari *intermediate level* ke pita valensi sekitar setengah dari energi *gap* sesungguhnya (antara pita valensi dan pita konduksi). Akibatnya panjang gelombang photon yang diemisikan juga lebih besar dibanding photon yang diserap. Maka dapat dinyatakan bahwa *down-converter* tersebut mengkonversi dari energi yang lebih tinggi menjadi lebih rendah, sehingga konsep ini diterapkan untuk mengurangi timbulnya *thermalization loss*. Untuk perancangan *solar cell*, sebaiknya dibuat optimal pada cahaya yang dihasilkan *down-converter* tersebut. Dalam hal ini cahaya merah. Spektrum cahaya merah memiliki *absorption depth* lebih dalam dan menghasilkan energi photon yang lebih kecil dibanding cahaya biru, oleh karena itu juga *down-*

*converter* diletakkan diatas permukaan *solar cell* agar photon yang diserap tidak memiliki energi yang terlalu besar yang dapat menimbulkan rugi – rugi dalam panas.

### 3.3 Proses Eksitasi dan Emisi Melibatkan *Level Energi Trap*

Tingkat energi yang dapat dibentuk didalam *gap* atau disebut juga *intermediate level*, dapat dilakukan dengan impuritas pada suatu material tertentu. Tingkat energi ini berlaku sebagai *electron trap* yang dapat ditempati elektron yang telah terkeksitasi ataupun saat berekombinasi secara radiatif. Untuk menentukan tingkat energi ini, yang perlu diperhatikan adalah jenis material yang digunakan. Dalam pembentukan *up/down-converter*, material *rare earth* yang umum digunakan adalah *Trivalen Erbium* ( $Er^{3+}$ ) yang ditambahkan ke material *rare earth* lainnya, sehingga terbentuk karakteristik level energi sebagai trap yang dapat mengabsorpsi dan emisi photon dengan panjang gelombang yang berbeda. Kemudian karakteristik *converter* yang telah memiliki *intermediate level* juga memiliki karakteristik tersendiri, misalnya *electron life time* ( $\tau$ ) yang menempati *intermediate level* tersebut. Dari referensi [9], jika kita mempertimbangkan energi *trap* pada  $E_t = E_i$  dalam konsentrasi  $N_t$ , maka probabilitas ditempatinya energi *trap* adalah :

$$f(E_t) = f(E_i) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_t - E_F}{k.T}}} = \frac{ni}{ni + p_o} \quad (3.1)$$

Konsestrasi pada *trap* yang ditempati oleh elektron :

$$n_{t_o} \equiv N_t - N_t \frac{ni}{ni + p_o} = N_t \frac{p_o}{ni + p_o} \quad (3.2)$$

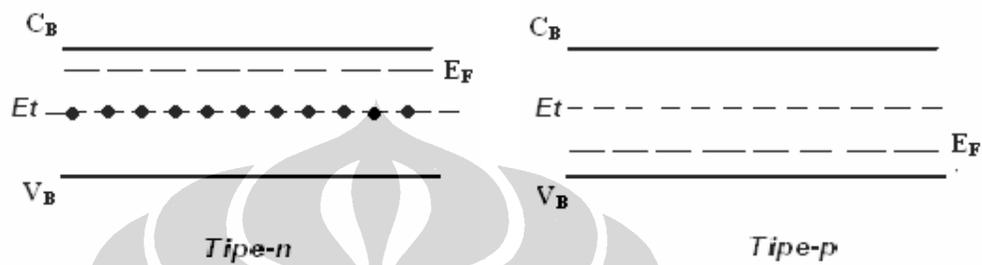
Sehingga konsentrasi dari energi *traps* yang kosong adalah :

$$N_t - n_{t_o} = N_t - N_t \frac{ni}{ni + p_o} = N_t \frac{p_o}{ni + p_o} \quad (3.3)$$

Pada referensi [9] ditentukan kedudukan *trap* bergantung pada *doping* :

- Untuk tipe - n :  $p_o \ll n_i \rightarrow n_{to} \approx N_t$ , sebagian besar *trap* penuh
- Untuk tipe - p :  $p_o \gg n_i \rightarrow n_{to} \ll N_t$ , sebagian besar *trap* kosong

Maka jika dilihat seara band diagram, tingkat energi yang mungkin ditempati oleh elektron atau *hole* dapat digambarkan sesuai pada Gambar 3.7.

