

PENGARUH FUNGSI KERJA KONTAK DEPAN PADA KINERJA SEL SURYA BERBASIS a-Si:H : STUDI NUMERIK

THE FRONT WORK FUNCTION EFFECT ON PERFORMANCES OF SOLAR CELL BASED a-Si:H : A NUMERICAL STUDY

Dadan Hamdani^{1*}, Yoyok Cahyono², Gatut Yudoyono², Darminto²

¹Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

²Departemen Fisika, FSAD, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

*Corresponding Author : d.hamdani1973@gmail.com

ABSTRACT

In this study, the front work function WF_{ITO} effect on the performances of solar cells, namely ITO/(p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)a-Si:H/ZnO/Ag structure, fabricated using RF-PECVD method were simulated using AFORS-HET software. Based on these simulations, the WF_{ITO} 's value varied from 4.95 to 5.55 eV, in order to determine the optimum WF_{ITO} for high solar cell efficiency. The simulation results showed that optimum value of the front work function ITO/(p)a-Si:H interface is 5.45 eV with solar cell's efficiency is 7.22% ($V_{OC} = 1063$ mV, $J_{SC} = 8.60$ mA/cm², $FF = 78.93\%$) for solar cell with Structure-2. The results of this simulation study have resulted in optimum parameters that can be followed up experimentally to get better solar cell performance.

Keywords: WF_{ITO} ; solar cell; AFORS-HET; efficiency.

ABSTRAK

Dalam studi ini, pengaruh fungsi kerja kontak depan terhadap kinerja sel surya struktur ITO/(p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)a-Si:H/ZnO/Ag yang difabrikasi dengan metode RF-PECVD disimulasi menggunakan perangkat AFORS-HET. Berdasarkan pada hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai WF_{ITO} divariasikan antara 4.95 to 5.55 eV dengan tujuan untuk menentukan nilai optimum WF_{ITO} dalam mendapatkan sel surya dengan efisiensi tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai optimum fungsi kerja kontak depan pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H adalah sekitar 5.45 eV yang menghasilkan efisiensi sebesar 7.22% ($V_{OC} = 1063$ mV, $J_{SC} = 8.60$ mA/cm², $FF = 78.93\%$) untuk sel surya Struktura-2. Hasil studi simulasi ini menghasilkan parameter-parameter optimum yang dapat dilanjutkan dengan eksperimen untuk mendapatkan sel surya yang lebih baik.

Kata kunci: WF_{ITO} ; sel surya; AFORS-HET; efisiensi.

PENDAHULUAN

Silikon amorfus Terhidrogenisasi (a-Si:H) merupakan material semikonduktor yang banyak diteliti dalam tiga dekade ini karena potensi aplikasinya dalam sel surya film tipis. Green, et al, 2021, melaporkan bahwa a-Si:H sambungan tunggal (single-junction) sebagai piranti solar sel mempunyai efisiensi konversi relatif rendah sekitar 10.2% [1], karena beberapa keterbatasan yang dimiliki, diantaranya adanya absorpsi parasitik optik pada lapisan terdoping, cacat pada antar-muka p/i and i/n, rendahnya absorpsi optikal dalam lapisan absorber, dan terbatasnya kemampuan perangkap cahaya (*limited light trapping*) dalam sel (Shin et al., 2017). Oleh karena itu, salah satu isu utama untuk

meningkatkan efisiensi sel surya berbasis a-Si:H adalah meningkatkan kualitas lapisan a-Si:H yang memiliki sifa-sifat transport yang baik untuk menjaga agar proses *photogeneration* hole dan elektron yang dikonversi menjadi energi listrik sebelum terjadinya proses rekombinasi, serta memiliki kemampuan untuk menyerap cahaya untuk menghasilkan lebih banyak pasangan elektron-hole (Son et al., 2018).

