

DEPOSISI LAPISAN a-Si:H:B PADA LAPISAN TIPIS Ag DENGAN SPUTTERING DC UNTUK BAHAN SEL SURYA

Bambang Siswanto, Wirjoadi, Trimardji Atmono

Puslitbang Teknologi Maju Batan Yogyakarta

ABSTRAK

DEPOSISI LAPISAN a-Si:H:B PADA LAPISAN TIPIS Ag DENGAN SPUTTERING DC UNTUK BAHAN SEL SURYA. Telah dilakukan deposisi lapisan a-Si:H:B pada lapisan tipis Ag dengan teknik plasma sputtering DC. Proses deposisi dilakukan untuk beberapa parameter plasma yang meliputi: waktu deposisi, tekanan gas dan suhu substrat dengan tujuan dapat diperoleh beberapa lapisan tipis Ag/a-Si:H:B yang mempunyai sifat listrik yang baik. Variasi waktu deposisi (0,5 s/d 2 jam), tekanan gas (1,1 s/d $1,4 \times 10^{-1}$ Torr) dan suhu substrat (150 s/d 300 °C), sedangkan aliran gas reaktif hidrogen ditetapkan sebesar 4 sccm. Target dari bahan silikon yang telah dicampur boron dengan konsentrasi berat (0,02, 0,06, 0,10, 0,14 g). Pengukuran sifat listrik dilakukan dengan menggunakan probe empat titik dan konduktivitas dihitung dengan pendekatan rumus matematik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai resistansi terkecil sebesar 1950 Ω diperoleh untuk lapisan tipis Ag/a-Si:H:B yang dideposisikan pada kondisi percobaan, waktu deposisi 1,5 jam, tekanan gas $1,3 \times 10^{-1}$ Torr and suhu substrat 200 °C dengan konsentrasi berat boron 0,6g. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa parameter tersebut diatas merupakan parameter deposisi yang optimum dalam pembuatan lapisan a-Si:H:B pada lapisan tipis Ag.

Kata kunci: Sputtering, lapisan tipis, resistansi

ABSTRACT

DEPOSITION OF a-Si:H:B LAYER ON THE Ag THIN FILM BY DC SPUTTERING FOR SOLAR CELL MATERIAL. a-Si:H:B layers have been deposited on the Ag thin film using plasma DC sputtering technique. The deposition process were performed with the following process parameters: the deposition time, gas pressure and substrate temperature with the aim to obtain a good electrical properties of Ag/a-Si:H:B thin films. Variations of deposition time were 0.5 to 2 hour, gas pressure 1.1 to 1.4×10^{-1} Torr and substrate temperature 150 to 300°C, while the flow rate of the reaktif hydrogen was kept at 4 sccm. The targets of silicon material were mixed with boron by weight concentration of (0,02, 0,06, 0,10, 0,14 g). The electrical properties measurement has been done by four point probes and the conductance was calculated using mathematic formulation. The results indicate that the minimum resistance of Ag/a-Si:H:B thin film was $R = 1950 \Omega$, this was found at condition deposition time 1.5 hour, gas pressure 1.3×10^{-1} Torr and substrate temperature 200°C with 0,6 g of boron concentration. It could be concluded that the process parameter above is an optimum parameter for depositing of the a-Si:H:B layer on the Ag thin film.

Key word : Sputtering, thin film, resistance

PENDAHULUAN

Pembuatan lapisan tipis multi layer telah lama dilakukan baik untuk penelitian dasar maupun aplikasinya, sebagai contoh untuk bahan sensor gas, sensor magnet, alat-alat elektronik maupun sel surya. Banyak

ragam sel surya berstruktur multi lapisan semikonduktor diantaranya MIS, CIS, EIS, SIS dan sebagainya. Dalam hal ini dilakukan optimasi lapisan Ag/a-Si:H:B yang merupakan bahan sel surya berbasis *amorphous silicon*. Biasanya jaringan silikon amorf yang terbentuk banyak lengan-lengan kosong (*dangling bonds*),

sehingga untuk mengisi lengan-lengan kosong tersebut pada waktu deposisi ditambahkan gas reaktif hidrogen. Sebagai akibatnya tingkat energi fermi akan tergeser ke arah pita valensi atau pita konduksi sehingga konduktivitas lapisan a-Si:H dapat dikontrol.^[1,2]

