



Optimasi Tekanan Deposisi dalam Simulasi Efisiensi Sel Surya Berbasis Material a-Si:H

Endhah Purwandari^{1*}, Toto Winata²

¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Jember

²⁾Departemen Fisika ITB

*endhahfisika@gmail.com

Diterima 14 Nov 2011; Disetujui 14 Des 2011

Abstrak - Perhitungan efisiensi konversi sel surya tipe persambungan p-i-n dengan berbasis material a-Si:H dilakukan berdasarkan simulasi perhitungan karakteristik I-V dari material. Dalam bentuk 1 dimensi, Persamaan Poisson dan Persamaan Kontinuitas diselesaikan dengan menggunakan Femlab *Simulation*. Data empirik *optical band gap* E_g pada variasi tekanan deposisi 0-500 mTorr, yang diperoleh dalam penumbuhan a-Si:H menggunakan teknik HWC-VHF-PECVD, menjadi input kegiatan optimasi. Hasil simulasi menunjukkan terjadinya penurunan efisiensi dengan adanya kenaikan E_g . Efisiensi sel surya tertinggi sebesar 9,88% diperoleh pada tekanan deposisi a-Si:H sebesar 500 mTorr.

Perhitungan efisiensi konversi sel surya tipe persambungan p-i-n dengan berbasis material a-Si:H dilakukan berdasarkan simulasi perhitungan karakteristik I-V dari material. Dalam bentuk 1 dimensi, Persamaan Poisson dan Persamaan Kontinuitas diselesaikan dengan menggunakan Femlab *Simulation*. Data empirik *optical band gap* E_g pada variasi tekanan deposisi 0-500 mTorr, yang diperoleh dalam penumbuhan a-Si:H menggunakan teknik HWC-VHF-PECVD, menjadi input kegiatan optimasi. Hasil simulasi menunjukkan terjadinya penurunan efisiensi dengan adanya kenaikan E_g . Efisiensi sel surya tertinggi sebesar 9,88% diperoleh pada tekanan deposisi a-Si:H sebesar 500 mTorr.

Kata Kunci: simulasi, optimasi, tekanan deposisi, optical band gap, efisiensi, sel surya

1. Pendahuluan

Mekanisme konversi fotovoltaik sel surya secara teoretik dapat dijelaskan menggunakan persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas. Berdasarkan kedua persamaan tersebut, efek ketebalan lapisan i pada kinerja sel surya dengan jenis persambungan p-i-n dari material berbasis a-Si:H telah dapat diprediksikan secara simulasi menggunakan Femlab [1]. Dengan menggunakan program AMPS 1D, untuk tipe persambungan yang sama, telah diinvestigasi efek *optical band gap* E_g material a-Si:H, yang digunakan sebagai *window layer* dari sel surya [2]. Besarnya efisiensi sel surya turut dipengaruhi oleh rapat keadaan terlokalisasi pada lapisan i dalam persambungan p-i-n [3].

Adanya nilai E_g yang cukup kecil memungkinkan sebuah material mampu menghasilkan fenomena fotovoltaik pada rentang spektrum cahaya datang yang cukup lebar. Karakteristik yang demikian dapat digunakan untuk menilai kelayakan sebuah material yang diaplikasikan

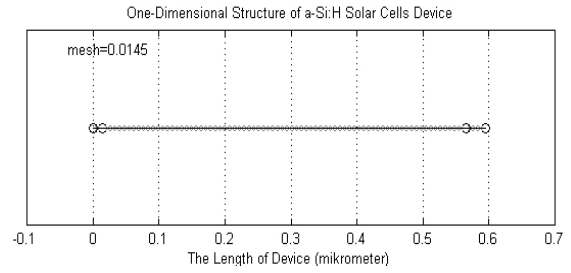
sebagai material sel surya [4]. Dengan menganalisa efek ketergantungan efisiensi sel surya terhadap nilai E_g ,

maka dapat dilakukan sebuah optimasi terhadap parameter penumbuhan material yang diaplikasikan untuk divais tersebut. Di dalam penelitian ini, disimulasikan perhitungan efisiensi sel surya untuk sebuah rentang E_g dari material a-Si:H, yang didapatkan pada deposisi a-Si:H menggunakan teknik HWC-VHF-PECVD untuk variasi tekanan 100-500 mTorr [1].

