

## Pengaruh Annealing Terhadap Tingkat Kestabilan Efisiensi Sel Surya p-i-n a-Si:H Doping Delta

Amiruddin Supu<sup>1)</sup>, Dilla M.<sup>2)</sup>, Jasruddin Daud Malago<sup>3)</sup>, Fitri Suryani Arsyad<sup>2)</sup>,  
Toto Winata dan M. Barmawi

Laboratorium Fisika Material Elektronik, Jurusan Fisika Institut Teknologi Bandung

<sup>1)</sup> Program Studi Fisika, FKIP, Universitas Nusa Cendana, Kupang

<sup>2)</sup> Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Sriwijaya, Palembang

<sup>3)</sup> Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Makassar, Makassar

### Abstrak

Sel surya silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) dengan lapisan-p yang di doping-delta ( $\delta$ -doped) telah difabrikasi dengan reaktor ganda Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD). Gas silan ( $\text{SiH}_4$ ), diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) dan posfin ( $\text{PH}_3$ ) masing-masing 10% dalam hidrogen ( $\text{H}_2$ ) digunakan sebagai sumber gas. Lapisan-p doping-delta dideposisi dengan menggunakan lapisan boron yang sangat tipis sebagai sumber dopan. Pengukuran karakteristik arus ( $I$ ) - tegangan ( $V$ ) menggunakan lampu xenon dengan daya 250 watt dan tegangan 24 volt sebagai sumber cahaya. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa efisiensi sel surya p-i-n a-Si:H doping-delta tanpa annealing menurun dari 5,39 % menjadi 3,49 % dengan meningkatnya lama peninaran dari 0 sampai 2,5 Jam. Efisiensi stabil yang dicapai adalah 3,60 %, yang berarti bahwa terjadi penurunan efisiensi sebesar 33,15 %. Efisiensi sel surya yang diannealing pada temperatur 150 °C menurun dari 8,59 % sampai 6,69 % dengan meningkatnya lama peninaran dari 0 sampai 2,5 Jam. Efisiensi stabil yang dicapai adalah 7,11 %, yang berarti bahwa terjadi penurunan efisiensi sebesar 17,23 %. Jadi dengan melalui proses annealing terjadi pengurangan penurunan efisiensi.

**Kata Kunci :** a-Si:H, Doping-delta, Efisiensi, PECVD, Sel surya

### Abstract

Hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) solar cells with  $\delta$ -doped p-layer have been fabricated using double chamber Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD). 10 % Silane ( $\text{SiH}_4$ ), diborane ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) and phosphine ( $\text{PH}_3$ ) gases in hydrogen ( $\text{H}_2$ ) gas were used as gas sources.  $\delta$ -Doped p-layer was deposited by using very thin boron layer as dopant source. Current ( $I$ ) - voltage ( $V$ ) characteristic measurement was done using xenon lamp as light source with power of 250 watts and voltage of 24 volts. The result shows that the efficiency of  $\delta$ -doped p-i-n a-Si:H solar cell without annealing decreases from 5.39 % to 3.49 % as the illumination time increases from 0 hours to 2.5 hours. The stable efficiency obtained is 3.6 %. It means that there is an efficiency drop of 33.15 %. Solar cell efficiency annealed at temperature of 150 °C decreases from 8.59 % to 6.69 % as the illumination time increases from 0 hours to 2.5 hours. Its stable efficiency obtained is 7.11 %. It means that there is an efficiency drop of 17.23 %. Thus the annealing process decreases the efficiency drop.