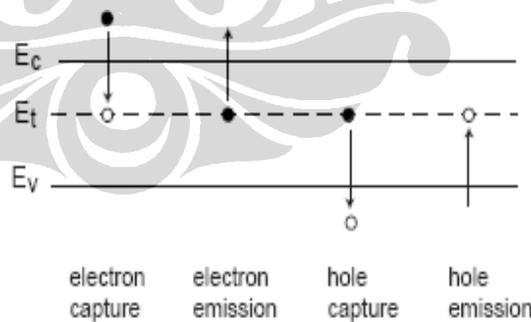


**Gambar 3.7. Diagram energi band dengan elektron trap pada semikonduktor:**

**(a) tipe - n**

**(b) tipe - p.**

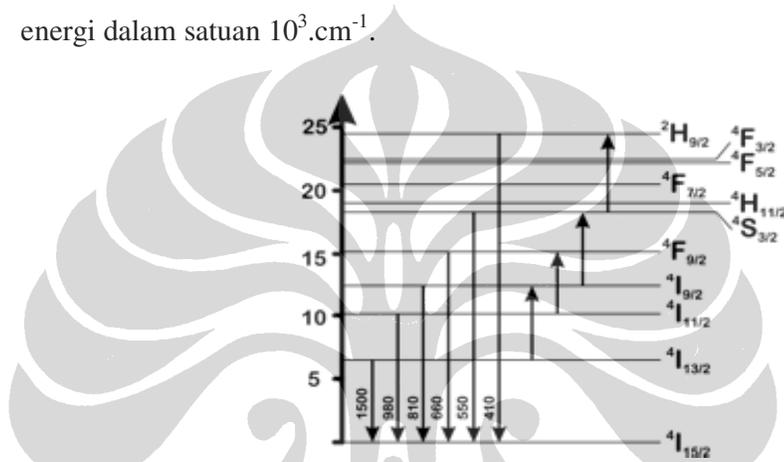
Terdapat empat dasar proses yang terjadi pada divais semikonduktor dengan energi *trap* didalamnya yang dapat dilihat pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.8. Proses dasar yang terjadi pada trap melibatkan elektron dan hole [9].**

Konsep *electron trap* yang ditunjukkan Gambar 3.7 dan Gambar 3.8 merupakan representasi konsep yang diterapkan pada *up/down-converter* pada *solar cell*.

Dari proses yang terjadi, maka konsep tersebut diharapkan mampu mengurangi timbulnya *thermalization-loss* dan *transmission-loss*. Dalam aplikasinya nanti, karakteristik material *rare earth* dipilih untuk membentuk *up/down-converter*. Jika dilihat dari skematik konfigurasi tingkat energi Erbium ( $\text{Er}^{3+}$ ) dalam proses absorpsi dan emisi, maka dapat dilihat pada Gambar 3.9. Dari gambar tersebut absorpsi optimum dengan panjang gelombang sekitar 1500 nm dapat mengeksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi dari  $^4\text{I}_{13/2}$  sampai  $^2\text{H}_{3/2}$  dan menghasilkan emisi dalam bermacam panjang gelombang. Pada sumbu vertikal menunjukkan besar energi dalam satuan  $10^3 \cdot \text{cm}^{-1}$ .



**Gambar 3.9. Tingkat Energi Trivalen Erbium.** Arah panah ke atas adalah proses eksitasi Hasil emisi ditunjukkan dengan arah panah ke bawah [10].

