

PENUMBUHAN LAPISAN TIPIS SILIKON MIKROKRISTAL TERHIDROGENASI DENGAN TEKNIK HWC-VHF-PECVD

Ida Usman ^{1*)}, Darwin Ismail¹⁾, Heri Sutanto ²⁾ dan Toto Winata ³⁾

¹⁾Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Haluoleo, Kendari
Jl. H.E.A. Mokodompit, Anduonohu, Kendari, Sulawesi Tenggara 93232

²⁾Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Tembalang, Semarang

³⁾Program Studi Fisika FMIPA, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung, Jawa Barat, 40132

^{*)}Penulis korespondensi: idausman1972@gmail.com

Abstrak

Telah dikembangkan teknik HWC-VHF-PECVD (Hot Wire Cell Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) untuk menumbuhkan lapisan tipis silikon mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$). Dari hasil penumbuhan lapisan tipis yang dilakukan, teknik HWC-VHF-PECVD memperlihatkan laju deposisi yang lebih tinggi dibandingkan laju deposisi lapisan tipis yang diperoleh dari teknik PECVD maupun teknik VHF-PECVD konvensional. Berdasarkan hasil pengukuran XRD dan SEM, lapisan yang diperoleh pada temperatur filamen yang rendah masih berstruktur amorf. Indikasi yang mengarah pada pembentukan lapisan tipis berstruktur mikrokrystalin mulai terlihat pada temperatur filamen $\geq 500^\circ\text{C}$, dimana puncak-puncak di fraksi spektrum XRD untuk orientasi kristalin tertentu mulai terbentuk, sejalan dengan pembentukan butiran-butiran kristalin dari hasil foto SEM permukaan lapisan-lapisan tersebut.

Kata kunci: butir kristalin, teknik HWC-VHF-PECVD, $\mu\text{-Si:H}$

Abstract

It has been developed the HWC-VHF-PECVD (Hot Wire Cell Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) technique to growing the hydrogenated microcrystalline silicon ($\mu\text{-Si:H}$) thin film. As results, the deposited silicon thin films by HWC-VHF-PECVD technique show the deposition rate higher than by both conventional PECVD and VHF-PECVD techniques. Based to the XRD and SEM measurement results, the obtained thin films using low filament temperature still showed amorphous material structure yet. The indication that leads to the formation of microcrystalline silicon structure was seen since the filament temperature reach up to 500°C , where the diffraction peaks of XRD spectrum for specific crystal orientation were formed parallel to the formation of crystalline grains from surface SEM image result.

Keywords: crystalline grain, HWC-VHF-PECVD technique, $\mu\text{-Si:H}$

PENDAHULUAN

Lapisan tipis silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) dan silikon mikrokrystal terhidrogenasi ($\mu\text{-Si:H}$) hingga saat ini masih menarik perhatian banyak peneliti, terutama yang memfokuskan kajiannya pada pengembangan divais sel surya lapisan tipis. Energi yang rendah untuk proses penumbuhannya serta kemudahannya untuk ditumbuhkan pada berbagai jenis substrat menjadikan kedua material tersebut sangat menjanjikan untuk aplikasi teknologi biaya murah (Wyrsh *et al*, 2002). Bahkan sel surya lapisan tipis sudah dapat dijumpai dalam bentuk modul dengan harga yang jauh lebih murah dibanding sel surya berbasis silikon kristal. Meskipun demikian, salah satu permasalahan penting yang masih terus dikaji adalah mekanisme degradasi efisiensi konversi

sel surya berbasis a-Si:H setelah disinari dengan intensitas tinggi dalam waktu yang cukup lama, yang biasa dikenal dengan efek Staebler-Wronski (*Staebler-Wronski Effect*, SWE). Kontaminasi hidrogen serta kandungan cacat yang masih tinggi dalam material a-Si:H diketahui sebagai penyebab mekanisme SWE tersebut. Sejumlah peneliti kemudian memfokuskan kajiannya pada pengembangan sel surya berbasis $\mu\text{-Si:H}$. Lapisan tipis $\mu\text{-Si:H}$ diketahui memiliki konduktivitas yang lebih tinggi dan kandungan hidrogen yang lebih rendah dibanding a-Si:H. Dilaporkan bahwa sel surya berbasis $\mu\text{-Si:H}$ memperlihatkan efisiensi konversi yang cukup baik dengan tingkat stabilitas yang cukup tinggi (Nasuno *et al*, 2001; Shah *et al*, 2002).