**Keywords:** a-Si:H,  $\delta$ -doped, efficiency, PECVD, solar cell

### 1. Pendahuluan

Silikon amorf (a-Si) telah banyak dikembangkan untuk aplikasi divais optoelektronik, seperti sel surya, fotoreseptor, sensor warna, *thin film light emitting diode* (TFLED) dan *thin film transistor* (TFT). Jika dibandingkan dengan silikon kristal, silikon amorf mempunyai *optical bandgap* yang lebih lebar dan absorpsi optik yang lebih tinggi. *Optical bandgap* material silikon amorf dapat dikontrol dengan menambahkan atom karbon dan atau atom hidrogen kedalam matriks silikon. Hamakawa *et. al.*<sup>1)</sup> telah mengembangkan silikon amorf karbida (a-SiC) dengan *optical bandgap* yang lebar. J.H.Jang dan K.S.Lim<sup>2)</sup> juga telah meneliti efek penambahan hidrogen (*post hydrogen treatment*) untuk

meningkatkan *optical bandgap* dari film a-SiC:H yang didoping boron. Dalam aplikasinya pada sel surya, *optical bandgap* yang lebar pada lapisan-p diperlukan sebagai lapisan jendela untuk mempertinggi absorpsi cahaya dalam lapisan-i sebagai lapisan aktif.

Meskipun efisiensi konversi sel surya silikon amorf terhidrogenasi telah mencapai 12 %<sup>3,4)</sup>, peningkatan efisiensi konversi diperlukan untuk sistem-sistem pembangkit energi photovoltaic berskala besar. Usaha peningkatan efisiensi sel surya silikon amorf telah banyak dilakukan seperti memperbaiki kualitas material dan struktur divaisnya. Struktur sel surya silikon amorf terhidrogenasi

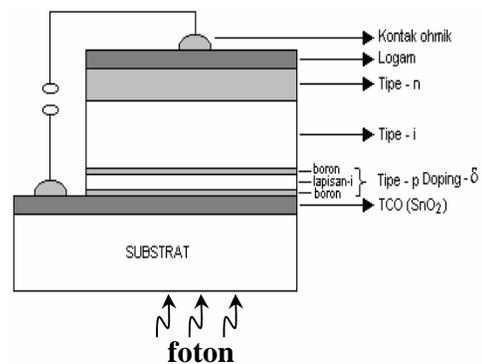
(a-Si:H) yang populer difabrikasi adalah p-i-n, dimana cahaya masuk melalui lapisan-p sebagai lapisan jendela. Dengan hasil simulasi komputer<sup>5)</sup>, didapatkan bahwa efisiensi konversi sel surya konvensional dibatasi oleh konsentrasi pembawa yang rendah di lapisan-p. Untuk meningkatkan konsentrasi pembawa dan transparansi lapisan-p, telah dikembangkan sel surya dengan struktur doping-delta ( $\delta$ -doped) pada lapisan-p<sup>6,7)</sup>. Terlihat bahwa sifat optik dan listrik lapisan-p doping-delta meningkat dibandingkan dengan lapisan-p doping seragam. Dengan menggunakan lapisan-p doping-delta telah dihasilkan efisiensi 12,9 %<sup>8)</sup>.

Masalah lain yang penting dalam pengembangan sel surya silikon amorf terhidrogenasi adalah degradasi dari sifat filmnya khususnya pada lapisan-i saat diberi penyinaran kuat ( $\sim 100 \text{ mW cm}^{-2}$ ) yang dikenal dengan efek *Staebler-Wronski*, yaitu suatu gejala menurunnya *photo conductivity* dan *dark conductivity* dari material silikon amorf terhidrogenasi saat diberi penyinaran yang kuat. Untuk mengurangi degradasi ini, dilakukan penipisan lapisan-i dan memperbaiki kualitas film a-Si:H (mengurangi kandungan hidrogen dalam film) dengan tidak menambah cacat optik dalam film tersebut. Kandungan hidrogen yang rendah dalam film a-Si:H akan menghasilkan sel surya dengan efisiensi yang stabil, yaitu tidak terjadinya penurunan efisiensi dari sel surya saat disinari dalam waktu yang lama dengan intensitas yang tinggi. A. Miyaniishi *at.al.*<sup>9)</sup> telah meneliti efek *Staebler-Wronski* dalam lapisan a-Si:H dengan menggunakan *deep level transient spectroscopy* (DLTS). Dalam studi ini sel surya p-i-n a-Si:H doping-delta diannealing dan dikarakterisasi untuk mengetahui kestabilan efisiensinya.