Penelitian mengenai sel surya terutama untuk meningkatkan efisiensi dari sel surya dengan mengoptimalkan kualitas lapisan tipis pada bagian semikonduktor *pin* sel surya, sedangkan konsentrasi dopan Boron atau Fosfor sangat mempengaruhi konduktivitas lapisan tipis tipe p atau tipe n yang terbentuk.^[3,4] Efisiensi dari sel surya dapat ditingkatkan jika kualitas pada pembuatan lapisan tipis semikonduktor *pin* ini baik. Seperti yang dilakukan Joohun Koh dkk., dalam penumbuhan a-Si:H dan c-Si:H dan telah dicapai efisiensi sebesar 9,47 % dengan mengoptimalkan bagian semikonduktor dari susunan sel surya.^[5] Sedangkan Meier dkk., telah melakukan deposisi dengan metode CVD dengan mengoptimalkan parameter deposisi.^[6]

Pada teknik ini target Ag dideposisikan pada substrat kaca tanpa gas reaktif hidrogen, dan untuk selanjutnya digunakan sebagai bahan substrat lapisan tipis Ag, kemudian bahan Si:B dideposisikan di atas substrat lapisan tipis Ag tersebut. Pada proses deposisi Ag maupun Si:B dilakukan didalam ruang vakum dan gas sputter Argon bersama hidrogen diionkan dengan tegangan tinggi DC, sehingga ion-ion argon membombardir target yang mengakibatkan atom-atom target terlepas dan terdeposit pada permukaan substrat.^[7,8] Jumlah bahan target yang tersputter dan kemudian terdeposit pada satuan luas permukaan substrat adalah,

$$W_0 = \frac{k_t W_0}{pd} \quad (1)$$

dan laju deposisi R ($\text{\AA}/\text{min.cm}^2$) dapat dituliskan dalam persamaan :

$$R = \frac{W}{t} \quad (2)$$

dengan k_t adalah suatu konstanta yang tergantung pada bentuk/geometri elektroda, W_0 adalah jumlah partikel yang tersputter per satuan luasan target, p adalah tekanan gas

lucutan (Torr), d adalah jarak elektroda (cm), W adalah rapat lapisan yang tersputter ($\text{\AA}/\text{cm}^2$), dan t adalah waktu *sputter*. Jumlah partikel yang tersputter per satuan luasan target dituliskan dalam bentuk persamaan :

$$W_0 = \frac{j_+}{e} St \frac{A}{N} \quad (3)$$

dengan j_+ adalah rapat arus ion pada target (katoda), e adalah muatan elektron, S adalah *sputter yield*, A adalah berat atom dari bahan target yang tersputter, dan N adalah bilangan Avogadro.

Berdasarkan rumusan-rumusan di atas terlihat bahwa kualitas dan sifat-sifat lapisan tipis yang terdeposit pada permukaan substrat bergantung pada beberapa parameter sputtering antara lain: tekanan gas, waktu deposisi, suhu substrat, jarak elektrode, daya dan faktor geometri sistem elektrodanya^[8]. Interaksi ion-ion energi tinggi dengan atom-atom sasaran menyebabkan tersputternya atom-atom target dan juga bergesernya atom-atom sasaran dari posisi awalnya sehingga terbentuk kekosongan (*vacancies*). Atom-atom target yang tersputter bertumbukan dengan molekul-molekul gas dan akhirnya tersebar pada permukaan substrat karena tekanan gas sangat tinggi dan jalan bebas rata-rata dari partikel-partikel yang tersputter kurang dari jarak elektroda. Dengan berjalannya waktu deposisi maka ion-ion target yang terhambur akan menempati ruang kosong di sekitarnya secara sisipan (*interstition*) dan masuk ke dalam permukaan substrat secara difusi.

TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa tahapan yang meliputi, preparasi cuplikan dan persiapan target, proses pendeposisian dan karakterisasi hasil deposisi.

