

ANALISIS PENURUNAN EFISIENSI SEL SURYA YANG DISEBABKAN PERLUASAN SEL PADA STRUKTUR P-I-N PECVD (*PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION*) a-Si-H

Agung Budiono¹ dan Eddy Yahya²

¹ Teknik Fisika, FTI - ITS

Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya 60111

² Jurusan Fisika, FMIPA - ITS

Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya 60111

ABSTRAK

ANALISIS PENURUNAN EFISIENSI SEL SURYA YANG DISEBABKAN PERLUASAN SEL PADA STRUKTUR P-I-N PECVD a-Si-H. Makalah ini menganalisis penurunan efisiensi yang disebabkan perluasan sel struktur p-i-n dengan metode kausal komparatif. Analisis lebih ditekankan pada PECVD a-Si-h lapisan-i yang dalam struktur p-i-n berfungsi sebagai media aktif, sedangkan lapisan-p dan lapisan n berfungsi sebagai media pasif. Hasil pengukuran I-V konduktivitas *dalam gelap* dan *di bawah iluminasi*, baik menggunakan teknik *2-probe* dan *4-probe*, PECVD a-Si:H lapisan-i berfungsi sebagai media aktif dengan beda hampir mencapai 7 orde. Dalam pengukuran sifat absorpsi ditemukan bahwa ikatan antar atom Si dan atom H masih didominasi oleh ikatan (SiH₂)_n dengan nomor-gelombang 792 cm⁻¹ sampai dengan 2089 cm⁻¹. Hal ini menunjukkan keberadaan *dangling bond* pada PECVD a-Si:H lapisan-i. Dengan penerapan konsep dasar Iptek Bahan, pemrosesan metode PECVD perlu ditentukan rasio efektif aliran gas (H₂/SiH₄) dengan pertumbuhan lambat, bila dipandang perlu suhu deposisi T_d juga harus diturunkan dibawah 275 °C.

Kata kunci : Material energi

ABSTRACT

ANALYSIS OF DECREASING THE EFFICIENCY SOLAR CELL P-I-N STRUCTURE PECVD (PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION) a-Si-H BECAUSE OF WIDER AREA CELL. This paper is about analysis decreasing efficiency solar cell p-i-n because of wider area cell using causal comparative method. The analysis is pressing on the i-layer of the a-Si:H, because the i-layer is the active medium in the cell. The p and n-layers are the passive-medium. I-V measurement of the conductivity i-layer under dark and under illumination show 7 orde difference. While infrared measurement of absorption shows that bounds among Si and H atom are dominated by (SiH₂)_n bonds in wave-number 792 to 2089 cm⁻¹. This means that there are many dangling-bonds exist in i-layer. So to neutralized the dangling bonds, the deposition i-layer need control flow of H₂ gas, and the i-layer grows slowly by decreasing deposition temperature T_d to below 275 °C.

Key words : Energy of material

PENDAHULUAN

Sel surya adalah sumber energi terbarukan yang bersih lingkungan, ekonomis dari sisi tertentu dan aman dibandingkan dengan energi nuklir. Khusus dalam mendukung energi-listrik terbatas di pedesaan dan kepulauan maka sel surya menjadi energi yang ekonomis dan aman.

Dari sisi mampu bentuk, sel surya berbasis a-Si-H (amorf Silikon berhidrogen) dengan substrat plastik tahan panas [1] sangat dimungkinkan dibentuk sesuai ukuran atap gedung. Penempatan sel surya di atap gedung, atau mendayagunakan luasan yang

diperlukan, juga sebagai sumber energi listrik terbatas untuk keperluan tertentu.