## 2. Eksperimen

Lapisan-p doping-delta dideposisi dengan menggunakan lapisan boron yang sangat tipis sebagai sumber dopan. Struktur lapisan-p doping-delta terdiri dari dua lapisan boron yang sangat tipis (0,1 – 0,5 *atomic layer*) dan diantara lapisan boron tersebut disisipkan lapisan a-Si:H tanpa doping setebal 27 Å. Lapisan a-Si:H tanpa doping dideposisi dengan menggunakan gas  $\text{SiH}_4$  10 % dalam hidrogen ( $\text{H}_2$ ), sedangkan lapisan boron dideposisi dengan menggunakan gas  $\text{B}_2\text{H}_6$  10 % dalam hidrogen ( $\text{H}_2$ ) sebagai sumber gas. Lapisan boron dideposisi dengan laju aliran gas 0,3 sccm, daya rf 25 watt dan temperatur substrat serta tekanan *chamber* masing-masing dipertahankan pada 200°C dan 650 mTorr.

Sel surya silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) dengan lapisan-p yang di doping-delta difabrikasi dengan menggunakan reaktor ganda *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD). Lapisan-i (a-Si:H) tanpa doping dideposisi pada *chamber* yang berbeda untuk deposisi lapisan boron dan lapisan-n. Struktur sel surya dengan lapisan-p yang di doping-delta (gelas/TCO/p( $\delta$ )-i-n/metal) diperlihatkan secara skematik dalam Gambar 1. Sel surya a-Si:H doping-delta yang telah difabrikasi, diannealing pada temperatur 150 °C selama 4 jam dengan menggunakan *Nabertherm Program Controller S 27*.

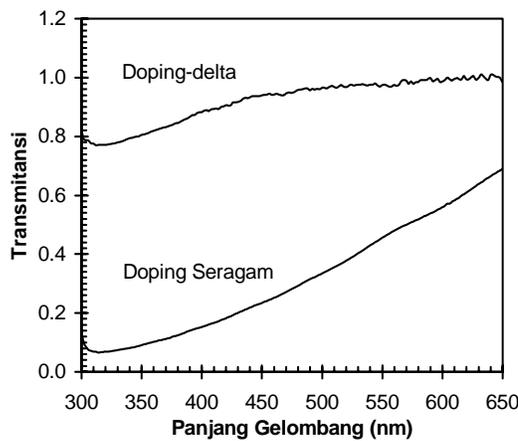


Gambar 1. Struktur sel surya p-i-n a-Si:H doping-delta

Sel surya a-Si:H doping-delta dikarakterisasi untuk mengetahui karakteristik arus (I) - tegangan (V) menggunakan lampu xenon dengan daya 250 watt dan tegangan 24 volt sebagai sumber cahaya pada intensitas  $19,89 \text{ mW cm}^{-2}$ . Selain itu, lapisan-p yang diaplikasikan dalam sel surya a-Si:H doping-delta dikarakterisasi dengan menggunakan *Ultraviolet - Visible* (UV-Vis) dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

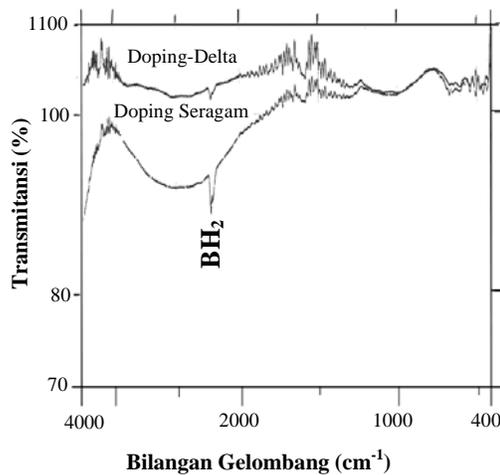
## 3. Hasil dan Diskusi

Gambar 2 memperlihatkan spektrum UV-Vis dari lapisan-p doping seragam dan lapisan-p doping-delta. Dari gambar terlihat bahwa lapisan-p doping-delta mempunyai transmitansi yang lebih tinggi dibanding dengan lapisan-p doping seragam yang berarti bahwa lapisan-p doping-delta lebih transparan dibandingkan dengan lapisan-p doping seragam.