Variasi E_g diaplikasikan hanya pada lapisan i dengan asumsi bahwa tinjauan terhadap efek penyerapan cahaya terhadap kinerja sel surya terutama dipengaruhi oleh aktivitas penyerapan pada lapisan ini. Pemodelan geometri dari divais sel surya beserta penyelesaian persamaan Poisson dan persamaan Kontinuitas dilakukan dengan menggunakan software FEMLAB. Solusi distribusi pembawa muatan yang didapatkan, digunakan untuk menghitung karakteristik I-V dari divais, sehingga diperoleh hasil perhitungan efisiensi dari sel surya tipe p-i-n. Estimasi terhadap tekanan deposisi optimum dari material nantinya dapat diperoleh berdasarkan perhitungan efisiensi tertinggi yang didapatkan.

2 Metode Simulasi

Pembuatan geometri dari divais sel surya mengawali simulasi perhitungan efisiensi. Model berupa persambungan tunggal lapisan p-i-n dalam bentuk satu dimensi mendefinisikan struktur divais sel surya yang tersusun atas lapisan a-SiC:H/a-Si:H/a-Si:H dengan ketebalan lapisan berturut-turut adalah $0.0150 \mu\text{m}$, $0.5500 \mu\text{m}$ and $0.0300 \mu\text{m}$ [1]. Dengan menggunakan Femlab, geometri satu dimensi dari divais ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur 1D divais sel surya dengan persambungan tunggal p-i-n tersusun atas lapisan a-SiC:H/a-Si:H/a-Si:H dengan ketebalan lapisan berturut-turut $0.0150 \mu\text{m}$, $0.5500 \mu\text{m}$ and $0.0300 \mu\text{m}$.

Diistribusi pembawa muatan dalam divais sel surya diperoleh dengan menyelesaikan Persamaan Poisson dan Persamaan Kontinuitas. Perhitungan terhadap pembawa muatan pada daerah terlokalisasi menyebabkan Persamaan Poisson termodifikasi menjadi persamaan (1)[1],

Struktur Divais Sel Surya Berbasis a-Si:H
dalam 1 Dimensi

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon}{q} \nabla^2 \psi = & -p + n - N_D + N_A \\ & - g_{Dmin} E_D \left[\exp \left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{2e^{-\psi_V} + ce^{\psi_U}}{e^{-\psi_V} + ce^{\psi_U}} \right) \left(\frac{n_i e^{-\psi_V} + cn_i e^{\psi_U}}{cN_C} \right)^{-\frac{kT}{E_A}} \right\} \right. \\ & \left. + \exp \left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D} \right) \left\{ \left(\frac{e^{-\psi_V}}{e^{-\psi_V} + ce^{\psi_U}} \right) \left(\frac{n_i e^{-\psi_V} + cn_i e^{\psi_U}}{N_V} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \right\} \right] \\ & + g_{Amin} E_A \left[\exp \left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A} \right) \left\{ \left(\frac{ce^{-\psi_V}}{ce^{-\psi_V} + e^{\psi_U}} \right) \left(\frac{n_i ce^{-\psi_V} + n_i e^{\psi_U}}{cN_V} \right)^{-\frac{kT}{E_A}} - 1 \right\} \right. \\ & \left. + \exp \left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A} \right) \left\{ \left(\frac{e^{-\psi_V}}{ce^{-\psi_V} + e^{\psi_U}} \right) \left(\frac{n_i ce^{-\psi_V} + n_i e^{\psi_U}}{N_C} \right)^{\frac{kT}{E_A}} \right\} \right] \end{aligned}$$

Hal yang sama berlaku pula untuk Persamaan Kontinuitas seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2) untuk distribusi elektron dan persamaan (3) untuk distribusi *hole* [1].