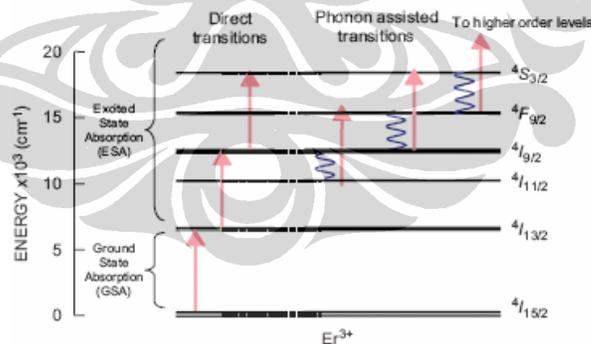
Trivalen Erbium ( $\text{Er}^{3+}$ ) menjadi salah satu material *rare earth* yang tepat untuk membentuk devais *up-converter* pada *solar cell*, karena dapat terjadi beberapa kali transisi secara absorpsi dari  $^4\text{I}_{15/2}$  ke  $^4\text{I}_{13/2}$  atau mengemisikan photon dengan energi  $6300 \text{ cm}^{-1}$  dan  $6700 \text{ cm}^{-1}$  ( $1480 \text{ nm} - 1580 \text{ nm}$ ) [10]. Hal tersebut didukung dengan karakteristik *peak* absorpsi pada jenis – jenis material *up-converter* dengan doping  $\text{Er}^{3+}$  (Tabel 2.1). Untuk menghasilkan *up-converter* yang baik dalam mengemisikan photon, maka digunakan material  $\text{NaYF}_4$  dengan rekombinasi *non-radiative* yang rendah sebagai *host* material dari doping Erbium [12]. Karakteristik material tersebut membuat  $\text{NaYF}_4$  menghasilkan *external quantum efficiency* (EQE) yang cukup baik. Absorpsi spektrum cahaya inframerah

(~1500 nm) atau yang mendekati inframerah (~980 nm) dan menghasilkan emisi cahaya tampak menjadi mungkin untuk didapat.

### 3.4 Mekanisme Pada Proses *Up – Conversion*

Proses eksitasi elektron dari tingkat energi yang rendah ke tingkat energi yang lebih tinggi dalam material *rare earth* seperti  $\text{Er}^{3+}$  melibatkan beberapa mekanisme yang dominan terjadi. Dari referensi [11], dibahas mengenai mekanisme dominan tersebut yang terjadi, dan  $\text{Er}^{3+}$  dijadikan sampel. Walaupun pada jenis *rare earth* lainnya juga dapat terjadi. Mekanisme – mekanisme dominan yang terjadi antara lain adalah *ground state absorption / excited state absorption* (GSA/ESA), *energy transfer up-conversion* (ETU), *co-operative processes*, dan *avalanche up-conversion*.

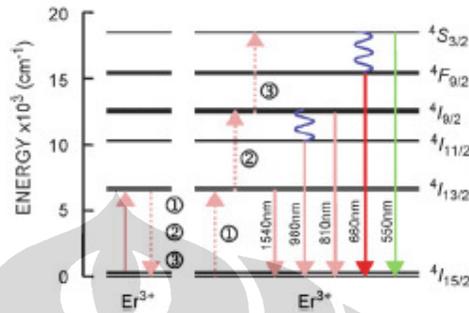
Mekanisme GSA/ESA adalah mekanisme yang bisa dipahami dengan mudah, yaitu mekanisme absorpsi dari *ground state*, kemudian dilanjutkan proses *excitation state absorption*. GSA melibatkan eksitasi elektron ke *intermediate level* (IL), kemudian ESA melibatkan eksitasi elektron dari IL ke pita konduksi. Kemudian emisi photon dari pita konduksi ke pita valensi. Mekanisme tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.10.



**Gambar 3.10.** Tingkat energi  $\text{Er}^{3+}$  menunjukkan *multi-step up-conversion*.

Panah ke atas merepresentasikan proses *single photon absorption* (1480 – 1580 nm). Garis bergelombang menunjukkan emisi phonon [11].