Perluasan sel surya struktur p-i-n PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) dari ukuran luas 0,25 cm² menjadi ukuran 1,0 cm² yang telah dilakukan [2] menunjukkan penurunan efisiensi η=10,0% menjadi η=7,5%. Penurunan efisiensi sel ini sesuai dengan keterbatasan struktur kristal lapisan a-Si (amorf Silikon) yang hanya memiliki tata jangkauan dekat (*Short Range-Ordered*) bila dibandingkan dengan c-Si (*crystal-Silicon*) yang memiliki tata jangkauan jauh

(Long Range Ordered). Salah satu cara yang telah dilakukan para ahli semikonduktor yaitu mengisi *dangling bond* atom Si dengan atom H, sehingga pemrosesan PECVD mampu menghasilkan a-Si-H. Dengan penerapan konsep dasar iptek bahan (keterkaitan struktur, sifat perilaku dan pemrosesan) pada fabrikasi sel surya struktur p-i-n PECVD a-Si-H diharapkan mampu mencapai a-Si-H memenuhi tata jangkauan jauh, seperti halnya c-Si.

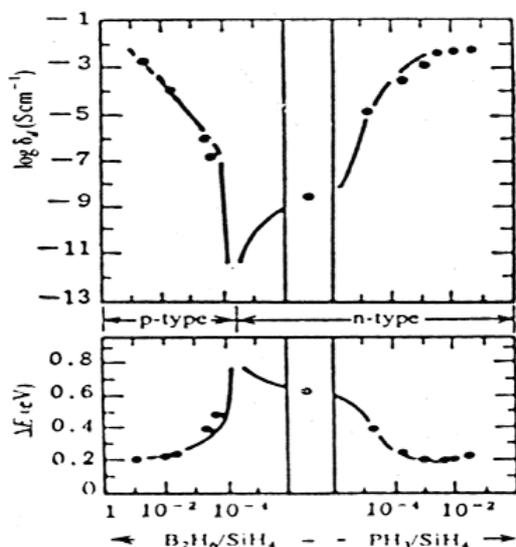
Selanjutnya setiap sampel eksperimen PECVD a-Si-H, terutama lapisan-i akan diuji beda sifat konduktivitas dalam gelap dan di bawah iluminasi, serta uji sifat absorpsi. Dengan metode kausal komparatif dalam bagan sebab-akibat, seluruh hasil data terukur merupakan variabel penyebab dan data efisiensi merupakan variabel akibat. Oleh karena itu tujuan makalah ini adalah untuk menganalisis penurunan efisiensi sel dan mencari data-data penyebab dari hasil pengukuran.

TEORI

Sifat dan Perilaku Konduktivitas

Sifat dan perilaku konduktivitas dalam gelap σ_d dan di bawah iluminasi σ_{ph} dari setiap lapisan a-Si-H dalam struktur p-i-n sangat berbeda. Lapisan p dan lapisan n harus berperilaku sebagai medium pasif terhadap iluminasi, sedangkan lapisan i berperilaku sebagai medium aktif. Untuk memenuhi perilaku lapisan tersebut, Ketebalan lapisan harus berkisar 3000 Å sesuai standar optik [3]. Bila lapisan terlalu tipis data terukur lebih rendah dari data sebenarnya, sebaliknya bila terlalu tebal dimungkinkan foton tidak mampu menembus lapisan.

Fenomena ini semakin rumit bila dikaitkan dengan luasan sel, karena di setiap titik ukur tidak dapat



Gambar 1. Hubungan antara jumlah doping dengan konduktivitas dalam gelap σ_d dan jumlah doping dengan energi aktivasi.

dipastikan mempunyai ketebalan yang sama. Hal ini sangat perlu diperhatikan pada pemrosesan fabrikasi PECVD a-Si-H untuk skala luas dan mengingat pemrosesan lapisan-i memerlukan rasio aliran gas (B_2H_6/SiH_4) yang kecil, seperti yang ditunjukkan Gambar 1.

Dalam Gambar 1. menunjukkan karakteristik *doping* dari a-Si:H tipe-p dan tipe-n. Konduktivitas lapisan a-Si-H tipe p meningkat dari 10^{-11} S.cm⁻¹ sampai dengan 10^{-2} S.cm⁻¹, demikian pula dengan lapisan a-Si-H tipe n. Khusus tipe n melebar sampai dengan tanpa *doping* dan bahkan sampai dengan aliran gas (B_2H_6/SiH_4) dalam ratio kecil. Hal ini disebabkan lapisan a-Si-H tipe n memiliki energi Fermi (E_F) sedikit lebih tinggi dari separuh energi gap (E_g) dan dengan ratio kecil aliran gas (B_2H_6/SiH_4) akan menggeser E_F ke tengah-tengah serta memberikan kondisi a-Si-H tipe i.