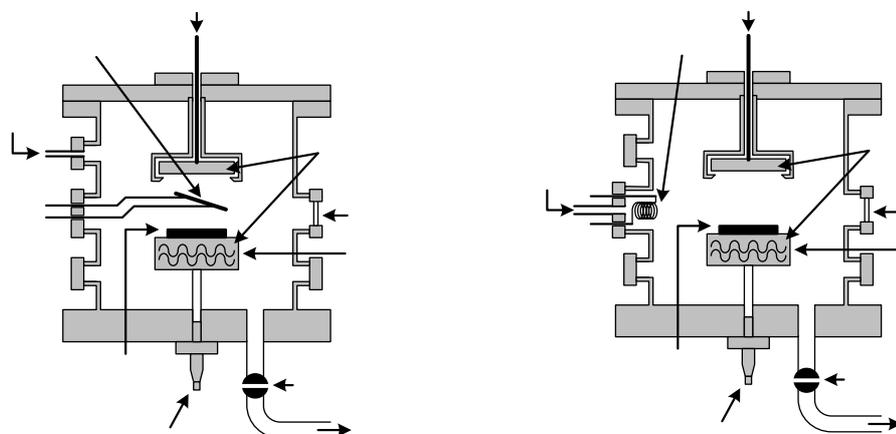
Lapisan tipis $\mu\text{-Si:H}$ dengan homogenitas yang tinggi pada dasarnya dapat ditumbuhkan dengan teknik PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) yang populer digunakan untuk penumbuhan lapisan tipis a-Si:H . Namun demikian, teknik PECVD konvensional yang menggunakan pembangkit daya dalam frekuensi radio (*radio frequency*, rf) 13,56 MHz harus memerlukan tiga kondisi empiris untuk penumbuhan lapisan tipis $\mu\text{-Si:H}$ yaitu temperatur tinggi, daya rf tinggi, dan larutan silan (SiH_4) yang tinggi dalam hidrogen (Kröll *et al*, 1998), sebagaimana dilaporkan pula oleh Ambrosone *et al* (2006) bahwa lapisan tipis $\mu\text{-Si:H}$ dapat ditumbuhkan melalui teknik PECVD konvensional pada daya rf 150 watt. Kondisi ini tentu akan bertentangan dengan upaya pengembangan teknologi biaya murah. Sejumlah peneliti kemudian mengembangkan teknik VHF-PECVD (*Very High Frequency PECVD*) dengan meningkatkan frekuensi eksitasi plasma pada rf 70 MHz. Teknik VHF-PECVD memperlihatkan laju deposisi yang lebih tinggi dan kandungan hidrogen yang lebih rendah dibandingkan dengan teknik PECVD konvensional (Kröll *et al*, 1998; Van Sark *et al*, 1998), bahkan saat ini telah lazim digunakan untuk menumbuhkan lapisan tipis $\mu\text{-Si:H}$ (Fukawa *et al*, 2001; Zhang *et al*, 2005). Meskipun demikian, salah satu kelemahan teknik VHF-PECVD adalah ketidakhomogenan tegangan antar elektroda untuk kasus penumbuhan lapisan pada area yang luas (Takatsuka *et al*, 2004). Pada skala produksi massal sel surya dalam bentuk modul, fenomena tersebut sangat tidak diharapkan.