Preparasi Cuplikan dan Persiapan Target

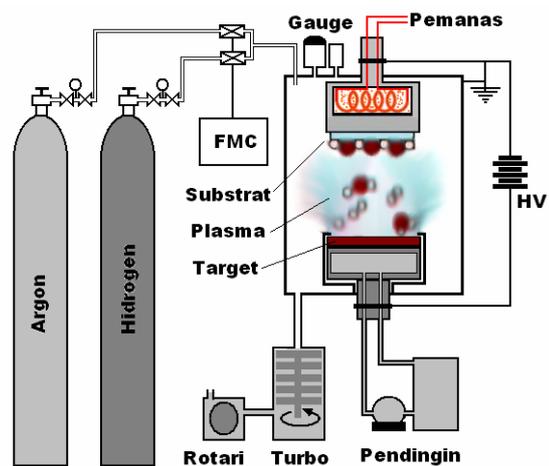
Bahan utama yang disiapkan dalam percobaan ini adalah substrat yang terbuat dari bahan kaca preparat yang dipotong dengan ukuran $10 \times 20 \text{ mm}^2$, kemudian dihaluskan bekas potongannya menggunakan kertas abrasif.

Langkah selanjutnya pencucian substrat secara berturut-turut; pertama dengan air deterjen untuk menghilangkan adanya kontaminasi senyawa organik maupun non organik pada permukaan substrat yang mungkin timbul pada pengerjaan sebelumnya, lalu dengan air bersih dan alkohol dalam *ultrasonic cleaner*, kemudian dikeringkan dalam oven dan selanjutnya dibungkus dengan kertas tisu lalu dimasukkan ke dalam kantong plastik untuk menghindarkan kontaminasi dengan udara luar. Sedangkan target dari bahan silikon yang dicampur dopan boron dengan konsentrasi berat (0,02, 0,06, 0,10, 0,14 g), dipress dalam cetakan dengan ukuran diameter 60 mm tebal 3 mm, lalu dipanaskan untuk perbaikan kristalisasi bahan target.

Proses Deposisi Lapisan Tipis Ag/a-Si:H:B

Peralatan utama sistem deposisi yang digunakan adalah plasma sputtering DC dengan komponen utama yang terdiri dari: tabung reaktor plasma, sistem elektrode (sepasang elektrode yang dipasang sejajar, satu sebagai tempat substrat dan yang satu sebagai tempat target), sistem catu daya tegangan tinggi DC, sistem vakum Turbo molecular dan rotari yang dilengkapi dengan sistem meter vakum, sistem pendingin target, pemanas substrat dan sistem aliran gas ke tabung plasma. Dalam proses deposisi, substrat dan target diletakkan pada elektrode di dalam tabung reaktor seperti terlihat pada Gambar 1, lalu dihampakan dengan sistem vakum rotari dan turbo, selanjutnya sistem pemanas dan sistem pengontrol aliran gas diatur sesuai parameter yang dikehendaki, kemudian catu daya tegangan tinggi DC dihidupkan sampai gas argon dan gas reaktif hidrogen dalam tabung reaktor terionisasi. Peralatan tersebut disusun menjadi suatu sistem deposisi dengan teknik plasma sputtering DC, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada penelitian ini eksperimen dilakukan menggunakan target Ag yang dideposisikan pada substrat kaca tanpa gas reaktif hidrogen, kemudian target Si:B dideposisikan diatas lapisan tipis Ag dengan beberapa variasi parameter proses sputtering, yaitu : waktu deposisi (0,5, 1, 1,5, 2 jam), tekanan gas ($1,1 \times 10^{-1}$, $1,2 \times 10^{-1}$, $1,3 \times 10^{-1}$, $1,4 \times 10^{-1}$), suhu substrat (150, 200, 250, 300 °C) dan berat dopan boron (0,02, 0,06, 0,10, 0,14 g).



Gambar 1. Skema Peralatan Plasma Sputtering DC.

Pengukuran Resistivitas Lapisan Tipis Ag/a-Si:H:B

Untuk membuat piranti elektronika satu diantara beberapa sifat yang penting dalam suatu semikonduktor adalah resistivitas. Untuk mengukur resistivitas pada lapisan tipis dapat digunakan metode probe empat titik. Suatu jajaran empat probe diletakkan diatas lapisan tipis yang akan diukur resistivitasnya. Kemudian sumber tegangan dipasang pada dua probe terluar untuk menghasilkan arus diantara probe dalam. Dengan demikian pada probe bagian dalam akan timbul tegangan. Hasil yang telah didapat dianalisa berdasarkan hukum ohm, dalam hal ini bila lapisan tipis yang diukur mempunyai ukuran yang tidak terbatas atau bila tebalnya cukup besar dibandingkan dengan jarak antar probe resistivitasnya dapat didekati dengan persamaan^[9] :

$$\rho = \frac{\pi V}{I \ln 2} \quad (4)$$

Tetapi bila tebal lapisannya lebih kecil dari jarak antar probe maka persamaan menjadi seperti persamaan^[9] :

$$\rho = \frac{\pi V t}{I \ln 2} \quad (5)$$

dimana t = tebal lapisan tipis, V = tegangan dan I = Arus.