Akibat struktur atom a-Si:H, distribusi rapat keadaan energi pada pita valensi dan pita konduksi melebar ke celah energi dan membentuk daerah yang disebut pita ekor (*tail bands*), sehingga besar mobilitas celah energi lebih besar dari celah energi bahan a-Si:H sekitar 1,72 eV. Ikatan lemah pada a-Si:H akan

terbentuk keadaan energi elektron yang ditunjukkan oleh pita ekor. Jumlah struktur tak teratur (*disordered*) pada a-Si:H ditentukan oleh lebar pita ekor. Ikatan lepas yang terbentuk akan menempati keadaan pita energi yang terletak ditengah-tengah antara pita valensi dan pita konduksi. Proses keseimbangan terjadi dengan mengidentifikasi konversi ikatan lemah ke ikatan lepas berdasarkan reaksi : $\text{SiHHSi} + \text{SiSi} \leftrightarrow 2\text{SiHD}$. Distribusi rapat keadaannya ditentukan berdasarkan Hukum Aksi Massa : $\text{SiHD} \leftrightarrow \text{SiSi} + \text{H}$ dan $\text{SiHHSi} \leftrightarrow \text{SiSi} + 2\text{H}$ antara energi ikatan lemah pada pita ekor valensi dan tingkat celah energi di mana cacat terjadi [4].

Dengan mengacu pada hasil eksperimen yang dilakukan oleh [5], sebagai upaya untuk meningkatkan kinerjanya, maka dilakukan tinjauan simulasi numerik terhadap parameter penentu kualitas sel surya p-i-n berbasis a-Si:H menggunakan perangkat AFORS-HET (Automat FOR Simulation of HETerojunction) versi 2.5 - 1D. Dengan proses simulasi numerik ini memungkinkan untuk melakukan ekstraksi parameter pada setiap lapisan sel surya p-i-n yang dapat dijadikan sebagai acuan dalam melakukan fabrikasi untuk menghasilkan sel surya dengan

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_r(x)}{q} \frac{\partial \psi^2(x,t)}{\partial x^2} = p(x,t) - n(x,t) + N_D(x) - N_A(x) + \sum_{trap} \rho_{trap}(x,t) \quad (1)$$

$$-\frac{1}{q} \left(\frac{\partial J_n(x,t)}{\partial x} \right) = G_n(x,t) + R_n(x,t) - \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} \quad (2)$$

$$+\frac{1}{q} \left(\frac{\partial J_p(x,t)}{\partial x} \right) = G_p(x,t) - R_p(x,t) - \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \quad (3)$$

dimana $\epsilon_0 \epsilon_r$ menyatakan konstanta dielektrik, $\psi(x,t)$ merupakan potensial listrik, q menyatakan muatan listrik, $n(x,t)$ dan $p(x,t)$ menyatakan rapat elektron dan hole, $N_D(x)$ dan $N_A(x)$ menyatakan rapat doping (donor dan akseptor) pada titik x , ρ_{trap} menyatakan rapat cacat dari cacat muatan yang menunjukkan jumlah muatan yang terperangkap pada posisi energi E di dalam celah pita (tipe cacat dapat berupa tidak ditempat (*empty*) atau ditempati dengan elektron tunggal atau ganda), $G(x,t)$ menyatakan laju generasi pembawa muatan, $R(x,t)$ menyatakan laju rekombinasi.

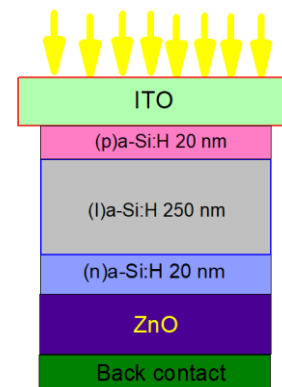
Dalam studi ini, dilakukan simulasi numerik terhadap sel surya struktur p-i-n berbasis a-Si:H yang dilakukan oleh Crupi, et al yang disintesis pada substrat kaca Soda-Lime dengan *radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition* (RF-PECVD) system pada

kualitas tinggi. Dalam kasus ini akan ditinjau pengaruh fungsi kerja WF_{TCO} pada antar-muka TCO/(p)a-Si:H terhadap karakteristik keluaran sel surya, yaitu *open circuit voltage* (V_{oc}), *short circuit current* (J_{sc}), *fill factor* (FF) dan efisiensi konversi (E_{ff}).