Teknik lain yang dapat digunakan untuk menumbuhkan lapisan tipis $\mu\text{-Si:H}$ adalah teknik HW-PECVD (*Hot Wire PECVD*). Dalam teknik ini, gas didekomposisi oleh filamen panas dan daya rf yang secara efektif akan meningkatkan laju

dekomposisi gas reaktan (Kumbhar and Kshirsagar, 1996). Meskipun demikian, kehadiran filamen panas secara langsung mempengaruhi temperatur substrat sehingga kestabilan temperatur substrat sulit dipertahankan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dikembangkan teknik *Hot Wire Cell VHF-PECVD* (HWC-VHF-PECVD). Teknik HWC-VHF-PECVD ini diharapkan dapat menanggulangi keterbatasan teknik VHF-PECVD dan HW-PECVD sebagaimana disebutkan di atas. Studi awal tentang penggunaan teknik HWC-VHF-PECVD untuk penumbuhan lapisan tipis telah dilakukan pada penumbuhan lapisan tipis a-Si:H dengan laju deposisi mencapai $3,21 \text{ \AA/det}$ dan telah diaplikasikan pada divais sel surya berbasis a-Si:H dengan efisiensi mencapai 9,39% (Usman, dkk, 2004). Berdasarkan alasan tersebut, penelitian ini diarahkan pada studi tentang pengembangan teknik HWC-VHF-PECVD untuk penumbuhan lapisan tipis $\mu\text{-Si:H}$.

METODE PENELITIAN

Penggunaan filamen (HWC) dan pembangkit daya pada frekuensi yang sangat tinggi (VHF) dalam teknik HWC-VHF-PECVD pada dasarnya mengadopsi kelebihan dari teknik HW-PECVD dan teknik VHF-PECVD. Perbedaan mendasar antara teknik HW-PECVD dan HWC-VHF-PECVD terletak pada penempatan filamen yang berbeda dalam ruang penumbuhan (*chamber*), dimana filamen pada teknik HW-PECVD ditempatkan tepat di atas substrat sedangkan filamen pada teknik HWC-VHF-PECVD ditempatkan jauh dari substrat dan terintegrasi dengan sistem gas masukan, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema posisi penempatan filamen pada teknik HW-PECVD dan teknik HWC-VHF-PECVD

Hal ini dimaksudkan agar temperatur substrat tetap dapat terkontrol dengan baik. Selain itu, gas sumber diharapkan dapat terurai lebih awal oleh filamen sebelum memasuki kawasan elektroda, sehingga ketidakhomogenan tegangan antar elektroda akibat penggunaan VHF diharapkan tidak berpengaruh pada homogenitas lapisan yang dihasilkan.

Dalam penelitian ini digunakan silan (SiH_4) konsentrasi 10% dalam hidrogen sebagai sumber gas dan Corning 7059 sebagai substrat. Studi awal tentang pengembangan teknik HWC-VHF-PECVD untuk penumbuhan lapisan tipis $\mu\text{-Si:H}$ dilakukan dengan memvariasikan temperatur filamen dari keadaan OFF hingga temperatur 800°C . Parameter penumbuhan yang seperti temperatur substrat, daya rf, tekanan chamber, dan laju aliran gas SiH_4 dipertahankan tetap masing-masing 275°C , 8 watt, 100 mTorr, dan 70 sccm.

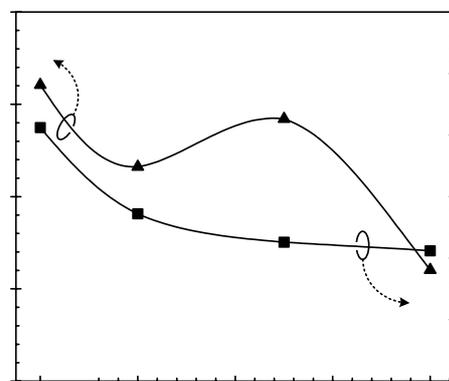
Kualitas dan karakteristik lapisan yang dihasilkan ditentukan berdasarkan hasil pengukuran, masing-masing adalah pengukuran dengan spektrometer *Ultraviolet Visible* (UV-Vis) untuk menentukan ketebalan lapisan dan lebar celah pita optiknya, pengukuran konduktivitas dengan metoda dua titik, pengukuran *X-ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur lapisan yang terbentuk, dan pengukuran *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk melihat struktur permukaan lapisan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penambahan filamen dalam sistem penumbuhan lapisan dimaksudkan untuk mengurai molekul-molekul gas sumber menjadi radikal-radikal bebas. Demikian halnya dengan penambahan filamen dalam sistem reaktor HWC-VHF-PECVD yang dikembangkan dalam penelitian ini. Gas-gas sumber diharapkan dapat terdekomposisi secara termal oleh filamen yang terintegrasi dengan sistem gas masukan sebelum memasuki kawasan elektroda. Kemampuan filamen untuk proses dekomposisi termal tentu bergantung pada temperatur filamen tersebut. Oleh karena itu, temperatur filamen dipandang sebagai salah satu parameter penumbuhan yang memerlukan tahapan optimasi untuk menghasilkan lapisan tipis yang berkualitas baik. Dalam penelitian ini, temperatur filamen divariasikan melalui variasi tegangan filamen antara 0-4,5 volt. Perubahan tegangan filamen tersebut mengakibatkan perubahan temperaturnya dari keadaan OFF hingga temperatur 800°C .