Kemudian mekanisme ETU dapat terjadi pada ion saat eksitasi mentransfer energi pada ion disekitarnya, atau tingkat eksitasi timbul pada tingkat energi yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan Gambar 3.11 dan proses ini direpresentasikan dengan langkah (1), (2) dan (3).

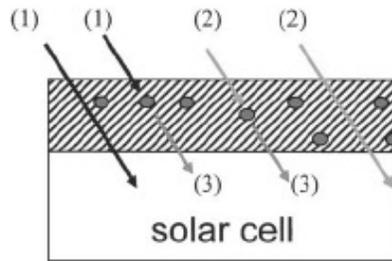


**Gambar 3.11. Tiga langkah proses ETU antara dua buah  $Er^{3+}$ . Garis bergelombang menunjukkan emisi phonon [11].**

Proses relaksasi pada salah satu ion  $Er^{3+}$  dapat mentransfer energi pada ion  $Er^{3+}$  disekitarnya, sehingga memberikan energi yang lebih tinggi pada photon [11]. Untuk proses dalam dua langkah, photon diemisikan dengan energi lebih besar dari *band gap* silikon [11]. Berdasarkan mekanisme – mekanisme yang telah disebutkan, mekanisme *up-conversion* bergantung pada *life time* elektron dan keadaan metastabil pada tingkat *intermediate*. Semakin lama elektron dapat berada pada tingkat energi setelah terseksitasi, maka semakin besar kemungkinan terjadi *up-conversion* [11].

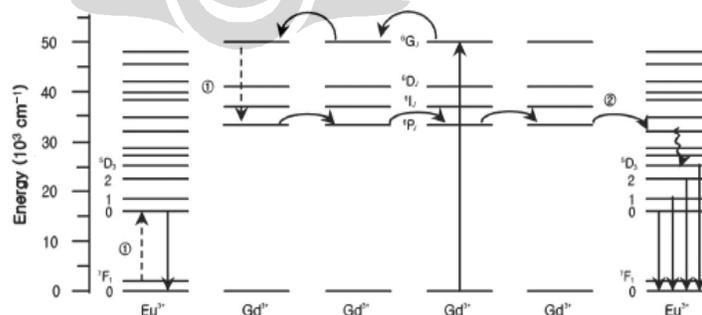
### 3.5 Aplikasi Konsep *Down – Conversion*

Salah satu aplikasi konsep *down-conversion* adalah menggunakan *quantum dots*. Pada dasarnya proses absorpsi photon melalui *quantum dots* adalah dengan menggeser panjang gelombang photon. Gambar 3.12, menunjukkan lapisan transparan yang ditambahkan di atas *solar cell*. Lapisan tersebut memiliki struktur *quantum dots* yang disesuaikan untuk dapat mengemisi cahaya merah, dan mengasumsikan *solar cell* pada Gambar 3.12 memiliki respon tertinggi pada cahaya merah. Namun berdasarkan konsentrasi *quantum dots* (QDs), cahaya biru yang tidak diserap oleh *solar cell* turut tembus masuk ke *solar cell*.



**Gambar 3.12.** Lapisan plastik yang terdapat *quantum dot* diaplikasikan di atas permukaan *solar cell* [12].

Dari Gambar 3.12 dapat dijelaskan proses absorpsi photon yang terjadi pada *solar cell* melalui lapisan QDs, Proses (1) dan (2) adalah dua buah cahaya baik biru maupun hijau yang diserap oleh *quantum dots* dan digeser panjang gelombangnya sehingga mengemisikan kembali menjadi cahaya merah pada proses (3), yang kemudian akan diserap oleh *solar cell*. Namun terdapat cahaya biru dan hijau yang tembus lapisan QDs dan tidak diserap oleh *solar cell*. Fenomena QDs ini dapat merepresentasikan karakteristik konsep *down-conversion* sehingga banyak aplikasi *down-converter* menggunakan QDs. Namun penggunaan material *rare earth* juga dikembangkan untuk membentuk *down-converter* sebagai dopping pada campuran material tertentu. Diantaranya adalah  $\text{LiGdF}_4$  yang didoping dengan  $\text{Eu}^{3+}$  yang dapat menyerap dengan kuat spektrum cahaya ultraviolet (UV) dan mengubah menjadi cahaya tampak [13]. Karakteristik material tersebut sesuai dengan aplikasi *down-converter* pada *solar cell* karena absorpsi cahaya dalam spektrum cahaya tampak. Gambar 3.13 menunjukkan karakteristik material  $\text{LiGdF}_4: \text{Eu}$  pada proses eksitasi dan emisi.