$$\begin{aligned}
 -\nabla(\mu_n n_i e^{\psi} u \nabla \psi + D_n n_i e^{\psi} u \nabla u) &= \frac{G_0 \alpha(\lambda)}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \\
 &- n_i (uv - 1) c v \sigma_N \left[\left(\frac{g_{Amin} E_A}{(e^{\psi} u + c e^{-\psi} v)} \right) \left\{ \exp \left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A} \right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + c e^{-\psi} v)}{N_C} \right)^{\frac{kT}{E_A}} \right. \right. \\
 &- \left. \left. \exp \left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A} \right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + c e^{-\psi} v)}{c N_V} \right)^{-\frac{kT}{E_A}} \right\} \right. \\
 &+ \left. \frac{g_{Dmin} E_D}{(c e^{\psi} u + e^{-\psi} v)} \left\{ \exp \left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D} \right) \left(\frac{n_i (c e^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{N_V} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \right. \right. \\
 &- \left. \left. \exp \left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D} \right) \left(\frac{n_i (c e^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{c N_C} \right)^{-\frac{kT}{E_D}} \right\} \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \nabla(\mu_p n_i e^{\psi} u \nabla \psi + D_p n_i e^{\psi} u \nabla u) &= \frac{G_0 \alpha(\lambda)}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \\
 &- n_i (uv - 1) c v \sigma_N \left[\left(\frac{g_{Amin} E_A}{(e^{\psi} u + c e^{-\psi} v)} \right) \left\{ \exp \left(\frac{E_C - E_{mc}}{E_A} \right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + c e^{-\psi} v)}{N_C} \right)^{\frac{kT}{E_A}} \right. \right. \\
 &- \left. \left. \exp \left(\frac{E_V - E_{mc}}{E_A} \right) \left(\frac{n_i (e^{\psi} u + c e^{-\psi} v)}{c N_V} \right)^{-\frac{kT}{E_A}} \right\} \right. \\
 &+ \left. \frac{g_{Dmin} E_D}{(c e^{\psi} u + e^{-\psi} v)} \left\{ \exp \left(\frac{E_{mc} - E_C}{E_D} \right) \left(\frac{n_i (c e^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{N_V} \right)^{\frac{kT}{E_D}} \right. \right. \\
 &- \left. \left. \exp \left(\frac{E_{mc} - E_V}{E_D} \right) \left(\frac{n_i (c e^{\psi} u + e^{-\psi} v)}{c N_C} \right)^{-\frac{kT}{E_D}} \right\} \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

Seluruh parameter fisis yang digunakan sebagai input pada persamaan (1), (2) dan (3) diberikan pada Tabel 1. Konsentrasi *hole* p dan elektron n dihitung berdasarkan persamaan (4) [5].

$$n = n_i e^{\psi} u, \quad p = n_i e^{-\psi} v \quad (4)$$

Parameter u dan v merupakan variabel yang didefinisikan untuk menyelesaikan kedua persamaan di atas dalam bahasa FEMLAB. Sementara itu ketebalan lapisan x dihitung dari batas persambungan lapisan p dan n dengan rangkaian eksternal. Analisis persamaan transport muatan dibawah pengaruh E_g dilakukan dengan mensubstitusi persamaan (5) pada persamaan (1), (2) dan (3).

$$E_C = E_g + E_V \quad (5)$$

Parameter	Nilai
Permitivitas material (ϵ)	11.8 F/cm [6]
Temperatur operasional (T)	300 K [1]
Fluks foton datang (G_0)	$10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [1]
Faktor transmisi cahaya material (P)	0.71 [1]
Koefisien penyerapan cahaya a-Si (α)	$22222 \text{ (cm}^{-1})$ [7]
Konsentrasi pembawa intrinsik (n_i)	$6.019 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ [1]
Konsentrasi donor terionisasi (N_D)	$8.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Konsentrasi akseptor terionisasi (N_A)	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [1]
Difusivitas elektron (D_n)	$40 \text{ cm}^2/\text{s}$ [1]
Difusivitas hole (D_p)	$4 \text{ cm}^2/\text{s}$ [1]
Rasio antara perangkat yang bermuatan dengan perangkat netral (c)	50
Penampang penangkapan muatan pada kecepatan thermal ($v_{th}\sigma_N$)	$10^{-11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ [1]
Rapat keadaan energi menyerupai donor dan akseptor ($g_{Dmin} = g_{Amin}$)	$5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ [4]
Keadaan energi terlokalisasi untuk tipe donor (E_D)	0.088 eV [1]
Keadaan energi terlokalisasi untuk tipe akseptor (E_A)	0.053 eV [1]
Beda energi antara kerapatan energi minimum dengan batas atas pita konduksi (E_{mc})	0.65 eV [1]
Optical Band Gap lapisan p (E_g)	2.36 eV [8]
Optical Band Gap lapisan i (E_g)	(1.8050 – 1.700) eV
Optical Band Gap lapisan n (E_g)	1.7 eV [4]
Energi pada pita valensi (E_v)	0.15 eV
Mesh	0.00145