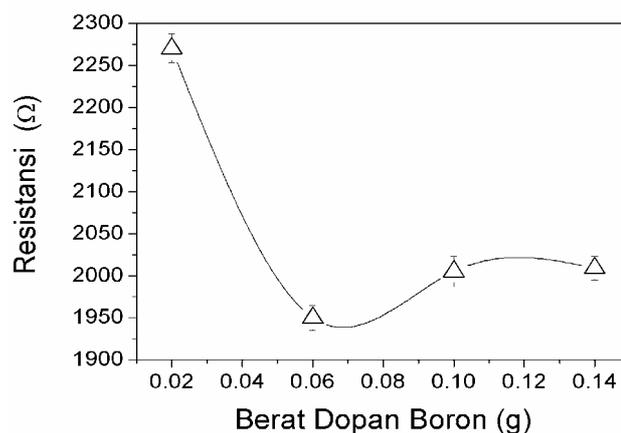
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 menunjukkan grafik hasil pengukuran resistansi dengan variasi berat dopan Boron pada tekanan gas $1,3 \times 10^{-1}$ Torr, suhu substrat 200°C , waktu deposisi 1,5 jam. Dari gambar tersebut terlihat bahwa diperoleh berbagai nilai pengukuran resistansi lapisan tipis Ag/a-Si:H:B hasil deposisi. Untuk target dengan konsentrasi berat dopan Boron 0,02 g, diperoleh nilai resistansi lapisan tipis sebesar 2270Ω , sedangkan lapisan tipis terdeposit dari target dengan berat dopan Boron 0,06 g nilai resistansi menurun menjadi lebih rendah yaitu 1950Ω .

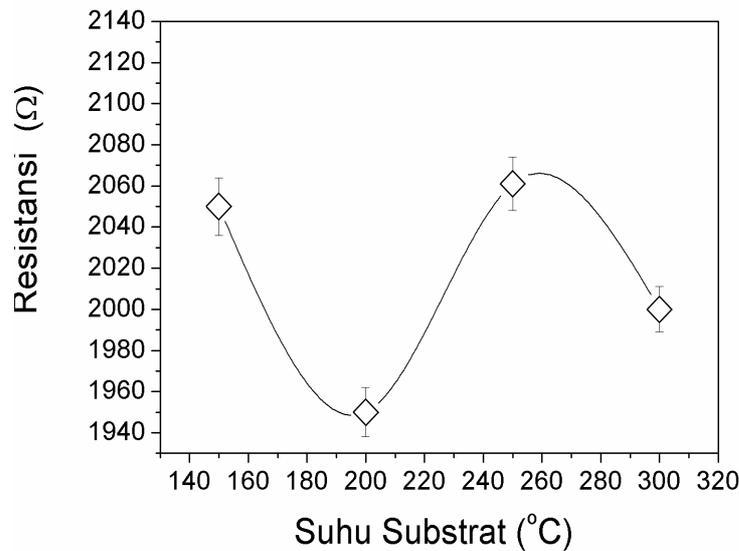
Pada target dengan konsentrasi berat dopan boron 0,10 g dan 0,14 g diperoleh nilai hasil pengukuran resistansi masing-masing sebesar 2005Ω dan 2009Ω , maka ini terjadi peningkatan lagi jika dibandingkan konsentrasi dopan 0,06 g. Dari kurva tersebut dapat menggambarkan bahwa pada konsentrasi dopan boron yang sangat rendah sekitar 0,02 g maka sifat dopannya belum mampu menggeser tingkat energi Fermi (*Fermi level*) ke arah pita valensi maupun pita konduksi, namun sebagai lapisan semikonduktor nilai resistansinya cukup rendah. Hal ini disebabkan pengaruh dari lapisan tipis Ag, karena besar kemungkinan terjadi penyisipan partikel-partikel semikonduktor a-Si:H:B ke dalam lapisan Ag.