**Gambar 3.13.** Diagram tingkat energi pada sistem  $\text{Gd}^{3+}-\text{Eu}^{3+}$ , menunjukkan dua langkah transfer energy dari  $\text{Gd}^{3+}$  ke  $\text{Eu}^{3+}$  [13].

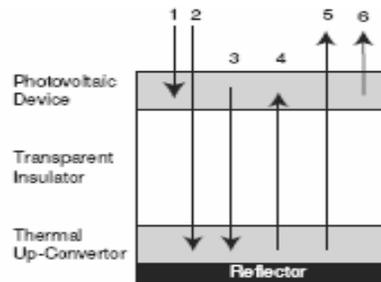
Emisi photon optimum dalam jangkauan antara 590 nm dan 610 nm untuk eksitasi pada 275 nm [13]. Garis emisi pada Gambar 3.13 berhubungan pada  $\text{Eu}^{3+}$ , dan proses tersebut disebabkan oleh dua langkah transfer energi dalam konversi, yaitu konversi oleh tingkat energi  $\text{Eu}^{3+}$  dari tingkat energi  $\text{Gd}^{3+}$  saat absorpsi [13]. Kemudian photon yang diserap oleh sebuah ion  $\text{Gd}^{3+}$  ditransfer menjadi dua buah ion  $\text{Eu}^{3+}$  melalui dua langkah proses transfer energi [13]. Proses tersebut menghasilkan radiasi dalam daerah cahaya tampak.

### 3.6 Aplikasi Konsep *Up – Conversion*

Konsep *up-conversion* pada awalnya diaplikasikan untuk konversi optik, yaitu dari *infra red* (ir) menjadi cahaya tampak (*visible light*) pada laser. Pada dasarnya fenomena yang digunakan adalah sama yaitu mengonversi energi photon yang lemah menjadi lebih besar sehingga hasilnya dapat digunakan dengan membutuhkan energi photon lebih besar. Pada aplikasinya, dalam penulisan ini digunakan untuk menghasilkan *e-h pairs* pada *solar cells*. Pada referensi [11] diungkapkan bahwa penambahan konsep *up-conversion* pada *solar cell* mampu mengurangi *transmission loss* jika dilihat berdasarkan fenomena *up-converter* dan timbulnya *transmission loss*. Referensi [12] menyatakan pengkopelan photon dilakukan dalam eksperimen menggunakan *anti-stokes luminescence* dari divais QW p-i-n. Dan hanya dengan perbedaan temperatur antara PV divais dan QW *thermal up-conversion* yang cocok, maka sistem sesuai dalam *queisser-limit*.

*Stokes luminescence* adalah lapisan *luminescence* yang dapat mengemisikan energi photon lebih rendah dari energi eksitasi yang dibutuhkan. Sedangkan *anti-stokes luminescence* adalah lapisan *luminescence* yang mengemisikan energi photon lebih besar dari energi eksitasi yang dibutuhkan [12].

Salah satu aplikasi *anti-stokes emission* pada divais PV adalah mengatur spektrum dari cahaya matahari yang datang dengan tujuan mendapatkan peningkatan efisiensi. *Up-conversion* dapat berupa divais QW p-i-n yang beroperasi pada *open-circuit* [12]. Namun dapat digunakan juga material yang lain dengan konsep yang sama. Gambar 3.14 menunjukkan beberapa proses yang terjadi saat cahaya masuk ke divais *solar cell*.