Sifat Absorpsi Inframerah

Sifat absorpsi inframerah digunakan untuk jumlah atom Hidrogen (H) yang dikandung dalam lapisan PECVD a-Si-H, dan macam ikatan antara atom Si dan atom H.

Keberadaan atom H dalam a-Si-H berperan pada konstanta dielektrik inframerah disebabkan polarisasi dari isolator Si-H menghasilkan variasi pada koefisien absorpsi pada Tabel 1.

Tabel 1. Mode vibrasi molekuler dan frekuensi vibrasi ikatan Si-H [5]

Type of bond	Type of vibration	● Si	○ H
SiH	2000 cm ⁻¹ Stretching 630 cm ⁻¹ Bending		
SiH ₂	2090 cm ⁻¹ Stretching 880 cm ⁻¹ Bend scissors 630 cm ⁻¹ Rocking		
(SiH ₂) _n	2090-2100 cm ⁻¹ Stretching 890 cm ⁻¹ Bend scissors 845 cm ⁻¹ Wagging 630 cm ⁻¹ Rocking		
SiH ₃	2140 cm ⁻¹ Stretching 907 cm ⁻¹ Symmetric deformation 862 cm ⁻¹ Degenerate deformation 630 cm ⁻¹ Rocking		

Tabel 1 di atas memberi informasi penting dari data terukur dengan data nomor gelombang sehingga dapat ditera tipe ikatan, tipe vibrasi serta persentase atom H dari setiap sampel eksperimen. Metode lain untuk menentukan persentase atom H bila koefisien absorpsi α dari sampel eksperimen terjadi dalam interval

2000 cm⁻¹ sampai dengan 2100 cm⁻¹ diberikan Freeman dan Paul [6] melalui persamaan,

$$C_H = 1,06 + \alpha(h\nu)d(h\nu) (\% \text{ atom cm/eV}) \dots\dots\dots(1)$$

dengan C_H adalah jumlah presentase atom H

Koefisien absorpsi α diperhitungkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\alpha = [2 - \log(\%T)] / bc \dots\dots\dots(2)$$

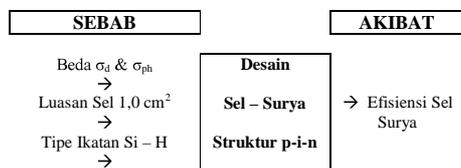
dengan b adalah ketebalan lapisan dan c adalah konsentrasi padatan.

Dengan demikian perhitungan C_H selain menggunakan persamaan 1 dan persamaan 2, juga harga c diperhitungkan dari perbandingan padatan SiH₄ dengan KBr.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode Kausal Komparatif

Penggunaan analisis metode kausal komparatif diawali dari variabel akibat yaitu penurunan efisiensi sel dan menentukan salah satu dari variabel penyebab yang meliputi luasan sel, sifat konduktivitas dalam gelap dan di bawah iluminasi dan tipe ikatan antar atom Si dan atom H. Dengan bagan hubungan sebab akibat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Penganalisisan metode kausal komparatif dalam bagan hubungan sebab akibat.

Rancangan Percobaan

Pengukuran Konduktivitas Listrik

Rancangan eksperimental yang digunakan adalah *One Group Pretest and Posttest Design* meliputi:

- Pretest berupa pengukuran σ_d dan Posttest berupa pengukuran σ_{ph} dengan menggunakan rangkaian 2 point probe dan 4 point probe.
- Perlakuan terhadap sampel eksperimen dan sampel kontrol (lapisan-i, lapisan-p, lapisan-n) diberi di bawah iluminasi.

Tabel 2. Hasil pengukuran konduktivitas listrik σ_d dan σ_{ph} untuk sampel eksperimen dan sampel kontrol PECVD a-Si-H lapisan-i.