Gambar 2. Spektrum UV-VIS dari lapisan-p doping seragam dan doping-delta<sup>10)</sup>

Perbedaan ini secara umum disebabkan karena adanya cacat (*defect*) akibat doping pada lapisan-p doping seragam. Cacat ini mengakibatkan penurunan *optical bandgap* dan memperbesar penyerapan cahaya pada lapisan tersebut.



Gambar 3. Spektrum FTIR dari Lapisan-p doping seragam dan lapisan-p doping-delta

Hasil karakterisasi fourier transform infrared memperlihatkan bahwa struktur ikatan boron-hidrogen tidak berbeda untuk lapisan-p doping-delta dengan lapisan-p doping seragam (Gambar 3). Ikatan boron-hidrogen lebih banyak terlihat pada lapisan-p doping seragam dibanding pada lapisan-p doping-delta. Ini disebabkan pengikisan film oleh radikal hidrogen selama deposisi. Dari hasil karakterisasi di atas menunjukkan bahwa lapisan-p doping-delta yang dideposisi dengan reaktor ganda *Plasma Enhanced*

*Chemical Vapor Deposition* (PECVD) sangat baik digunakan sebagai *window layer* dalam sel surya p-i-n silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H).

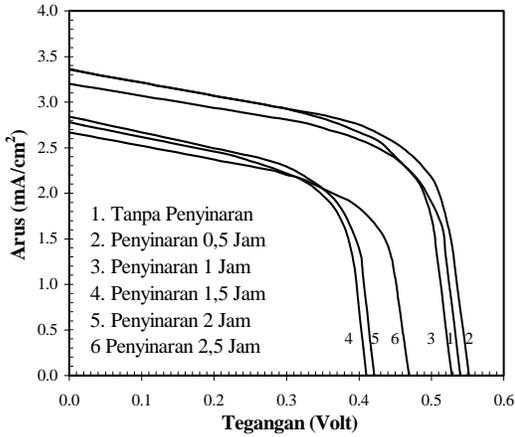
Sel surya a-Si:H dengan lapisan-p yang di doping-delta difabrikasi dengan menggunakan lapisan boron yang ditumbuhkan pada laju aliran gas B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 0,3 sccm. Unjuk kerja sel surya lapisan-p doping-delta dikarakterisasi menggunakan lampu xenon dengan daya 250 watt dan tegangan 24 volt sebagai sumber cahaya pada intensitas 19,89 mW cm<sup>-2</sup>. Intensitas yang digunakan ini lebih rendah dari intensitas standard (100 mW cm<sup>-2</sup>). Dengan menggunakan intensitas yang rendah, akan menghasilkan arus yang rendah pula. Arus yang rendah ini sangat pekah terhadap perubahan lingkungan saat dilakukan pengukuran sehingga menghasilkan karakteristik I-V yang kurang baik. Sebaliknya, dengan intensitas yang standard akan menghasilkan karakteristik I-V yang baik. Selain itu, intensitas ini bersesuaian dengan intensitas matahari di siang hari. Dengan demikian karakteristik sel surya yang diukur sama dengan karakteristik sel surya tersebut saat diaplikasikan.

Tabel 1. Unjuk kerja sel surya a-Si:H doping-delta tanpa *annealing* dan yang diannealing pada temperatur 150 °C selama 4 Jam