Pada konsentrasi berat dopan boron yang lainnya (0,06; 0,10 dan 0,14 g) data menunjukkan penurunan hasil pengukuran resistansi sekitar orde 2000Ω , ini membuktikan bahwa efek dopan menyebabkan bergesernya tingkat energi Fermi ke arah pita valensi maupun pita konduksi dan sebagai akibatnya nilai resistansi dari lapisannya juga berubah. Namun dalam hal ini selain pengaruh dari bahan *doping*, penurunan nilai resistansi juga disebabkan oleh kualitas hasil deposisi maupun kualitas dari target yang digunakan.

Gambar 3 menunjukkan grafik nilai pengukuran resistansi dengan variasi suhu substrat pada tekanan gas $1,3 \times 10^{-1}$ Torr, waktu deposisi 1,5 jam dan berat dopan Boron 0,06 g. Pada suhu substrat 150°C diperoleh lapisan tipis Ag/a-Si:H:B dengan resistansi sebesar 2050Ω , dan setelah suhu substrat dinaikkan menjadi 200°C maka nilai resistansi dari lapisan tipis Ag/a-Si:H:B terus menurun hingga mencapai nilai minimum sebesar 1950Ω , hal ini karena suhu pemanasan substrat akan menyebabkan bergetarnya atom-atom pada permukaan substrat dan akibatnya jarak antar bidang merenggang sehingga akan mempermudah terjadinya penyisipan partikel tersputter. Dengan demikian atom-atom target tersputter dengan sepenuhnya mengisi rongga-rongga yang terbentuk akibat pemanasan substrat, sehingga hasil lapisan deposisi sangat rapat dan resistansinya rendah.



Gambar 2. Grafik hasil pengukuran resistansi dengan variasi berat dopan Boron pada tekanan gas $1,3 \times 10^{-1}$ Torr, suhu substrat 200°C dan waktu deposisi 1,5 jam.



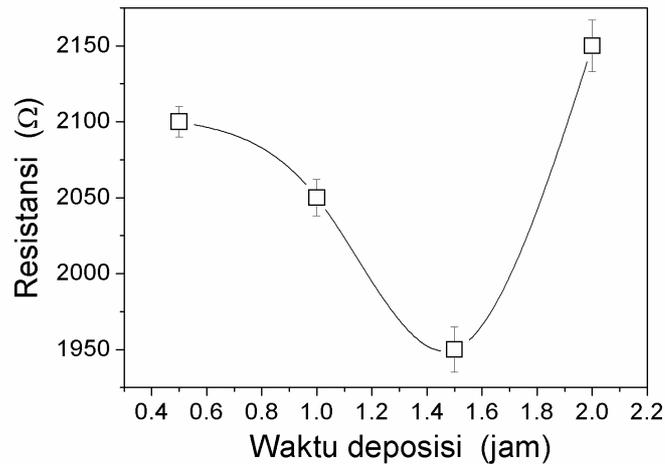
Gambar 3. Grafik hasil pengukuran resistansi dengan variasi suhu substrat pada tekanan gas $1,3 \times 10^{-1}$ Torr, waktu deposisi 1,5 jam dan berat dopan Boron 0,06 g.

Jika suhu substrat dinaikkan terus, maka yang terjadi atom-atom target yang tersputter terus menyisip ke permukaan substrat, dan akibatnya ketebalan lapisan juga meningkat dan resistansinya menurun hingga mencapai nilai yang minimum. Nilai resistansi dari lapisan tipis yang terbentuk akan meningkat lagi jika suhu substrat dinaikkan melebihi nilai optimumnya. Hal ini diakibatkan karena terjadinya penumpukkan atom-atom target tersputter pada permukaan substrat dengan kondisi lapisan yang tidak rapat/porous. Tetapi terlihat pula dalam kurva pada Gambar 3 untuk suhu substrat 250 °C nilai dari resistansinya juga menurun lagi, ini mungkin diakibatkan oleh kualitas permukaan lapisan tipis yang terbentuk pada proses deposisi sangat rendah dan juga dikarenakan bahwa kestabilan suhu substrat sangat sulit dipertahankan selama proses deposisi terutama pada suhu di atas suhu substrat 200°C.