Gambar 2 memperlihatkan laju deposisi dan celah pita optik lapisan tipis yang dihasilkan. Terlihat bahwa laju deposisi lapisan a-Si:H mengalami penurunan dari $3,21 \text{ \AA/det}$ pada filamen OFF (tegangan 0 volt) menjadi $2,32 \text{ \AA/det}$ pada temperatur filamen 200°C . Diduga bahwa pada temperatur filamen 200°C , molekul-molekul gas belum terurai secara efektif pada permukaan filamen sehingga semua radikal yang dihasilkan masih memungkinkan untuk bergabung kembali dengan radikal yang lain

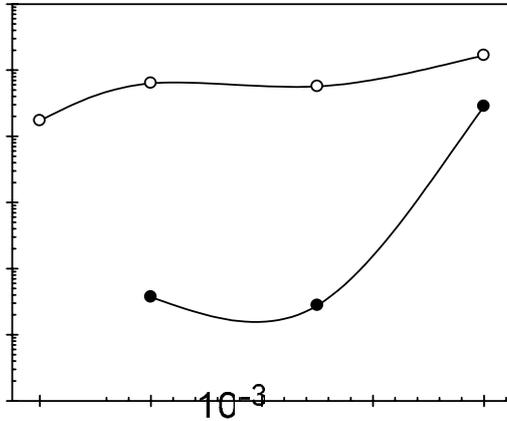
membentuk molekul-molekul sekunder sebelum memasuki kawasan elektroda. Molekul sekunder tersebut lebih mudah diuraikan kembali oleh tumbukan elektron yang dipercepat dari medan listrik daripada molekul primernya. Dugaan tersebut diperkuat oleh penurunan kandungan hidrogen dalam lapisan yang dihasilkan, yang ditandai dengan penurunan celah pita optik dari 1,8 eV pada filamen OFF menjadi 1,73 eV pada temperatur filamen 200°C . Laju deposisi lapisan kemudian meningkat dari $2,32 \text{ \AA/det}$ menjadi $2,84 \text{ \AA/det}$ ketika temperatur filamen dinaikkan dari 200°C menjadi 500°C . Dengan keadaan ini, efektivitas dekomposisi molekul gas oleh filamen menjadi radikal-radikal mulai terlihat, sehingga proses penumbuhan lapisan mulai berlangsung lebih cepat dan struktur lapisan yang dihasilkan semakin baik. Namun demikian, efektivitas dekomposisi tersebut tidak selamanya bermanfaat ketika temperatur terus dinaikkan. Hal ini terlihat dengan jelas pada Gambar 2, dimana laju deposisi mulai mengalami penurunan ketika temperatur filamen ditingkatkan dari 500°C menjadi 800°C . Meskipun plasma didominasi oleh radikal-radikal yang lebih sederhana, efek tumbukan elektron yang dipercepat oleh medan listrik dari daya rf mengakibatkan terciptanya radikal-radikal ionik. Diketahui bahwa radikal ionik justru akan berkelakuan sebagai *chemical etching* sehingga dapat menurunkan laju deposisi lapisan. Demikian halnya dengan struktur lapisan yang terbentuk, juga akan terpengaruh oleh kehadiran radikal-radikal ionik dalam plasma.