Sampel Lapisan tipe-i	Konduktivitas σ _d (S cm ⁻¹)	PERLAKUAN (rangk. 4-point probe)	Konduktivitas σ _{ph} (S cm ⁻¹)
Eksperimen-1	3,90 x 10 ⁻¹¹	X	1,25 x 10 ⁻³
Eksperimen-2	9,05 x 10 ⁻¹⁰	X	8,20 x 10 ⁻⁴
Eksperimen-3	6,45 x 10 ⁻¹¹	X	4,05 x 10 ⁻⁵
Kontrol	9,65 x 10 ⁻¹¹	non-X (rangk. 2-point probe)	2,24 x 10 ⁻⁵

Hasil pengukuran I-V untuk rangkaian 2 point probe dan 4 point probe ditunjukkan dalam Tabel 2.

Perbedaan sifat konduktivitas listrik a-Si-H lapisan-i cukup spektakuler (~6 orde) antara kondisi dalam gelap dan di bawah iluminasi cahaya lampu Xenon (Xe). Perbedaan ini menunjukkan bahwa lapisan-i pada sel surya struktur p-i-n berfungsi sebagai media aktif yang peka terhadap pengaruh iluminasi cahaya tampak lampu Xe. Khusus untuk rangkaian 2 point probe penurunan mencapai ~7 orde merupakan pembandingan terhadap rangkaian 4 point probe.

Selanjutnya dalam Tabel 3 dan Tabel 4, lapisan n maupun lapisan p relatif tidak terpengaruh terhadap iluminasi cahaya tampak lampu Xe, sehingga ke-2 lapisan mampu berfungsi sebagai media pasif. Oleh karena itu dari sisi fungsi masing-masing lapisan penyusun struktur p-i-n telah memenuhi syarat sebagai sel surya.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Konduktivitas Listrik σ_d dan σ_{ph} untuk Sampel Eksperimen dan Sampel Kontrol PECVD a-Si:H Lapisan-p

Sampel Lapisan tipe-p	Konduktivitas σ _d (S cm ⁻¹)	(rangk. 4-point probe)	Konduktivitas σ _{ph} (S cm ⁻¹)
Eksperimen-1	3,95 x 10 ⁻⁵	X	4,25 x 10 ⁻⁵
Eksperimen-2	7,65 x 10 ⁻⁵	X	8,34 x 10 ⁻⁵
Eksperimen-3	5,51 x 10 ⁻⁵	X	6,07 x 10 ⁻⁵
Kontrol	4,65 x 10 ⁻⁵	non-X (rangk. 2-point probe)	5,70 x 10 ⁻⁵

Tabel 4. Hasil Pengukuran Konduktivitas Listrik σ_d dan σ_{ph} untuk Sampel Eksperimen dan Sampel Kontrol PECVD a-Si-H Lapisan-n.

Sampel Lapisan tipe-n	Konduktivitas σ _d (S cm ⁻¹)	PERLAKUAN (rangk. 4-point probe)	Konduktivitas σ _{ph} (S cm ⁻¹)
Eksperimen-1	3,10 x 10 ⁻²	X	3,22 x 10 ⁻²
Eksperimen-2	2,93 x 10 ⁻²	X	3,20 x 10 ⁻²
Eksperimen-3	3,31 x 10 ⁻²	X	3,40 x 10 ⁻²
Kontrol	3,06 x 10 ⁻²	non-X (rangk. 2-point probe)	3,26 x 10 ⁻²

Penurunan Efisiensi Sel Surya Struktur p-i-n

Pembuatan sel surya lapisan-tipis PECVD a-Si-H diatas substrat *corning glass* yang telah berlapis TCO (*Tin-Copper-Oxide*) dan yang berfungsi sebagai kontak ohmik depan. Lapisan-n yang berfungsi sebagai media pasif dideposisikan terlebih dahulu, kemudian lapisan-i yang berfungsi sebagai media aktif dan lapisan-p dideposisi yang terakhir. Ke 3 lapisan masing-masing dideposisi pada *chamber* yang berbeda melalui metode pemrosesan PECVD sehingga fenomena kontaminasi antar lapisan mampu diminimalisasi, terutama lapisan-i.