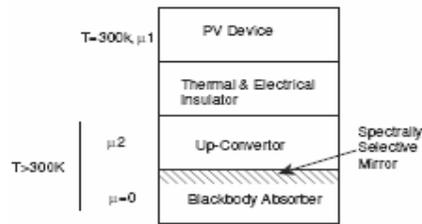


**Gambar 3.14. Skematik *up-converter* dengan enam proses optikal [12].**

Dari Gambar 3.14 terdapat enam proses yang terjadi secara optis, yaitu :

- 1) *Solar cell* akan menyerap energi photon yang cukup tinggi,
- 2) energi photon yang lemah ( dengan  $\lambda$  besar ) akan melewati *insulator* dan diserap oleh *up-converter*,
- 3) beberapa photon dari transisi radiasi pada *solar cell* juga diserap oleh *up-converter*,
- 4) kemudian memungkinkan converter berlaku seperti *anti-stokes emission*, dan dapat diserap oleh divais PV,
- 5) ada beberapa photon akibat *stokes-emission* yang dilewatkan pada *PV device* atau yang langsung berasal dari *PV device*.

Dalam skema struktur *solar cell* yang ditambahkan divais *up-converter* ditunjukkan seperti pada Gambar 3.15. Struktur tersebut merupakan salah satu disain yang dapat diaplikasikan pada *up-converter* dengan *solar cell*. Pada dasarnya pemilihan dan riset pada material *up-converter* menjadi tujuan untuk meningkatkan efisiensi *solar cell*. *Up-converter* tersebut memang diharapkan untuk diaplikasikan dengan tidak mempengaruhi karakteristik dari disain *solar cell*, baik sesara elektrik maupun *thermal*.



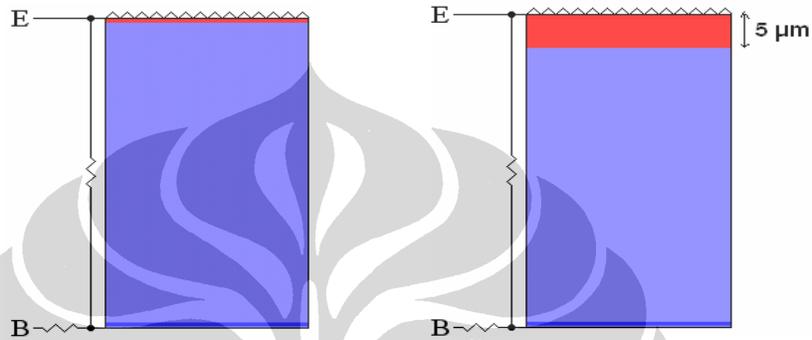
**Gambar 3.15. Struktur solar cell dan up-converter dengan blackbody absorber [12].**

Dari Gambar 3.15 terdapat lapisan *blackbody absorber* untuk menyerap efek panas pada *up-converter*. Kemudian terdapat *spectrally selective mirror* untuk memantulkan spektrum cahaya yang dihasilkan *up-converter* agar dapat diserap oleh *solar cell*. Lapisan *Thermal & electrical insulator* adalah untuk menghindari efek radiatif yang menimbulkan panas dan karakteristik secara elektrik mempengaruhi *solar cell*. Pada *up-converter* diasumsikan memiliki *chemical potential*  $\mu_2$  dan pada *blackbody absorber* ( $\mu=0$ ), hal ini memungkinkan kedua divais memiliki temperatur yang sama [12]. Secara umum desain *solar cell* dengan *up-converter* adalah hampir sama, dan pada dasarnya devais *up-converter* terisolasi secara elektrik dan thermal terhadap *solar cell*. Dalam beberapa riset hanya dikemukakan tentang penggunaan material untuk membentuk lapisan *up-converter*. Saat ini pengembangan jenis material yang tepat untuk membentuk *up-converter* dengan efisiensi tinggi masih terus dikembangkan karena para ilmuwan yakin dengan penerapan konsep tersebut pada *solar cell* mampu meningkatkan efisiensi *solar cell* yang cukup signifikan.