METODOLOGI PENELITIAN

Model simulasi numerik yang digunakan dalam pemodelan sel surya struktur p-i-n a-Si:H menggunakan perangkat AFORS-HET yang memiliki tingkat akurasi yang baik untuk mengevaluasi pengaruh berbagai parameter pada kinerja sel surya. Perangkat AFORS-HET bekerja berdasarkan hasil pemecahan persamaan Poisson 1D dan persamaan kontinuitas untuk elektron dan hole menggunakan Statistik rekombinasi Shockley-Read-Hall (SRH). Pembangkitan pasangan elektron-hole yang dihasilkan pada lapisan absorber diestimasi dengan menggunakan persamaan absorpsi Beer-Lambert menggunakan model optik dalam AFORS-HET. Detail persamaan yang digunakan dalam AFORS-HET dinyatakan dalam bentuk: (Stangl et al., 2010).

temperatur 280°C [5]. Skema sel surya p-i-n struktur ditunjukkan pada Gambar 1 dengan meninjau struktur yang dijelaskan pada Tabel 1.



Gambar 1. Skema sel surya struktur p-i-n berbasis a-Si:H yang disimulasi menggunakan perangkat AFORS-HET.

Tabel 1. Kombinasi struktur sel surya p-i-n a-Si:H yang disimulasi menggunakan perangkat AFORS-HET [5]

Struktur p-i-n	Eg lapisan-p (eV)	Eg lapisan-i (eV)	Eg lapisan-n (eV)
Struktur-1	1.82	1.85	1.9
Struktur-2	1.81	1.92	1.88

Dalam simulasi, sumber cahaya yang digunakan dalam simulasi spektrum AM1.5G dengan rapat daya 100 W/cm^2 dan temperatur operasional 300 K . Ketinggian barrier pada kontak belakang (ϕ_{bL}) ditentukan sebesar 0.2 eV ($\sim \text{WB}_{\text{TCO}} = 4.0 \text{ eV}$) dan ketinggian barrier pada antar-muka ITO/(p) a-Si:H (ϕ_{b0}) ditentukan berdasarkan nilai fungsi kerja WF_{TCO} [7]. Celah pita energi untuk lapisan lapisan-p, -i, dan -n ditunjukkan pada Tabel 1. Rapat keadaan pita valensi (N_V) dan konduksi (N_C) untuk lapisan-p, -i, dan -n sekitar $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, konsentrasi doping untuk tingkat akseptor dan donor ditetapkan masing-masing 3.0×10^{19} dan $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Parameter input lain yang digunakan dalam simulasi mengacu pada referensi lainnya (Dwivedi et al., 2013; Hernández-Como and Morales-Acevedo, 2010; Tan et al., 2017; Wen et al., 2013).