Setelah struktur p-i-n terbentuk dengan ketebalannya masing-masing, disisi samping lapisan p diuapkan bahan Perak (Ag) sebagai kontak ohmik belakang. Dengan luasan sel 0,25 cm² diperoleh efisiensi η=10% dan luasan sel 1,0 cm² mengalami penurunan

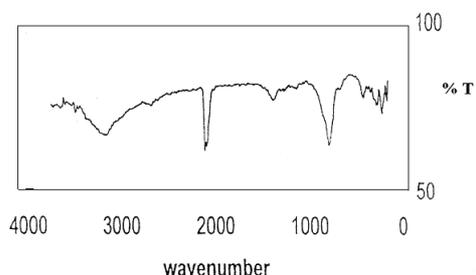
cukup signifikan menjadi $\eta=7,5\%$. Salah-satu dugaan yang sangat dimungkinkan sebagai penyebab turunnya efisiensi adalah lapisan-i dan dengan mengabaikan fenomena kerapatan keadaan terlokalisasi, sehingga faktor ketebalan lapisan merupakan penyebab karena,

- Bila lapisan-i terlalu tebal maka akan menurunkan *Fill Factor (FF)* dan efisiensi sel akan turun,
- Bila lapisan-i terlalu tipis maka akan meningkatkan *FF* tetapi arus hubungan pendek I_{sc} berkurang dan juga akan menurunkan efisiensi.

Ke 2 keadaan diatas yang menyebabkan lapisan-i perlu dianalisis dengan penerapan konsep Iptek bahan.

Sifat Absorpsi Lapisan-i

Sifat transmisi dalam satuan persen *PECVD* a-Si:H lapisan-i terhadap sinar inframerah ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sifat absorpsi lapisan a-Si:H tipe-i terhadap sinar inframerah ditunjukkan dalam bentuk penonjolan

Penonjolan ke bawah dari kurva tersebut merupakan sifat absorpsi lapisan-i terhadap sinar inframerah. Dengan demikian sifat absorpsi terjadi pada panjang gelombang (*wave number*) 2089 cm^{-1} dan 792 cm^{-1} dan panjang gelombang tersebut berada diantara 2050 cm^{-1} hingga 2190 cm^{-1} menunjukkan adanya ikatan *stretching mode* [7]. Demikian pula panjang gelombang 800 cm^{-1} – 950 cm^{-1} menunjukkan adanya ikatan *bending mode*. Selanjutnya dari Tabel 2 di atas ketebalan lapisan -i lebih didominasi ikatan $(\text{SiH}_2)_n$, sehingga harus difabrikasi kembali lapisan i yang memiliki panjang gelombang 2000 cm^{-1} dan 640 cm^{-1} . Oleh karena itu perlu penerapan konsep dasar Iptek Bahan skala makroskopik untuk memperoleh keterkaitan Pemrosesan (dalam hal ini variabel pemrosesan), Struktur (dalam hal ini ikatan Si-H), Sifat dan Perilaku (dalam hal ini *wave number* 2000 cm^{-1} dan 640 cm^{-1}).

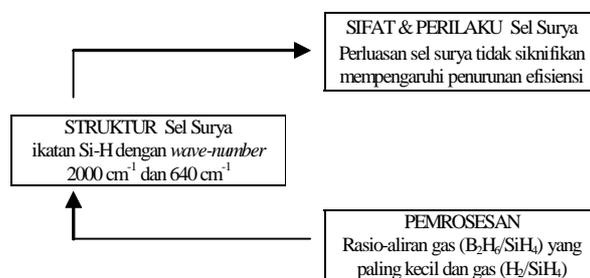
Analisis Lapisan *PECVD* a-Si-H Tipe-i

Dengan penurunan efisiensi cukup signifikan terhadap peningkatan luasan sel menunjukkan adanya ketidakstabilan lapisan, utamanya lapisan-i. Untuk maksud tersebut perlu diperhatikan dalam fabrikasi lapisan-i sebagai berikut :

- Hasil perhitungan kandungan atom Hidrogen menurut persamaan 1 adalah $C_H = 12,51\%$ masih memungkinkan ditingkatkan.