Terdapat 4 daerah persambungan yang memerlukan definisi khusus dalam perhitungan potensial elektrostatik dan pembawa muatan. Pada daerah persambungan divais

dengan logam (rangkai eksternal), yaitu bagian luar p dan n , potensial elektrostatik ditentukan dengan memperhitungkan faktor besarnya konsentrasi pembawa muatan dengan tegangan luar V_A menurut persamaan (6) [5],

$$\psi = V_A + \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{1}{n_i} \left\{ \frac{N}{2} + \left(\frac{N^2}{4} + n_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}},$$

sedangkan konsentrasi pembawa muatan masing-masing adalah

$$n = \frac{N}{2} + \left(\frac{N^2}{4} + n_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad p = -\frac{N}{2} + \left(\frac{N^2}{4} + n_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

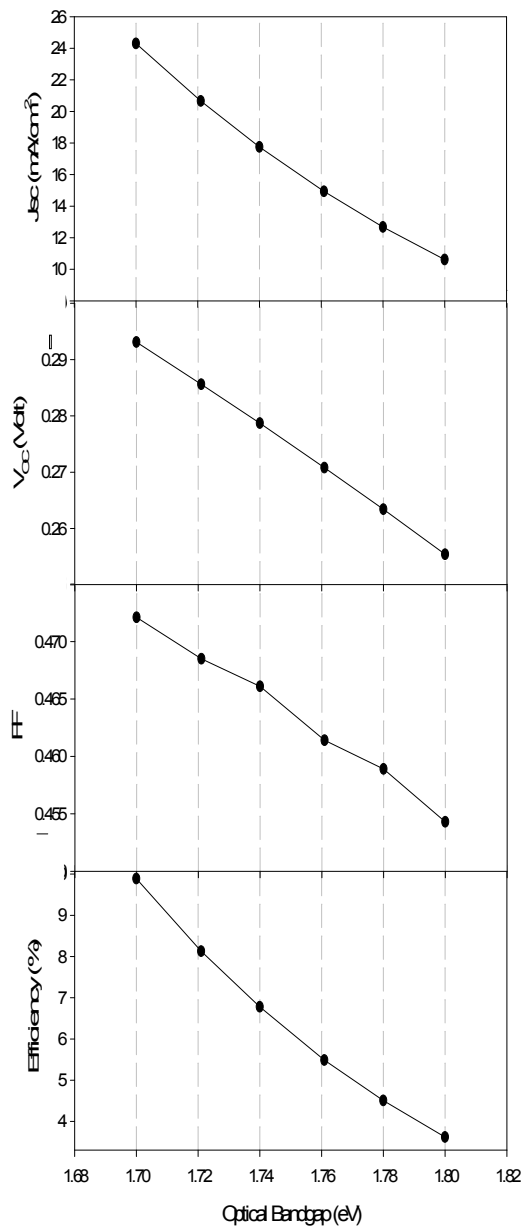
Untuk daerah permukaan yang tidak berhubungan dengan kontak logam didefinisikan oleh

$$\hat{n} \cdot \xi = 0, \hat{n} \cdot J_n = 0, \hat{n} \cdot J_p = 0$$

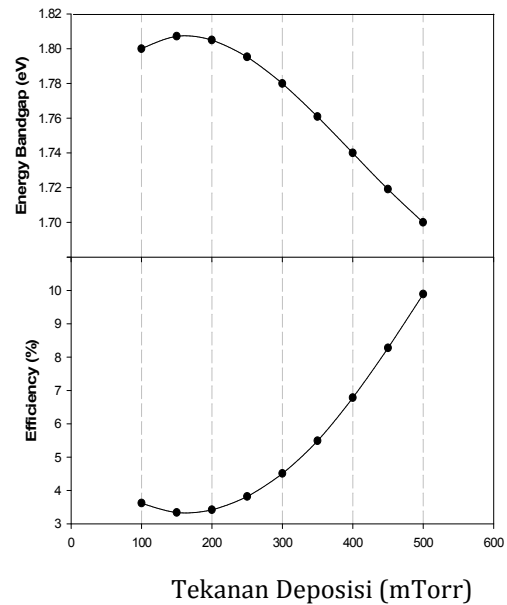
dengan $\hat{n}$ merupakan vektor normal permukaan.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwasanya rapat arus hubung singkat J_{sc} , tegangan V_{oc} dan fill factor FF menurun seiring dengan meningkatnya optical band gap (E_g) material. Hal ini menjadi faktor menurunnya hasil perhitungan efisiensi sel surya (Gambar 2). Secara teoretis, peningkatan E_g akan memperkecil rentang frekuensi cahaya datang yang dapat menghasilkan efek fotovoltai pada lapisan i . Dengan demikian kenaikan E_g dapat menjadi indikasi terjadinya penurunan photoconductivity dan photosensitivity dari material. Hasil simulasi ini bersesuaian dengan penelitian Kabir yang menunjukkan adanya penurunan efisiensi sel surya pada kenaikan nilai E_g tertentu [2].