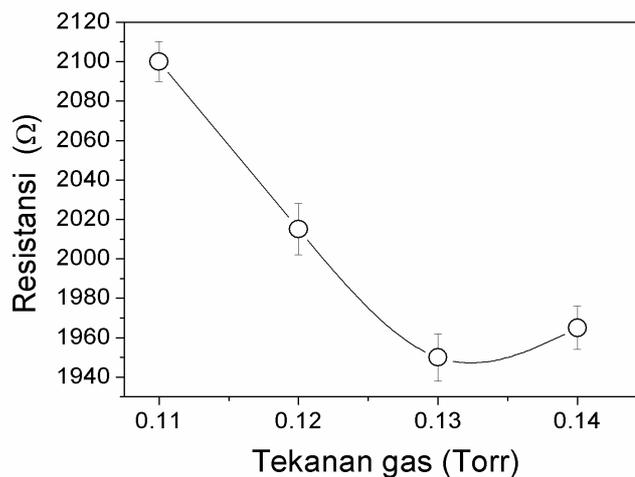
Gambar 4 menunjukkan grafik hasil pengukuran resistansi dengan variasi waktu deposisi, pada tekanan gas 13×10^{-1} Torr, suhu substrat 200 °C dan berat dopan Boron 0,06 g. Dari gambar tersebut terlihat bahwa nilai resistansi terkecil untuk lapisan tipis Ag/a-Si:H:B pada waktu deposisi 1,5 jam yaitu

sebesar 1950 Ω, ini merupakan parameter proses deposisi yang optimum untuk variasi waktu deposisi. Sedangkan untuk waktu deposisi dibawah 1,5 jam maka nilai resistansi lapisan tipis tersebut lebih tinggi dari nilai resistansi yang diperoleh pada kondisi optimumnya, hal ini terjadi karena jumlah partikel tersputter belum mampu terdeposisi pada permukaan substrat sehingga hasil lapisan masih sangat tipis bahkan kualitasnya masih rendah dan akibatnya resistansinya masih tinggi.

Pada waktu deposisi selama 2 jam diperoleh nilai resistansi lapisan tipis yang lebih tinggi dari pada waktu deposisi selama 1,5 jam, dalam masalah ini terjadi karena bertambahnya waktu deposisi mengakibatkan jumlah partikel yang tersputter per satuan luas akan meningkat pula dan kebolehjadian atom-atom target terdeposit pada permukaan substrat akan semakin besar. Dengan demikian sebagai akibatnya bahwa lapisan tipis yang terbentuk juga bertambah tebal dengan berjalannya waktu deposisi, namun karena kualitas dari lapisan yang terbentuk kemungkinan menjadi rendah sehingga menyebabkan nilai resistansinya meningkat.



Gambar 4. Grafik hasil pengukuran resistansi dengan variasi waktu deposisi pada tekanan gas 1.3×10^{-1} Torr, suhu substrat 200°C dan berat dopan Boron 0,06 g.



Gambar 5. Grafik hasil pengukuran resistansi dengan variasi tekanan gas pada waktu deposisi 1,5 jam, suhu substrat 200°C dan berat dopan Boron 0,06 g.

Gambar 5 menunjukkan grafik hasil pengukuran resistansi dengan variasi tekanan gas pada waktu deposisi 1,5 jam, suhu substrat 200°C dan berat dopan Boron 0,06 g. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada tekanan gas $1,1 \times 10^{-1}$ Torr diperoleh hasil pengukuran nilai resistansi dari hasil deposisi Ag/a-Si:H:B sebesar 2100Ω . Jika tekanan gas dinaikkan

maka diperoleh nilai resistansi yang menurun pula hingga mencapai resistansi yang minimum untuk variasi tekanan sebesar 1950Ω pada tekanan $1,3 \times 10^{-1}$ Torr. Pada tekanan di bawah tekanan optimum maka hasil pengukuran resistansi masih lebih tinggi dibandingkan pada kondisi optimum, hal ini disebabkan karena pada kondisi tersebut rapat plasma yang

terbentuk belum optimum sehingga atom-atom hasil sputernya belum sepenuhnya terdepositasi pada substrat.

