

## OPTIMASI EFISIENSI SEL SURYA GaAs DAN GaSb PERSAMBUNGAN p/n UNTUK KOMPONEN SEL SURYA TANDEM GaAs/GaSb

**S. Karim<sup>1)</sup>, D. Rusdiana<sup>1,2)</sup>, A. Suhandi<sup>1,2)</sup>, dan P. Arifin<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Jurusan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia,

Jl. DR. Setiabudhi 229 Bandung, Indonesia 40154

<sup>2)</sup> Lab. Fisika Material Elektronik (FISMATEL), Jurusan Fisika,

Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung 40132

e-mail : a\_bakrie@yahoo.com

### ABSTRAK

Pendisainan sel surya biasanya mencakup pengoptimalan struktur lapisan, karakteristik setiap lapisan seperti ketebalan lapisan-lapisan semikonduktor dan konsentrasi doping ketakmurnian, serta parameter-parameter divais, seperti waktu hidup pembawa muatan minoritas, koefisien difusi pembawa muatan minoritas, dan laju rekombinasi permukaan. Optimalisasi unjuk kerja sel surya dapat dilakukan dengan cara memvariasikan struktur lapisan atau suatu parameter divais tertentu dan mengasumsikan parameter-parameter lainnya konstan. Meskipun demikian, parameter-parameter divais ini nilainya dipengaruhi oleh struktur dan karakteristik lapisan dan tidak dapat dipandang sebagai variabel-variabel bebas. Telah dilakukan perhitungan unjuk kerja sel surya GaAs dan GaSb berstruktur persambungan p/n untuk komponen sel surya tandem GaAs/GaSb dengan menggunakan parameter-parameter divais yang diambil dari berbagai literatur berdasarkan hasil pengamatan eksperimen maupun hasil simulasi dan pemodelan. Kriteria yang digunakan untuk menentukan struktur sel surya yang optimum adalah pencapaian nilai efisiensi konversi dikaitkan dengan biaya fabrikasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa struktur optimum untuk kedua sel surya terjadi pada ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n berturut-turut sekitar 1,2  $\mu\text{m}$ , dan 3,5  $\mu\text{m}$ , dan konsentrasi akseptor ( $N_A$ ) dan donor ( $N_D$ ) masing-masing sekitar  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , dengan capaian efisiensi konversi optimum masing-masing sekitar 19,87 % untuk sel surya GaAs dan 6,86 % untuk sel surya GaSb. Jika kedua sel surya ini digabungkan dalam bentuk sel surya tandem GaAs/GaSb dengan susunan mekanik, nilai efisiensi konversinya dapat mencapai sekitar 26,73 %, sedangkan untuk susunan monolitik, efisiensi konversinya dapat mencapai 25,55 %.

**Kata Kunci :** Efisiensi,, Sel surya tandem, Persambungan p/n.

### 1. PENDAHULUAN

Pada proses konversi cahaya menjadi listrik dalam sel surya yang terbuat dari bahan semikonduktor dengan struktur persambungan tunggal (*single-junction*), terjadi mekanisme kehilangan energi yang merugikan, yakni foton yang energinya kurang dari celah pita energi bahan tidak dapat diserap dan dikonversi menjadi listrik<sup>1)</sup>. Struktur sel surya tandem (*multi-junction*) didesain untuk mengatasi persoalan kehilangan energi ini. Prinsip dasar dari sel surya tandem adalah pembagian spektrum cahaya matahari kedalam dua atau lebih bagian, untuk kemudian masing-masing bagian tersebut dapat diserap oleh beberapa sel surya yang memiliki celah pita energi yang berbeda. Prinsip ini dapat direalisasikan dengan cara membuat tumpukan sel surya dimana sel surya yang paling atas yang memiliki celah pita energi terbesar dibuat transparan terhadap spektrum cahaya yang tidak diserapnya, sehingga dapat lolos dan diserap oleh sel surya di bawahnya yang memiliki celah pita energi lebih kecil<sup>2)</sup>.