Gambar 2. Karakteristik rapat arus hubung singkat J_{sc} , tegangan rangkaian terbuka V_{oc} , *Fill Factor* FF and efisiensi di bawah variasi *optical band gap*.



Gambar 3. Hubungan kebergantungan efisiensi sel surya dengan nilai *optical band gap* di bawah variasi tekanan deposisi material a-Si:H.

Penentuan tekanan deposisi optimum dapat dianalisa berdasarkan grafik kebergantungan efisiensi sel surya pada parameter tekanan deposisi material a-Si:H (Gambar 3). Dengan menggunakan data E_g dari material pada variasi tekanan 100-500 mTorr, didapatkan bahwa efisiensi tertinggi hasil simulasi, sebesar 9.88%, berada pada tekanan 500 mTorr.

4. Kesimpulan

Simulasi mekanisme konversi fotovoltaik dari divais sel surya material a-Si:H dalam satu dimensi dilakukan dengan meninjau pengaruh *optical band gap* material pada lapisan i terhadap perhitungan efisiensi sel surya. Hasil simulasi menunjukkan adanya penurunan efisiensi saat E_g meningkat. Berdasarkan hubungan empirik antara tekanan deposisi material, pada interval 100-500 mTorr, dengan nilai E_g , didapatkan bahwasanya nilai optimum untuk menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 9,88% adalah 500 mTorr. Investigasi kinerja sel surya untuk sistem *multijunction* dengan menggunakan Femlab perlu dilakukan untuk melihat kesesuaian program ketika diaplikasikan pada sistem yang lebih kompleks.

Daftar Pustaka

- [1] Usman, I., 2006, *Penumbuhan Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi Dengan Teknik HWC-VHF-PECVD dan Aplikasinya Pada Sel Surya*, Disertasi, ITB, Bandung.
- [2] Kabir, M.I., Nowshad Amin, Zaharim, A., Sopian, K., 2009, *Effect of Energy Bandgap of the Amorphous Silicon-Carbide (a-SiC:H) Layers On A Si-Multijunction Solar Cells from Numerical Analysis*, Proc.8th WSEAS Int. Conf. on NON-LINEAR ANALYSIS, NON-LINEAR SYSTEMS & CHAOS.
- [3] Cangwoo Lee, Harry, E., James, A. Raynold, and Pradeep Haldar, 2010, *Two-Dimensional Computer Modeling of Single Junction a-Si:H Solar Cells*, Photovoltaic Specialist Conference (PVSC).
- [4] Takahashi, K. and Konagai, M., 1986, *Amorphous Silicon Solar Cells*, North Oxford Academic Pub. Ltd., London.
- [5] Danielsson, E., 2000, *FEMLAB Model Library for Semiconductor Device Model*, The Royal Institute of Institute, Stockholm.
- [6] Kwok, K. Ng., 1995, *Complete Guide to Semiconductor Devices*, McGraw-Hill. Inc. United State of America.
- [7] Nigro, M.A., Cantore, F., Della Corte, F.G., Summonte, C., 2003, *Amorphous Silicon Thin Film for All-Optical Micro Modulator*, Proc. of SPIE, **Vol 5116**.
- [8] Persson, C.U., & Lindefelt, 1997, *Dependence of Energy Gaps and Effectively Masses on Atomic Positions in Hexagonal SiC*, J. Apply. Phys. **86**, 11, 5036-5039.