Gambar 2. Laju deposisi dan celah pita optik lapisan tipis silikon terhidrogenasi yang dihasilkan dari teknik HWC-VHF-PECVD pada variasi temperatur filamen

Secara umum, peningkatan temperatur filamen dapat menurunkan laju deposisi lapisan yang diperoleh. Fenomena tentang penurunan laju deposisi tersebut di atas dapat pula dianalisa berdasarkan nilai konduktivitas gelapnya. Gambar 3 memperlihatkan konduktivitas lapisan yang diperoleh cenderung mengalami peningkatan dengan meningkatnya temperatur filamen. Penurunan celah pita optik yang didukung oleh peningkatan nilai konduktivitas ketika

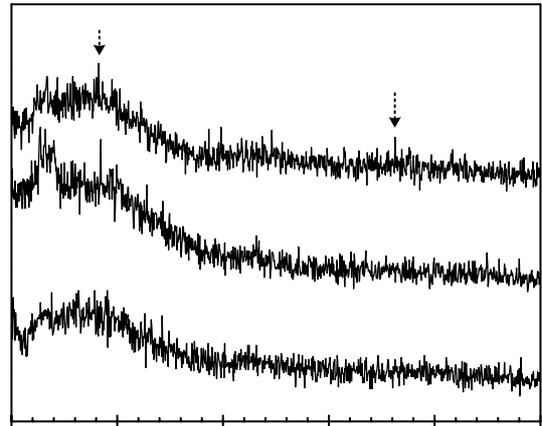
temperatur filamen dinaikkan memberi indikasi yang mengarah pada perbaikan struktur lapisan yang terbentuk. Bahkan konduktivitas gelap lapisan yang diperoleh pada temperatur filamen 800°C telah mencapai $2,83 \times 10^{-5}$ S/cm.



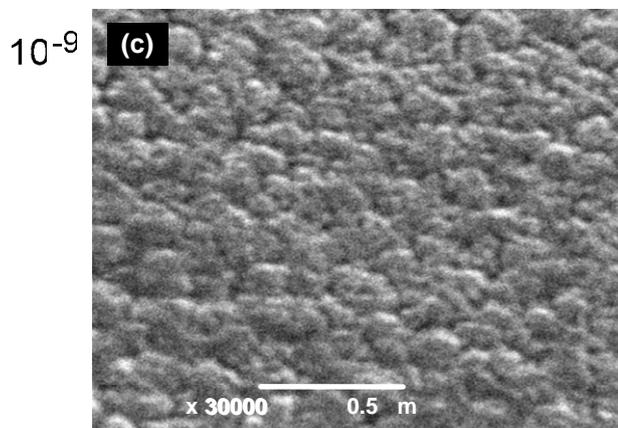
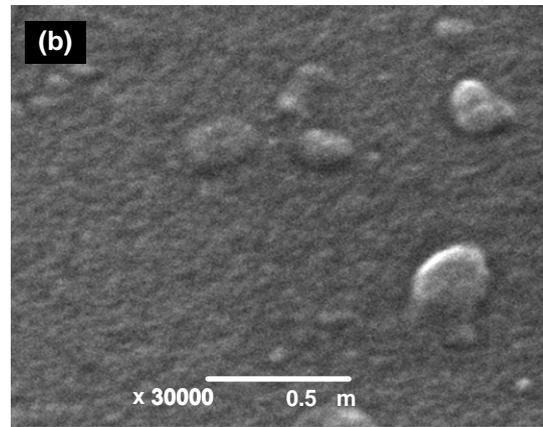
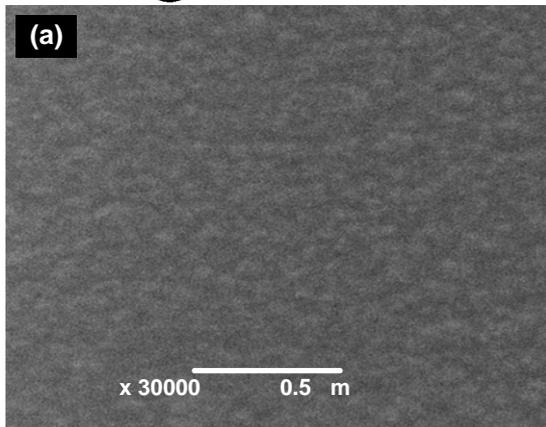
Gambar 3. Konduktivitas lapisan tipis silikon terhidrogenasi yang dihasilkan dari teknik HWC-VHF-PECVD pada variasi temperatur filamen

Konduktivitas gelap seperti ini lazim dimiliki oleh lapisan silikon terhidrogenasi yang berstruktur

mikrokristalin (Unold *et al*, 2000; Smirnov *et al*, 2004; Brüggemann *et al*, 2004).