Galium Arsenat (GaAs) merupakan bahan semikonduktor paduan yang memiliki celah pita energi sekitar 1,43 eV, terletak pada rentang celah pita energi

optimum untuk bahan pembuat sel surya, yakni antara 1,4 sampai 1,6 eV, sehingga sangat potensial untuk bahan pembuat sel surya yang akan memiliki unjuk kerja paling optimum dibanding bahan lain<sup>3)</sup>. Akan tetapi karena celah pita energinya yang cukup besar tersebut, maka sel surya GaAs tidak dapat menyerap dan mengkonversi spektrum inframerah menjadi listrik

Untuk memanfaatkan spektrum inframerah sekaligus meningkatkan unjuk kerja sel surya GaAs, maka sel ini dapat ditandemkan dengan sel surya lain yang peka terhadap spektrum inframerah, beberapa diantaranya adalah sel surya silikon (Si,  $E_g = 1,12 \text{ eV}$ ), germanium (Ge,  $E_g = 0,66 \text{ eV}$ ), dan galium antimoni (GaSb,  $E_g = 0,72 \text{ eV}$ ). Diantara ketiga bahan ini, GaSb berpotensi memiliki unjuk kerja yang paling optimum bila ditandemkan dengan GaAs, selain karena celah pita energinya bertepatan dengan spektrum inframerah jauh, juga struktur celah pita energinya langsung (*direct*), sehingga akan memiliki koefisien absorpsi optik yang tinggi.

Dalam makalah ini akan dipaparkan hasil-hasil simulasi tentang optimasi struktur sel surya GaAs dan GaSb persambungan p/n untuk komponen sel

surya tandem GaAs/GaSb. Proses optimasi struktur meliputi karakteristik lapisan seperti ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n, konsentrasi doping pada tiap-tiap lapisan tersebut, serta parameter-parameter divais seperti waktu hidup pembawa muatan minoritas, koefisien difusi pembawa muatan minoritas, dan laju rekombinasi permukaan. Kriteria struktur sel surya GaAs dan GaSb yang optimum ditetapkan berdasarkan pencapaian rapat *photocurrent* dan efisiensi konversi yang optimum.

## 2. TINJAUAN TEORETIK

### A. Struktur sel surya tandem

Terdapat dua pendekatan untuk menyusun sel surya tandem, yaitu secara mekanik dan secara monolitik. Pada susunan tandem mekanik, masing-masing komponen sel surya dibuat secara terpisah dan kemudian digandengkan (atas-bawah) secara optik dengan suatu lapisan adhesif yang transparan, sel ini didesain untuk beroperasi dengan empat terminal. Sedangkan pada susunan tandem monolitik, komponen-komponen sel surya digandengkan atas bawah secara permanen, biasanya dibentuk melalui proses penumbuhan secara epitaksi sel surya bagian atas di atas sel surya bagian bawah pada suatu substrat. Sel ini didesain untuk beroperasi dengan dua terminal<sup>3)</sup>.

Karena pada dasarnya komponen-komponen sel surya yang ditandem secara mekanik terpisah satu sama lain dan tidak terjadi kontak listrik, maka pada operasinya karakteristik I-V dari masing-masing komponen sel surya tidak akan saling mempengaruhi. Oleh karena itu efisiensi total dari sel tandem ini

$$J_{nph}(X_1) = K_1 \alpha L_n \exp(-\alpha X_1) + \frac{K_1}{A} [(S_f L_n / D_n + \alpha L_n) - \exp(-\alpha X_1) ((S_f L_n / D_n) \cosh(X_1 / L_n) + \sinh(X_1 / L_n))] \quad (4)$$

$$J_{pph}(X_2) = K_2 \alpha L_p - \frac{K_2}{B} [(S_b L_p / D_p) \cosh(W_b / L_p) - \exp(-\alpha W_b)] + \sinh(W_b / L_p) + \alpha L_p \exp(-\alpha W_b) \quad (5)$$

$$J_{scrph} = qF(1-R) \exp(-\alpha X_1) (1 - \exp(-\alpha W)) \quad (6)$$

dimana

$$A = (S_f L_n / D_n) \sinh(X_1 / L_n) + \cosh(X_1 / L_n)$$

$$B = (S_b L_p / D_p) \sinh(W_b / L_p) + \cosh(W_b / L_p)$$

$$K_1 = qF(1-R) \alpha L_n / (\alpha^2 L_n^2 - 1)$$

$$K_2 = [qF(1-R) \alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)] \exp(-\alpha X_2)$$

$$W_b = X_b - X_2$$

$F(\lambda)$  adalah rapat fluks foton yaitu jumlah foton yang menumbuk permukaan depan sel surya per  $\text{cm}^2$  per detik per satuan lebar pita panjang gelombang. Kondisi AM1,5 dapat didekati dengan dua persamaan kurva linear sebagai berikut<sup>4)</sup>:

$$F(\lambda) = C(19,7\lambda - 4,7) \times 10^{15} \text{ untuk } 0,24 \leq \lambda \leq 0,4 \mu\text{m} \quad (7.a)$$

$$F(\lambda) = C(-2,5\lambda + 5,7) \times 10^{15} \text{ untuk } \lambda \geq 0,48 \mu\text{m} \quad (7.b)$$