### 3.7 Simulasi Konsep Up / Down – Conversion

Dalam melakukan simulasi dan perancangan skematik devais *solar cell* dengan penerapan konsep *up/down-conversion*, dilakukan menggunakan *software PC1D 5.9*. Pada *software PC1D 5.9*, terdapat keterbatasan dalam penyusunan skematik devais *solar cell*, terutama bila diinginkan menerapkan konsep *up/down-conversion*. Namun secara konsep dapat dilakukan dengan memberikan sumber cahaya sekunder dari arah *front surface* maupun dari *rear surface* yang

diasumsikan sebagai *luminescence* dari *up/down-converter*. Skematik divais *solar cell* yang dibuat disesuaikan dengan optimasi dalam spektrum gelombang tertentu dan material silikon dipilih sebagai substrat *solar cell*. Kemudian karakteristik emisi photon dari konsep *up/down-converter* disesuaikan juga terhadap optimasi absorpsi *solar cell*. Untuk perancangan *solar cell* akan dibahas lebih lanjut pada Bab 4. Skematik yang dibuat dalam PC1D 5.9 dapat dilihat pada Gambar 3.16.



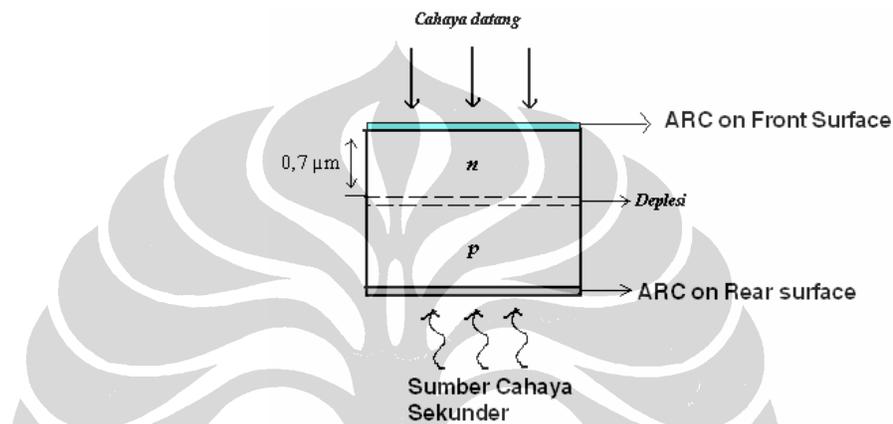
**Gambar 3.16. Skematik *solar cell* yang dibuat menggunakan PC1D 5.9.**

- (a) Optimum pada cahaya biru;
- (b) Optimum pada cahaya merah.

Gambar 3.16 (a) menunjukkan skematik *solar cell* dengan *junction depth*  $0,7 \mu\text{m}$  untuk optimasi pada cahaya biru (450 – 459 nm). Sedangkan Gambar 3.16 (b) menunjukkan optimasi *solar cell* dengan *junction depth*  $5 \mu\text{m}$  untuk optimasi cahaya merah. Kedalam *junction* tersebut dipilih berdasarkan hubungan optimasi absorpsi dalam panjang gelombang tertentu terhadap *penetration depth* yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Parameter yang digunakan untuk kedua skematik *solar cell* tersebut dibuat sama, dan hanya berbeda dalam kedalaman *junction depth*. Parameter tersebut dideskripsikan pada Bab 4 dengan hasil tegangan *open circuit* dan arus *short circuit* yang berbeda untuk tiap disain *solar cell*.