Gambar 4. Spektrum XRD lapisan tipis silikon terhidrogenasi yang dihasilkan dari teknik HWC-VHF-PECVD pada variasi temperatur filamen



600 800
filamen (°C)

Gambar 5. Foto SEM permukaan lapisan tipis silikon terhidrogenasi yang dihasilkan dari teknik HWC-VHF-PECVD pada temperatur filamen: (a) 200°C, (b) 500°C, dan (c) 800°C

Untuk membuktikan dugaan tersebut maka dilakukan pengukuran XRD. Gambar 4 memperlihatkan hasil pengukuran XRD lapisan tipis silikon terhidrogenasi yang diperoleh. Terlihat bahwa peningkatan temperatur filamen dapat memperbaiki struktur lapisan a-Si:H yang terbentuk. Indikasi yang mengarah pada pembentukan struktur mikrokristalin untuk orientasi kristal silikon (111) dan (311) bahkan mulai terlihat pada temperatur filamen 500°C dan 800°C.

Hal ini dapat pula dilihat dari foto SEM permukaan lapisan-lapisan tersebut seperti diperlihatkan pada Gambar 5. Lapisan yang ditumbuhkan pada temperatur filamen 200°C (Gambar 5(a)) terlihat homogen dengan butir kristalin yang belum terbentuk dengan baik sehingga lapisan tersebut masih berfasa amorf. Perubahan struktur lapisan ke fasa mikrokristalin mulai terlihat saat penumbuhan dilakukan pada temperatur filamen 500°C (Gambar 5(b)) dimana butiran kristalin mulai terbentuk. Fasa mikrokristalin mulai nampak dominan pada temperatur filamen 800°C (Gambar 5(c)), dimana ukuran butir (*grain size*) maupun batas butir (*grain boundary*) sudah terbentuk dengan baik.

Meskipun puncak difraksi yang terbentuk dari hasil pengukuran XRD belum memperlihatkan intensitas yang cukup tinggi, pembentukan butiran-butiran kristalin yang tampak dari hasil pengukuran SEM memberi keyakinan bahwa teknik HWC-VHF-PECVD yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat digunakan untuk penumbuhan lapisan tipis $\mu\text{-Si:H}$.