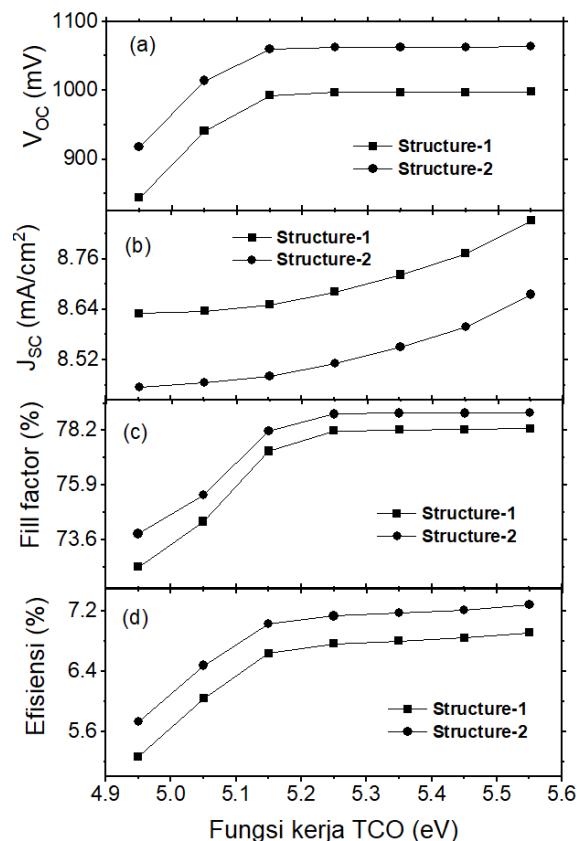
HASIL DAN PEMBAHASAN

Fungsi kerja kontak depan pada antar-muka TCO/(p)a-Si:H divariasikan antara $4.95\text{--}5.5 \text{ eV}$, dimana nilai ini diadopsi dari beberapa literatur yang melakukan sintesis lapisan ITO dengan RF-Sputtering dengan nilai fungsi kerja antara $4.7\text{--}5.7 \text{ eV}$ tergantung pada kondisi proses deposisi dan perlakuan kimiawi (Klein et al., 2010; Y. S. Park et al., 2013; Sharma et al., 2017).

Dengan mengacu pada Tabel 1, dilakukan simulasi terhadap kombinasi sel surya struktur TCO(ITO)/(p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)a-SiH/ZnO/Ag dengan sebutan Struktur-1 dan Struktur-2 yang disesuaikan dengan nilai celah pita energi yang dikombinasikan. Gambar 2 menunjukkan variasi fungsi kerja kontak depan (WF_{TCO}) terhadap kinerja sel surya p-i-n yang dinyatakan sebagai keluaran V_{OC} , J_{SC} , FF , dan E_{ff} . Terlihat bahwa J_{SC} untuk kedua struktur tidak terlalu dipengaruhi oleh perubahan WF_{TCO} , dimana perubahan J_{SC} untuk Struktur-1 dan Struktur-2 pada jangkauan WF_{TCO} antara $4.95 \text{ eV}\text{--}5.5 \text{ eV}$ hanya sekitar 0.22 mA/cm^2 . Sementara itu, untuk nilai V_{OC} , J_{SC} , dan E_{ff} secara signifikan meningkat dengan kenaikan

WF_{TCO} sampai 5.45 eV untuk kedua struktur yang disimulasi.

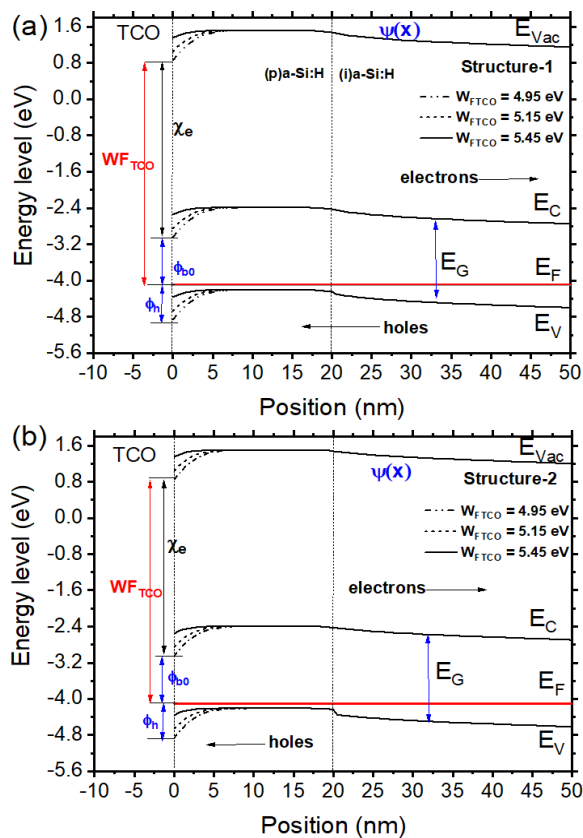
Pada saat $\text{WF}_{\text{TCO}} = 5.45 \text{ eV}$ efisiensi yang diperoleh untuk Struktur-1 sekitar 6.85% ($V_{OC} = 997.3 \text{ mV}$, $J_{SC} = 8.77 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 78.25\%$) dan untuk Struktur-2 sekitar 7.22% ($V_{OC} = 1063 \text{ mV}$, $J_{SC} = 8.60 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 78.93\%$). Perbedaan efisiensi konversi antar kedua struktur yang disimulasi ini cukup menunjukkan hasil signifikan dengan perbedaan yang tidak terlalu besar dalam celah energi, terutama pada lapisan (p)a-Si:H mampu menghasilkan V_{OC} dan FF yang cukup besar, karena perbedaan WF_{TCO} mampu meningkatkan ketinggian barrier pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H, sehingga resistansi parasitik dapat diperkecil, built-in potential meningkat dan rekombinasi pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H dan antar-muka homo (p)a-Si:H/(i)a-Si:H mampu diperkecil akibat *band offset* antara keduanya kecil