C adalah konsentrasi fluks sinar matahari (C=1 untuk kondisi tanpa konsentrator).

merupakan jumlah aljabar dari efisiensi masing-masing komponennya. Berbeda dengan sel tandem mekanik, dalam operasinya, unjuk kerja sel tandem monolitik akan merupakan kombinasi dari unjuk kerja komponen-komponennya, karena antara komponen-komponen sel nya terjadi kontak listrik. Karakteristik I-V untuk susunan tandem monolitik dirumuskan sebagai berikut<sup>3)</sup>:

$$I = I_{s1} \left\{ \frac{I_{s2}}{I_{ph2} - I_{ph1}} \exp \frac{eV}{kT} - 1 \right\} - I_{ph1} \quad (1)$$

### B. Struktur sel surya persambungan p-n

Ketika cahaya dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) tertentu jatuh ke permukaan sel surya, maka dalam sel tersebut akan dibangkitkan pasangan elektron-hole dengan laju pembangkitan sebagai fungsi jarak x dari permukaan depan sebagai berikut<sup>3)</sup>:

$$G(\lambda) = (\lambda)F(\lambda)[1-R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (2)$$

Pembawa-pembawa muatan ini akan mengalir karena ada beda konsentrasi diantara kedua sisi persambungan dan menghasilkan *photocurrent*. Total rapat *photocurrent*  $J_{ph}$  ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) yang dapat dikoleksi dalam suatu sel surya adalah<sup>4)</sup>:

$$J_{ph} = J_{n,ph}(x_1) + J_{p,ph}(x_2) + J_{scr,ph} \quad (3)$$

dimana  $J_{n,ph}(x_1)$ ,  $J_{p,ph}(x_2)$  dan  $J_{scr,ph}$  berturut-turut adalah rapat *photocurrent* yang dapat dikoleksi dalam lapisan tipe-p, lapisan tipe-n dan lapisan deplesi persambungan p-n pada suatu panjang gelombang tertentu.  $x_1$  dan  $x_2$  merupakan batas lapisan deplesi. Untuk sel surya sambungan p-n dengan konsentrasi doping ketakmurnian seragam, ketiga persamaan rapat *photocurrent* ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

Persamaan rapat *photocurrent* yang dikemukakan di atas (pers. 3) berlaku untuk suatu panjang gelombang ( $\lambda$ ) tertentu dan hanya cocok untuk lebar pita panjang gelombang yang sangat sempit ( $\approx 10$  nm)<sup>4)</sup>. Dengan demikian total rapat *photocurrent* merupakan jumlah rapat *photocurrent* yang dibangkitkan oleh setiap 10 nm lebar pita panjang gelombang, sehingga dapat dirumuskan seperti berikut:

$$J_{ph} = \sum_{i=1}^n J_{ph}(\lambda_i), \lambda_i = 0,24 + 0,01(i-1) \quad (8)$$

n adalah bilangan bulat yang besarnya bergantung dari panjang gelombang terbesar yang dapat diserap oleh sel surya. Untuk sel surya GaAs, panjang gelombang terbesar yang dapat diserap adalah  $0,88 \mu\text{m}$  (bersesuaian dengan  $E_g=1,42 \text{ eV}$ ), maka n paling besar adalah 65.

Efisiensi konversi sel surya dapat dihitung berdasarkan persamaan karakteristik arus-tegangan dari sel surya, seperti berikut <sup>5)</sup> :

$$J(V) = J_0 \left( \exp \frac{q(V + JR_s)}{kT} - 1 \right) + \frac{q n_i W \sinh \frac{q(V + JR_s)}{2kT}}{q(V_{bi} - (V + JR_s))/kT} \frac{\pi}{2} + \frac{V}{R_{sh}} - J_{ph} \quad (9)$$