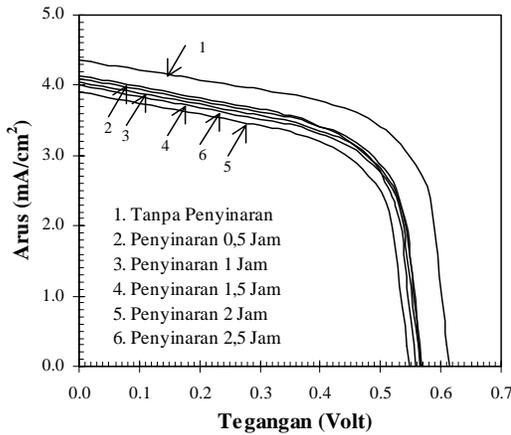
	Waktu (Jam)	Isc mA/cm <sup>2</sup>	Voc	FF	Efisiensi
Tanpa Annealing	0.0	3.201	0.540	0.620	5.39
	0.5	3.356	0.552	0.620	5.77
	1.0	3.367	0.528	0.612	5.47
	1.5	2.779	0.410	0.610	3.49
	2.0	2.841	0.421	0.600	3.61
	2.5	2.669	0.469	0.590	3.71
Annealing	0.0	4.360	0.614	0.638	8.59
	0.5	4.140	0.559	0.626	7.28
	1.0	4.094	0.569	0.627	7.34
	1.5	4.050	0.568	0.622	7.19
	2.0	3.908	0.548	0.621	6.69
	2.5	4.001	0.566	0.619	7.05

Unjuk kerja sel surya a-Si:H doping-delta tanpa *annealing* dan yang diannealing pada temperatur 150 °C selama 4 jam selengkapnya diperlihatkan pada tabel 1. Gambar 4 memperlihatkan karakteristik I-V sel surya a-Si:H doping-delta tanpa *annealing*. Dari gambar terlihat bahwa sel surya yang

diberi penyinaran dari 0 jam sampai 1 jam mempunyai karakteristik I-V yang relatif sama, sedangkan sel surya yang diberi penyinaran dari 1,5 jam sampai 2,5 jam menunjukkan karakteristik yang lebih rendah. Karakteristik I-V sel surya a-Si:H doping-delta yang diannealing pada temperatur 150 °C (gambar 5) secara umum lebih tinggi dari sel surya tanpa *annealing*.



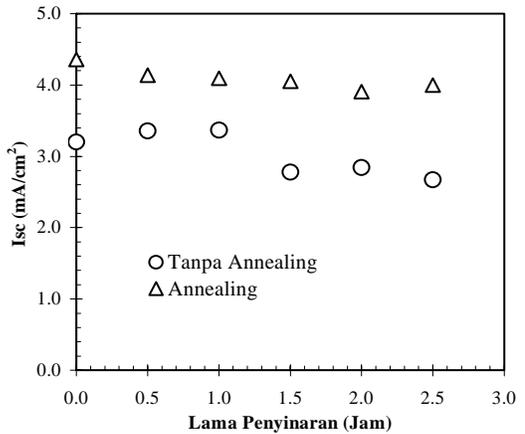
Gambar 4. Karakteristik I-V sel surya lapisan-p doping-delta tanpa annealing



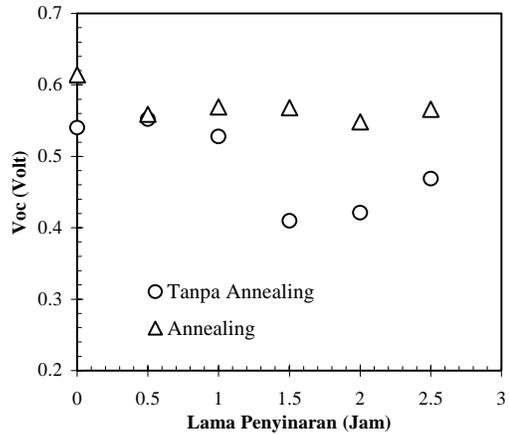
Gambar 5. Karakteristik I-V sel surya lapisan-p doping-delta yang diannealing