- Perlu mencari rasio aliran gas $(\text{B}_2\text{H}_6/\text{SiH}_4)$ yang paling kecil dan gas $(\text{H}_2/\text{SiH}_4)$ sehingga harga $C_H = 12,51\%$ lapisan-i masih diperkenankan mencapai $C_H = 15\%$, bila perlu fabrikasi lapisan-i dibentuk dengan pertumbuhan lambat.
- Bila lapisan-i yang telah tumbuh didominasi ikatan Si-H dan spektrum *IR* memiliki sifat absorpsi dengan panjang gelombang 2000 cm^{-1} dan 640 cm^{-1} maka variabel pemrosesan lapisan-i ini digunakan pada fabrikasi sel surya struktur p-i-n.
- Bila fabrikasi diatas sifat absorpsi lapisan-i masih belum tercapai maka perlu dilakukan penurunan suhu deposisi $T_d < 275^\circ\text{C}$.

Konsep dasar iptek bahan ditunjukkan pada Gambar 4. dibawah ini diharapkan mampu memfabrikasi sel surya struktur p-i-n dengan luasan 1 cm^2 dan efisiensi sel surya tidak mengalami penurunan signifikan dibanding efisiensi sel surya luasan $0,25\text{ cm}^2$.



Gambar 4. Keterkaitan struktur divais, sifat perilaku sel surya dan pemrosesan.

KESIMPULAN

Dalam makalah ini telah membahas analisis penurunan efisiensi sel surya struktur p-i-n *PECVD* a-Si-H yang disebabkan perluasan sel. Adapun kesimpulan yang merupakan tahapan yang harus dilakukan dalam menganalisis variabel akibat turunnya efisiensi sel surya yang disebabkan perluasan sel sebagai berikut :

1. Metode penganalisisan-kausal komparatif memungkinkan mencari variabel penyebab turunnya efisiensi sel yang mengarah pada sifat absorpsi-optik lapisan-i.
2. Temuan dari Spektrum *IR* bahwa *PECVD* a-Si-H lapisan-i memiliki panjang gelombang 2089 cm^{-1} dan 792 cm^{-1} menunjukkan adanya *dangling bond*.
3. Konsep dasar iptek bahan mampu memberi acuan bahwa pemrosesan lapisan-i harus memperhatikan rasio-aliran gas $(\text{B}_2\text{H}_6/\text{SiH}_4)$ yang paling kecil dan gas $(\text{H}_2/\text{SiH}_4)$ serta besar kandungan atom H diantara $12,51\%$ sampai dengan 15% .

DAFTAR ACUAN

- [1]. ICHIKAWA, Y., et. al., *Solar Energy Material & Solar Cells*, **66** (2001) 107 – 115
- [2]. EDDY Y. DAN AGUNG B. : *Pembuatan Sel-Surya Lapisan-tipis a-Si:H Struktur p-i-n dengan*

Analisis penurunan efisiensi sel surya yang disebabkan perluasan sel pada struktur p-i-n PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) a-Si-H (Agung Budiono)

Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD), Hibah-Bersaing X-Tahun-1 & Tahun-2., Diknas, 2001/2002.

- [3]. MADAN, A., *Amorphous Silikon for Photovoltaic Application, Invited Talk 9th CIMTEC Conference, Florence, Italy, (1998)*
- [4]. HAMAKAWA, Y., *Amorphous Semiconductors Technologies and Devices, Ohmsha, (1982).*
- [5]. HIROSE, Z., *Nikkei Electronics, (1982)*
- [6]. FREEMAN, E.C. and PAUL, W., *Phys. Rev. B, 20* 716-1979
- [7]. LUCOVSKY, G., *Phys. Rev. B, 19*, 2064-1979