Gambar 2. Pengaruh fungsi kerja kontak depan (WF_{TCO}) pada kinerja sel surya p-i-n a-Si:H untuk Struktur-1 dan Struktur-2 (a) V_{OC} ; (b) J_{SC} ; (c) FF , dan (d) E_{ff} .

Hasil optimasi menunjukkan bahwa untuk nilai $\text{WF}_{\text{TCO}} = 5.45 \text{ eV}$ memberikan hasil optimum pada kinerja sel surya p-i-n a-Si:H,

terutama untuk sel surya Struktur-2. Gambar 2 (a)-(b) memberikan informasi tentang diagram pita energi sel surya struktur p-i-n a-Si:H dalam keadaan kesetimbangan termodinamika yang dihitung menggunakan perangkat AFORS-HET untuk Struktur-1 dan Struktur-2, dimana dapat dilihat bahwa nilai $WF_{TCO}^n = 5.45 \text{ eV}$ menghasilkan ketinggian barrier untuk hole yang dianggap sebagai kontak netral (tanpa band bending). Penggunaan ITO dengan fungsi kerja besar memberikan keuntungan untuk menghindari keberadaan Schottky barrier pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H yang ditunjukkan dengan perubahan kuantitas ϕ_h disamping meningkatkan ketinggian barrier kontak depan ϕ_{b0} .



Gambar 3. Diagram pita energi sel surya p-i-n a-Si:H dalam keadaan kesetimbangan termodinamika (a) Struktur-1; (b) Struktur-2

Selain itu, nilai WF_{ITO} besar menyebabkan band bending pada anta-muka ITO/(p)a-Si:H dan antar-muka homo (p)a-Si:H/(i)a-Si:H cukup kuat, sehingga menguntungkan bagi *photogenerated* hole terkumpul pada elektroda depan dan menghasilkan potensial barrier bagi elektron pada antar-muka homo. Perbedaan konsentrasi dari pembawa muatan pada antar-muka ITO/(p)a-Si:H

dan antar-muka homo (p)a-Si:H/(i)a-Si:H menyebabkan terjadinya perbedaan pembangkitan medan listrik (*built-in electric fields*).