Gambar 6 memperlihatkan arus hubung singkat sebagai fungsi dari lama penyinaran. Dari gambar terlihat bahwa arus hubung singkat untuk sel surya tanpa *annealing* menurun dari 3,201 mA cm<sup>-2</sup> sampai 2,669 mA cm<sup>-2</sup> dengan meningkatnya lama penyinaran dari 0 sampai 2,5 jam, dan mencapai kestabilan disekitar 2,763 mA cm<sup>-2</sup>. Ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan arus hubung singkat sebesar 13,68 %, Penurunan arus hubung singkat ini terjadi karena terbentuknya *dangling bond* yang

meningkatkan *density of states* dan berakibat pada penurunan konduktivitas. Arus hubung singkat dari sel surya yang diannealing menurun dari 4,360 mA cm<sup>-2</sup> sampai 3,908 mA cm<sup>-2</sup> dengan meningkatnya lama penyinaran dari 0 sampai 2,5 jam. Dan mencapai kestabilan disekitar 4,039 mA cm<sup>-2</sup>. Ini berarti terjadi penurunan arus hubung singkat sebesar 7,37 %. Dengan demikian penurunan arus hubung singkat dari sel surya yang diannealing lebih rendah dibandingkan dengan sel surya tanpa *annealing*.



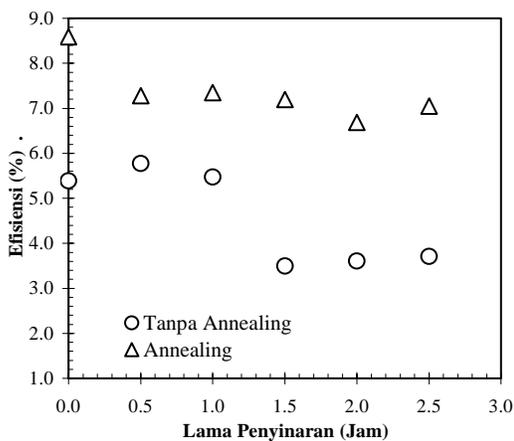
Gambar 6. Arus hubung singkat (I<sub>sc</sub>) sebagai fungsi dari lama penyinaran



Gambar 7. Tegangan rangkaian buka (V<sub>oc</sub>) sebagai fungsi dari lama penyinaran

Gambar 7 memperlihatkan tegangan rangkaian buka sebagai fungsi dari lama penyinaran. Dari gambar terlihat bahwa tegangan rangkaian buka dari sel surya tanpa *annealing* menurun dari 0,540 Volt sampai

0.410 Volt dengan meningkatnya lama penyinaran dari 0 sampai 2,5 jam dan mencapai kestabilan disekitar 0.433 Volt. Ini berarti bahwa terjadi penurunan tegangan rangkaian buka sebesar 19,81%. Penurunan tegangan rangkaian buka ini terjadi karena meningkatnya keadaan terlokalisasi yang merubah tingkat fermi dan berakibat pada perubahan *built-in potential*. Tegangan rangkaian buka sel surya yang diannealing menurun dari 0.614 Volt sampai 0.548 Volt dengan meningkatnya lama penyinaran dari 0 sampai 2,5 jam, dan mencapai kestabilan disekitar 0.562 Volt. Ini berarti bahwa terjadi penurunan tegangan rangkaian buka sebesar 8,47 %. Jadi penurunan tegangan rangkaian buka dari sel surya yang diannealing lebih rendah dibandingkan dengan sel surya tanpa *annealing*.



Gambar 8. Efisiensi sel surya sebagai fungsi dari lama penyinaran

Grafik efisiensi sel surya sebagai fungsi dari lama penyinaran diperlihatkan dalam gambar 8. Dari gambar terlihat bahwa efisiensi sel surya p-i-n a-Si:H doping-delta tanpa annealing menurun dari 5,39 % sampai 3,49 % dengan meningkatnya lama penyinaran dari 0 sampai 2,5 Jam. Efisiensi stabil yang dicapai adalah 3,60 %, yang berarti bahwa terjadi penurunan efisiensi sebesar 33,15 %. Penurunan efisiensi sel surya ini terjadi akibat kandungan hidrogen dalam lapisan a-Si:H yang cukup tinggi. Kandungan hidrogen yang tinggi akan meningkatkan ketidakstabilan sel surya saat diberi penyinaran yang tinggi. Efisiensi sel surya yang diannealing pada temperatur 200°C menurun dari 8,59 % sampai 6,69 % dengan meningkatnya lama penyinaran dari 0 sampai 2,5 Jam. Efisiensi stabil yang dicapai adalah 7,11 %, yang berarti bahwa terjadi penurunan efisiensi sebesar 17,23 %. Penurunan efisiensi yang rendah ini, disebabkan oleh meningkatnya tingkat kestabilan sel surya melalui proses *annealing*. Jadi dengan proses *annealing*

diperoleh penurunan efisiensi sel surya 17,23 % yang lebih rendah dibanding dengan penurunan efisiensi sel surya tanpa annealing sebesar 33,15%.