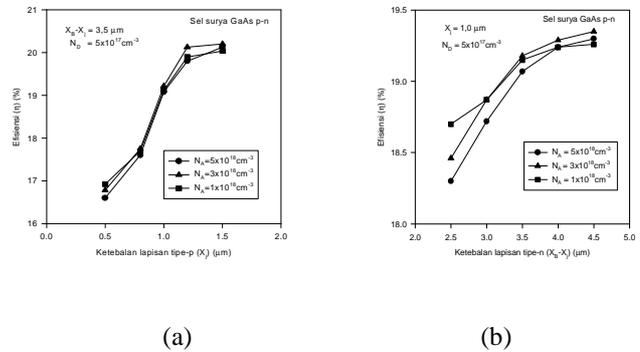
Dalam proses optimalisasi ini, parameter-parameter bahan pembuat sel surya seperti koefisien absorpsi optik, koefisien difusi, waktu hidup (*life time*), dan mobilitas dari pembawa-pembawa muatan minoritas, yang sangat bergantung pada bahan, konsentrasi doping, dan temperatur, diambil dari berbagai literatur baik hasil eksperimen maupun simulasi perhitungan. Parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi ini dapat dilihat pada referensi 4 sampai 10.

### 3. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

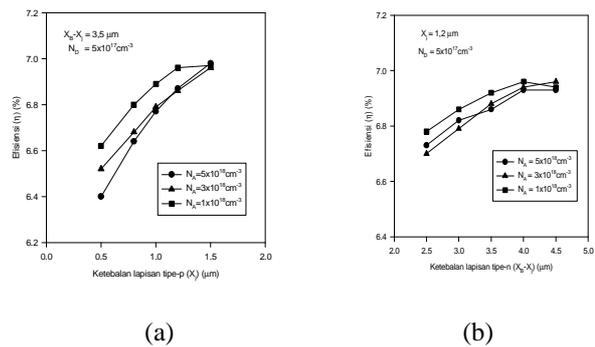
Gambar 1a dan 1b menunjukkan tipikal kurva efisiensi konversi sel surya GaAs sebagai fungsi ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n, untuk konsentrasi doping akseptor yang berbeda-beda untuk kondisi AM1,5, dimana  $P_{in}$  untuk kondisi ini bernilai  $90,6 \text{ mW/cm}^2$  <sup>4)</sup>. Dari kedua gambar tersebut tampak bahwa terdapat kecenderungan yang hampir sama yaitu mula-mula terjadi peningkatan nilai efisiensi konversi yang cukup tajam hingga ketebalan lapisan tipe-p sekitar  $1,2 \mu\text{m}$  dan ketebalan lapisan tipe-n sekitar  $3,5 \mu\text{m}$ , lewat dari itu peningkatannya relatif kecil, dan cenderung konstan. Sedangkan dari variasi konsentrasi akseptor dapat dilihat bahwa efisiensi konversi paling optimum terjadi pada  $N_A = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , ketika konsentrasi doping donor bernilai  $N_D = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Jika nilai-nilai ini diambil sebagai struktur sel surya optimum, maka akan dicapai nilai efisiensi konversi optimum dari sel surya GaAs sekitar  $19,87 \%$ .

Gambar 2a dan 2b menunjukkan tipikal kurva efisiensi konversi sel surya GaSb yang dirancang untuk ditempatkan dibawah sel surya GaAs sebagai fungsi ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n, untuk konsentrasi doping akseptor yang berbeda-beda. Dari kedua gambar tersebut tampak bahwa terdapat kecenderungan yang hampir sama pula yaitu mula-mula terjadi peningkatan nilai efisiensi konversi yang cukup tajam hingga ketebalan lapisan tipe-p sekitar  $1,2 \mu\text{m}$  dan ketebalan lapisan tipe n sekitar  $3,5 \mu\text{m}$ , lewat dari itu peningkatannya relatif kecil, cenderung konstan. Sedangkan dari variasi konsentrasi akseptor dapat dilihat bahwa efisiensi konversi paling optimum terjadi pada  $N_A = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , ketika konsentrasi

doping donor bernilai  $N_D = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Jika nilai-nilai ini diambil sebagai struktur sel surya optimum, maka akan dicapai nilai efisiensi konversi optimum dari sel surya GaSb sekitar  $6,86 \%$ .



**Gambar 1.** Grafik efisiensi konversi sel surya GaAs sebagai ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n untuk konsentrasi akseptor yang bervariasi.



**Gambar 2.** Grafik efisiensi konversi sel surya GaSb sebagai ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n untuk konsentrasi akseptor yang bervariasi.