KESIMPULAN

Dari hasil penumbuhan lapisan tipis yang dilakukan secara umum terlihat bahwa pada kondisi penumbuhan yang sama, teknik HWC-VHF-PECVD memiliki laju deposisi yang lebih tinggi (3,2 Å/det) dibandingkan laju deposisi lapisan tipis yang diperoleh dari teknik PECVD konvensional (<1 Å/det) (Malago, 2002) maupun teknik VHF-PECVD konvensional (2,2 Å/det) (Usman, 2001). Namun demikian, peningkatan temperatur filamen mengakibatkan laju deposisi lapisan mengalami penurunan sebagai akibat mekanisme penguraian gas secara termal oleh temperatur filamen sehingga struktur lapisan yang diperoleh semakin baik. Pada temperatur filamen yang rendah, lapisan yang diperoleh masih berstruktur amorf. Indikasi yang mengarah pada pembentukan lapisan tipis berstruktur mikrokristalin mulai terlihat pada temperatur filamen $\geq 500^\circ\text{C}$, dimana puncak-puncak difraksi spektrum XRD untuk orientasi kristalin (111) dan (311) mulai terbentuk, yang diperkuat oleh foto SEM permukaan lapisan-lapisan tersebut. Bahkan konduktivitas gelap lapisan tipis yang diperoleh pada temperatur filamen 800°C telah mencapai orde 10^{-5} S/cm, suatu nilai konduktivitas gelap yang lazim dimiliki oleh lapisan tipis silikon terhidrogenasi berstruktur mikrokristalin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ketua Kelompok Keahlian Fisika Material Elektronik Institut Teknologi Bandung atas perizinan penggunaan fasilitas reaktor PECVD dan instrumen pengukuran konduktivitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambrosone, G., Coscia, U., Lettieri, S., Maddalena, P., Ambrico, M., Perna, G., and Minarini, C., (2006), Microcrystalline silicon thin films grown at high deposition rate by PECVD, *Thin Solid Films*, 511-512, pp. 280-284.
- Brüggemann, R., Brehme, S., Kleider, J.P., Gueunier, M.E., and Bronner, W., (2004), Effects of proton irradiation on the photoelectric properties of microcrystalline silicon, *J. Non-Crys. Solids*, 338-340, pp. 477-480.
- Fukawa, M., Suzuki, S., Guo, L., Kondo, M., and Matsuda, A., (2001), High rate growth of microcrystalline silicon using a high pressure depletion method with VHF plasma, *Sol. Energy Mater. & Solar Cells*, 66, pp. 217-223.
- Kröll, U., Meier, J., Torres, P., Pohl, J., and Shah, A., (1998), From amorphous to microcrystalline silicon films prepared by hydrogen dilution using the VHF-GD technique, *J. Non-Crys. Solids*, 227-230, pp. 68-71.
- Kumbhar, A.A. and Kshirsagar, S.T., (1996), Comparative study of properties of a-Si:H films produced by hot-filament CVD, glow discharge CVD and Their Hybrid Version, *Thin Solid Films*, 283, pp. 49-56.
- Malago, J.D., (2002), Pengembangan lapisan tipis silikon amorf dan paduannya untuk aplikasi divais elektronik dengan teknik plasma enhanced chemical vapor deposition, *Disertasi Doktor*, Institut Teknologi Bandung.
- Nasuno, Y., Kondo, M., and Matsuda, A., (2001), Effect of substrate surface morphology on microcrystalline silicon solar cells, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40, pp. L303-L305.
- Shah, A., Meier, J., Vallat-Sauvain, E., Droz, C., Kroll, U., Wyrsh, N., Guillet, J., and Graf, U., (2002), Microcrystalline silicon and 'micromorph' tandem solar cells, *Thin Solid Films*, 403-404, pp. 179-187.
- Smirnov, V., Reynolds, S., Main, C., Finger, F., and Carius, R., (2004), Aging effects in microcrystalline silicon films studied by transient photoconductivity, *J. Non-Crys. Solids*, 338-340, pp. 421-424.

Takatsuka, H., Noda, M., Yonekura, Y., Takeuchi, Y., and Yamauchi, Y., (2004), Development of high efficiency large area silicon thin film Modules using VHF-PECVD, *Solar Energy*, 77, pp. 951-954.

Unold, T., Brüggemann, R., Kleider, J.P., and Longeaud, C., (2000), Anisotropy in the transport of microcrystalline silicon, *J. Non-Crys. Solids*, 266-269, pp. 325-330.

Usman, I. (2001), Fabrikasi divais sel surya berbasis $\mu\text{c-Si:H}$ dengan Teknik VHF-PECVD, *Tesis Magister*, Institut Teknologi Bandung.

Usman, I., Supu, A., Mursal, Sukirno, Winata, T., and Barmawi, M., (2004), High Deposition Rate of a-Si:H by using Home Made VHF-PECVD Method and its Application to p-i-n Solar Cell, *Asian J. Energy and Environ.*, 5(2), pp. 151.

Van Sark, W.G.J.H.M., Bezemer, J., and Van der Weg, W.F. (1998), VHF a-Si:H solar cell: a systematic material and cell study, *J. Mater. Res.*, 13(1), pp. 45-52.

Wyrsh, N., Feitknecht, L., Droz, C., Torres, P., Shah, A., Poruba, A., and Vanecek, M., (2002), Hydrogenated microcrystalline silicon: how to correlate layer properties and solar cell performance, *J. of Non-Cryst. Solids*, 266-269, pp. 1099-1103.

Zhang, X., Zhao, Y., Zhu, F., Wei, C., Wu, C., Gao, Y., Sun, J., Hou, G., Geng, X., and Xiong, S., (2005), A combinatorial analysis of deposition parameters and substrates on performance of $\mu\text{c-Si:H}$ thin films by VHF-PECVD, *Appl. Surface Sci.*, 245(1-4), pp. 1-5.