Jika tekanan gas dinaikkan lagi menjadi $1,4 \times 10^{-1}$ Torr maka diperoleh nilai resistansi yang lebih besar lagi yaitu sebesar 1965Ω dari pada kondisi optimumnya, hal itu terjadi karena parameter tekanan gas dapat mempengaruhi rapat plasma yang terbentuk pada proses deposisi. Selain itu jika tekanan gas dinaikkan lagi melebihi tekanan optimum maka hasil pengukuran resistansinya juga meningkat, kemungkinan karena rapat plasma yang meningkat mengakibatkan energi sputernya juga meningkat sehingga atom-atom target hasil bombardir juga meningkat sehingga plasma yang terbentuk mempunyai energi yang cukup tinggi. Dengan demikian yang terjadi adalah atom-atom target tidak sepenuhnya terdepositasi pada substrat atau bahkan terjadi kerusakan pada permukaan substrat akibat dari sputtering balik (*back sputtering*), hal tersebut sesuai dengan persamaan (1) dan (2).

KESIMPULAN

Dari beberapa hasil pengukuran lapisan tipis Ag/a-Si:H:B untuk berbagai parameter proses maka dapat disimpulkan bahwa,

1. Parameter proses deposisi waktu deposisi, tekanan gas dan suhu substrat sangat mempengaruhi kualitas hasil deposisi antara lain ketebalan, homogenitas dan kekuatan lapisan yang terbentuk pada substrat.
2. Diperoleh nilai resistansi yang optimum adalah pada kondisi proses waktu deposisi 1,5 jam, tekanan gas $1,3 \times 10^{-1}$ Torr dan suhu substrat 200°C , untuk lapisan tipis Ag/a-Si:H:B dengan nilai resistansi sebesar 1950Ω .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] TAKAHASHI, K. and KONAGAI, M., "Amorphous Silicon Solar Cells", North Oxford Academic Publishers Ltd., 1986.
- [2] MAKOTO KONAGAI, et. Al., *Photo-CVD Processing for Amorphous Silicon Solar Cell*", PVSEC-6, New Delhi, India, 1992.

- [3] A. DASGUPTA, *at al*, *Player of Mycrocrystalline Silicon Thin Film Solar Cells*, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2000, in print.
- [4] KAI ZHU, *et. Al*, *INTERFACIAL OPTICAL IN AMORPOUS SILICON BASED pin SOLAR CELLS*, Proceeding of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, September 19-22, 2000.
- [5] JOOHYUN KOH, H. FUJIWARA, YIWEI LU, C.R. WRONSKI, RW. COLLINS, *Thin Solid Film* 313-314 (1998), 469-473.
- [6] J. MEIER, J. SPITZNAGEL, U. KROLL, C. BUCHER, S. FAY, T. MORIARTY, *Thin Solid Film* 451-452 (2004), 518-524.
- [7] WASA, K., HAYAKAWA, S., *Handbook of Sputter Deposition Technology: Principles, Technology and Application*, Noyes Publication, New Jersey, 1992.
- [8] KONUMA M, *Film Deposition by Plasma Techniques*, Springer Verlag, Berlin, 1992.
- [9] HALLIDAY, RESNICK, PANTUN SILABAN, ERWIN SUCIPTO, *Fisika*, Erlangga, Jakarta, 1984.

TANYA JAWAB

Zakasias S. Ngara

- Apakah deposisi lapisan a-Si:H:B pada lapisan tipis Ag sudah dapat digunakan sebagai bahan solar sell ?
- Bagaimana karakteristik suatu lapisan dapat digunakan sebagai bahan sel surya.

Bambang Siswanto

- Dari karakteristik lapisan Ag/a-Si:H:B yang telah kami peroleh menggambarkan kedua lapisan tersebut dapat digunakan sebagai sel surya
- Untuk elektrode belakang yaitu bahan yang mempunyai konduktivitas dan reflektansi tinggi.

- Untuk elektrode depan yaitu bahan yang mempunyai konduktivitas dan transmintasi tinggi
- Untuk semikonduktor p-n yaitu material yang jika dikenahi sinar matahari, maka di dalam bahan tersebut terjadi efek photovoltaik dan biasanya material semikonduktor yang mempunyai energi gap antara 0,8 – 3,2 keV

I Gusti Ketut Puja

- *Bagaimana perbandingan sel surya yang dibuat dengan sel surya yang dijual di pasaran?*

- *Bagaimana tekno ekonomi untuk produksi masal?*

Bambang Siswanto

- Setahu kami sel surya yang sudah beredar dipasaran saat ini berbentuk Bulk, sedangkan yang kami buat adalah dalam multi lapisan tipis
- Ditinjau dari material yang digunakan sudah barang tentu untuk produksi mahal, sel surya dari lapisan tipis akan lebih murah