Variasi konsentrasi doping akseptor dan donor ditentukan dengan alasan jika nilainya terlalu tinggi (di atas orde  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) dapat mengakibatkan penyempitan celah pita energi bahan semikonduktor, sedangkan konsentrasi doping terlalu rendah (di bawah orde  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) akan menyebabkan terjadinya peningkatan hambatan seri sel surya, kedua keadaan ini sangat merugikan karena akan mereduksi unjuk kerja sel surya <sup>4)</sup>. Sedangkan ketebalan lapisan depan (tipe-p) ditentukan lebih tipis dari lapisan belakang (tipe-n) berhubungan dengan waktu hidup pembawa muatan yang berbanding terbalik dengan konsentrasi doping, dimana konsentrasi doping di lapisan tipe-p lebih tinggi dibanding di tipe n, yang didasarkan pada pertimbangan eksperimen, dimana keadaan ini akan

terjadi dalam proses pembuatan sambungan p-n akibat adanya difusi termal<sup>4)</sup>.

Struktur sel surya GaAs dan GaSb ini direkomendasikan atas dasar pertimbangan bahwa meskipun terjadi peningkatan efisiensi konversi ketika ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n lebih besar dari 1,2  $\mu\text{m}$  dan 3,5  $\mu\text{m}$ , namun peningkatannya relatif kecil bahkan cenderung konstan. Peningkatan sebesar itu dipandang tidak ekonomis karena tidak sepadan dengan biaya (*cost*) yang harus dikeluarkan untuk menambah ketebalan pada proses fabrikasinya.

Dengan struktur optimum sel surya GaAs dan GaSb tersebut, maka dapat diwujudkan suatu sel surya tandem GaAs/GaSb dengan susunan mekanik dan monolitik yang masing-masing dapat mencapai efisiensi konversi sekitar 26,73 % dan 25,55 % secara berturut-turut. Jika dibandingkan, efisiensi konversi yang dicapai sel surya tandem mekanik lebih tinggi dari sel surya tandem monolitik, hal ini dapat dipahami karena pada struktur monolitik antara kedua komponen sel terjadi kontak listrik, sehingga apabila terjadi ketidakserasian arus listrik yang dihasilkan masing-masing komponen sel, maka akan menyebabkan adanya efek saling melemahkan.

#### 4. KESIMPULAN

Struktur sel surya GaAs dan GaSb persambungan p-n yang optimum sebagai komponen sel surya tandem GaAs/GaSb terjadi pada ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n berturut-turut sekitar 1,5  $\mu\text{m}$  dan 3,5  $\mu\text{m}$ , serta konsentrasi doping akseptor ( $N_A$ ) dan konsentrasi doping donor ( $N_D$ ) sekitar  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  dan  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , dengan capaian efisiensi konversi masing-masing sekitar 19,87 % dan 6,86 %. Dengan struktur seperti itu dapat dibuat sel surya tandem GaAs/GaSb dengan susunan mekanik maupun monolitik, dengan capaian efisiensi konversi masing-masing 26,73 % dan 25,55 %.

#### REFERENSI

1. Spitzer, M. B. and Fan, J. C. C., (1990), *Multijunctions Cells for Space Applications*, *Solar Cells*, Vol. 29, pp. 183-203
2. Araujo, G. R., 1989, *Compound Semiconductor solar cells*, dari Antonio Luque, *Solar cells and Optics for Photovoltaic Concentrations*, IOP Publishing Ltd., England.
3. Hans Joachim Moller, 1993, *Semiconductors for Solar cells*, Artech House Inc., London.
4. J.J. Liou and W.W. Wong, 1992, *Comparison and Optimization of The Performance of Si and GaAs Solar Cells*, *Solar Energy Material and Solar Cells*, Vol. 28, pp. 9-28.
5. Knetchly, R. C., 1984, *High Efficiency GaAs Solar Cells*, *IEEE Trans. Electron Dev.*, Vol-ED-31, no.5, May, pp. 577-587.

6. Sze, S.M., 1985, *Semiconductors Devices : Physics and Technology*, John Wiley and Sons Inc., New York.
7. Blackmore, J. S., 1982, *Semiconducting and Other Major Properties of Gallium Arsenide*, *J. Appl., Phys.*, Vol. 53, No. 10, Oct, pR. 123-176.
8. Wilardson, R. K., Beer, A. C., 1967, *Optical properties of III-V Compounds*, *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 3, Academic Press., London.
9. Milnes, A. G., Polyakov A. Y., 1993, *Gallium Antimonide Device Related Properties*, *Solid-State Electronics*, Vol. 36, No. 6, pp. 803-818
10. Duta, P. S., Bhat, H. L., 1997, *The physics and Technology of Gallium Antimonide: an Emerging Optoelectronics Material*, *J. Appl. Phys.*, Vol. 81, No. 9, May, pp. 5821-5860.