Kemudian dalam menentukan langkah simulasi konsep *up/down-conversion* dibedakan dalam dua cara. Untuk konsep *up-conversion*, sumber cahaya sekunder diberikan dari *rear surface* dengan asumsi sebagai *luminescence* dari hasil konversi pada *up-converter*. Spektrum cahaya biru dipilih agar memberikan optimasi absorpsi pada *solar cell* dengan intensitas maksimum sama

dengan sumber cahaya primer yang diindikasikan sebagai proses absorpsi dari cahaya matahari. Dalam simulator PC1D 5.9 intensitas maksimum ditentukan  $0,1 \text{ W/cm}^2$ , mengacu dalam kondisi "terrestrial sun". Pada sub-Bab 4.4 variasi intensitas diberikan untuk mendapatkan perubahan efisiensi maksimum yang mungkin dicapai. Hal tersebut dilakukan juga dalam konsep *down-conversion*. Gambar 3.17 menunjukkan skema simulasi yang dilakukan untuk merepresentasikan aplikasi *up-converter*.

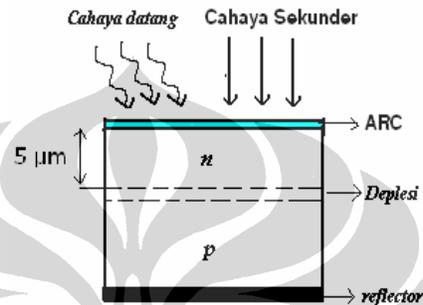


**Gambar 3.17. Skema simulasi aplikasi *up-converter* dengan simulator PC1D 5.9.**

Jenis *bifacial solar cell* baik digunakan untuk aplikasi yang ditunjukkan Gambar 3.17, karena absorpsi photon dapat melalui *front* atau *rear surface*. Penambahan ARC pada *rear surface* diperlukan agar mengurangi refleksi oleh *rear surface* sebagaimana tujuan ditambahkan ARC pada *front surface*. Karakteristik kedua ARC dipilih dalam kondisi yang sama, sekitar 10 % proses refleksi yang terjadi berdasarkan parameter dalam simulator PC1D 5.9. Dalam aplikasi divais yang sebenarnya, posisi sumber cahaya sekunder digantikan oleh *luminescence* dari *up-converter*. Antara *converter* dan *solar cell* diharapkan terisolasi secara *thermal* dan elektrik, sehingga interkoneksi antara *up-converter* dan *solar cell* adalah murni secara radiasi. Hal tersebut berlaku juga untuk aplikasi *down-converter*.

Kemudian untuk langkah simulasi konsep *down-conversion* adalah sebaliknya dari yang dilakukan pada konsep *up-conversion*. Sumber cahaya

sekunder diberikan dari arah *front surface* yang diasumsikan sebagai emisi photon yang telah dikonversi oleh *down-converter*. Berdasarkan kalkulasi emisi pada *down-converter* secara diagram energi, maka spektrum cahaya merah dipilih agar dapat memberikan absorpsi optimum oleh *solar cell*. Intensitas dipilih sama dengan sumber cahaya primer sebesar  $0,1 \text{ W/cm}^2$ . Gambar 3.18 menunjukkan skema simulasi yang dilakukan untuk merepresentasikan aplikasi *down-converter*.



**Gambar 3.18. Skema simulasi aplikasi *down-converter* dengan simulator PC1D 5.9**

Jenis *solar cell* konvensional diaplikasikan untuk konsep *down-converter* yang ditunjukkan pada Gambar 3.18. Penggunaan ARC hanya pada *front surface* karena *converter* diletakkan di atas permukaan *solar cell* dengan karakteristik yang sama pada simulasi konsep *up-conversion*. Dalam aplikasi sesungguhnya, faktor *refractive index* berpengaruh dalam proses absorpsi photon karena sebelum cahaya mencapai permukaan *solar cell*, terlebih dahulu diserap oleh *down-converter*. *Refractive index* dari material *down-converter* tersebut menjadi pertimbangan dalam mengaplikasikan konsep ini. Untuk lebih mudah dianalisa, diasumsikan *refractive index* untuk *solar cell* dan *down-converter* adalah sama.