KESIMPULAN

Sebagai kesimpulan dari studi ini, telah dilakukan simulasi kinerja sel surya p-i-n struktur ITO/(p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)a-Si:H/metal dengan perangkat AFORS-HET. Fungsi kerja kontak depan WF_{ITO} divariasikan pada nilai 4.95 to 5.55 eV dengan tujuan untuk menentukan nilai optimum WF_{ITO} yang menghasilkan sel surya dengan kinerja tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai optimum $WF_{ITO} = 5.45 \text{ eV}$ yang memberikan hasil keluaran listrik untuk Struktur-1 sekitar 6.85% ($V_{OC} = 997.3 \text{ mV}$, $J_{SC} = 8.77 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 78.25\%$) dan untuk Struktur-2 sekitar 7.22% ($V_{OC} = 1063 \text{ mV}$, $J_{SC} = 8.60 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 78.93\%$). Beberapa parameter yang diuji dalam simulasi ini dapat digunakan sebagai landasan dalam melakukan fabrikasi sel surya berbasis a-Si:H dengan kualitas yang lebih baik dari sel surya sejenis yang sudah dikembangkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Salah satu penulis (DH) menyampaikan ucapan terima kasih kepada BUDIDN-LPDP Departemen Keuangan RI yang telah membiayai penelitian ini. Selain itu, ucapan terima kasih kami sampaikan kepada HZB Berlin atas penggunaan perangkat AFORS-HET.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, and X. Hao, (2021) "Solar cell efficiency tables (version 57)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 29, no. 1, pp. 3–15.
- [2] C. Shin *et al.*, (2017) "Development of highly conducting n-type micro-crystalline silicon oxide thin film and its application in high efficiency amorphous silicon solar cell," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 66, pp. 223–231.
- [3] W. H. Son, T. Y. Lee, S. Y. Choi, and D. Jung, (2018) "Effect of phosphorus doping on the performance of pin-type a-Si:H thin-film solar cells," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 662, no. 1, pp. 25–31.
- [4] A. F. Bouhdjar, L. Ayat, A. Meftah, N. Sengouga, and A. Meftah, (2015) "Computer modelling and analysis of the

- photodegradation effect in a-Si:H p—i—n solar cell,” *Journal of Semiconductors*, vol. 36, no. 1, p. 014002.
- [5] I. Crupi *et al.*, (2012) “Influence of the electro-optical properties of an α -Si:H single layer on the performances of a pin solar cell,” *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 11, pp. 4036–4040.
- [6] R. Stangl, C. Leendertz, and J. Haschke, “Numerical Simulation of Solar Cells and Solar Cell Characterization Methods: the Open-Source on Demand Program AFORS-HET,” *Solar Energy*, pp. 319-352.
- [7] D. Hamdani, Y. Cahyono, G. Yudoyono, and D. Darminto, (2021) “Performances analysis of heterojunction solar cells through integration of hydrogenated nanocrystalline silicon bilayer by using numerical study,” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 715, no. 1, pp. 1–20.
- [8] N. Dwivedi, S. Kumar, A. Bisht, K. Patel, and S. Sudhakar, (2013) “Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT solar cells to achieve ~27% efficiency,” *Solar Energy*, vol. 88, pp. 31–41,
- [9] N. Hernández-Como and A. Morales-Acevedo, (2010) “Simulation of heterojunction silicon solar cells with AMPS-1D,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, no. 1, pp. 62–67.
- [10] M. Tan, S. Zhong, W. Wang, and W. Shen, (2017) “Silicon homo-heterojunction solar cells: A promising candidate to realize high performance more stably,” *AIP Advances*, vol. 7, no. 8, p. 085016.
- [11] X. Wen, X. Zeng, W. Liao, Q. Lei, and S. Yin, (2013) “An approach for improving the carriers transport properties of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with efficiency of more than 27%,” *Solar Energy*, vol. 96, pp. 168–176, 2013.
- [12] A. Klein *et al.*, (2010) “Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics: Manipulation of Fermi Level, Work Function and Energy Band Alignment,” *Materials*, vol. 3, no. 11, pp. 4892–4914.
- [13] Y. S. Park, E. Kim, B. Hong, and J. Lee, (2013) “Characteristics of ITO films with oxygen plasma treatment for thin film solar cell applications,” *Materials Research Bulletin*, vol. 48, no. 12, pp. 5115–5120.
- [14] M. Sharma, D. Chaudhary, N. Dwivedi, S. Sudhakar, and S. Kumar, (2017) “Simulating the Role of TCO Materials, their Surface Texturing and Band Gap of Amorphous Silicon Layers on the Efficiency of Amorphous Silicon Thin Film Solar Cells,” *Silicon*, vol. 9, no. 1, pp. 59–68.