#### 4. Kesimpulan

Kebergantungan unjuk kerja sel surya tanpa *annealing* dan yang diannealing terhadap lama penyinaran memperlihatkan bahwa baik arus hubung singkat, tegangan rangkaian buka maupun efisiensi sel surya menurun dengan meningkatnya lama penyinaran. Penurunan arus hubung singkat setelah diannealing (7,37 %) lebih rendah dibandingkan dengan arus hubung singkat tanpa *annealing* (13,68 %). Tegangan rangkaian buka sel surya setelah diannealing menurun sebesar 8,47 %, penurunan ini lebih rendah dibandingkan dengan sel surya tanpa *annealing* sebesar 19,81 %. Efisiensi stabil sel surya setelah diannealing sebesar 7,11 % lebih tinggi dibandingkan dengan efisiensi stabil sel surya sebelum diannealing sebesar 3,60 %. Melalui proses *annealing* diperoleh penurunan efisiensi sel surya 17,23 % yang lebih rendah dibanding dengan penurunan efisiensi sel surya tanpa annealing sebesar 33,15%.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pimpinan proyek RUT-IV dengan nomor. 246/SP/RUT/BPPT/IV/96, 98/SP/RUT/BPPT/97 dan 140/SP/RUT/BPPT/98, serta CENTER GRANT dengan no.008/CG/III/URGE/1997 yang telah membiayai penelitian ini.

#### Daftar Pustaka

1. Y. Hamakawa, Y. Tawada, K. Nishimura, K. Tsuge, M. Kondo, K. Fujimoto, S. Nonomura and H. Okamoto, *Proc. 16<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conf.*, 1982, p.679
2. J.H.Jang and K.S.Lim, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 36 (1997) pp. 5230-6236 Part. 1. No.10. Oktober 1997.
3. Y. Hattori, D. Kruangam, T. Toyama, H. Okamoto and Y. Hamakawa, *Technical Digest of Int'l PCSEC-3*, Tokyo, 1997, p. 171.
4. N. Fukuda, H. Tanaka, K. Miyachi, Y. Ashida, Y. Ohashi and A. Nitta, *Proc. 20<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conf.*, Las Vegas, 1988, p. 247.

5. H. Tasaki, W.Y. Kim, M. Hallerdt, M. Konagai and K. Takahashi, *J. Appl. Phys.* **63**, 1989, p. 550.
6. Y. Kazama, K. Seki, W.Y. Kim, S. Yamanaka, M. Konagai and K. Takahashi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, 1989, p. 1160.
7. S. Yamanaka, Y. Seki, K. Hiroshiro, M. Konagai and K. Takahashi, *J. Non-Cryst. Solids* **115**, 1989, p. 60.
8. W.W. Wenas, *Study of Transparent Conducting ZnO Grow by Metalorganic Chemical Vapor Deposition and its Application to Amorphous silicon Solar Sells*, Dissertation of Doctor of Engineering, Tokyo Institut of Technology, 1994.
9. A. Miyanishi, J-icho Nakata, S. Imao, J. Shirafuji, U. Kubo and Y. Inuishi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, 2B, February, 1991, pp. L243-L245.
10. Amiruddin S., Jasruddin DM., T. Winata, dan M. Barmawi, *Karakterisasi lapisan-p doping-delta ( $\delta$ -delta) yang Dideposisi dengan Reaktor PECVD Ganda dan Aplikasinya dalam Sel Surya*, (Sudah disetujui untuk diterbitkan di KFI 2001)