

## PENINGKATAN KUALITAS FILM TIPIS CdTe SEBAGAI ABSORBER SEL SURYA DENGAN MENGGUNAKAN DOPING TEMBAGA (Cu)

P. Marwoto<sup>1,\*</sup>, N.M. Darmaputra<sup>1</sup>, Sugianto<sup>1</sup>, Z. Othaman<sup>2</sup>, E. Wibowo  
S.Y. Astuti

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,  
Universitas Negeri Semarang, Indonesia

<sup>2</sup>Jabatan Fizik, Fakulti Sain, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia

Diterima: 19 Maret 2012. Disetujui: 2 Mei 2012. Dipublikasikan: Juli 2012

### ABSTRAK

Film tipis CdTe dengan doping tembaga (Cu) berkonsentrasi 2% telah berhasil ditumbuhkan di atas substrat *Indium Tin Oxide* (ITO) dengan metode *dc magnetron sputtering*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh doping Cu(2%) terhadap struktur morfologi, struktur kristal, fotoluminisensi dan resistivitas listrik film CdTe. Citra morfologi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan hasil analisis struktur dengan *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa film CdTe:Cu(2%) mempunyai citra permukaan dan struktur kristal yang lebih sempurna dibandingkan film CdTe tanpa doping. Hasil analisis spektrometer fotoluminisensi menunjukkan bahwa film CdTe dan CdTe(2%) mempunyai puncak fotoluminisensi pada tiga panjang gelombang yang identik yaitu 685 nm (1,81 eV), 725 nm (1,71 eV) dan 740 nm (1,67 eV). Film CdTe dengan doping Cu(2%) memiliki intensitas puncak fotoluminisensi yang lebih tajam pada pita energi 1,81 eV dibandingkan dengan film CdTe tanpa doping. Pengukuran arus dan tegangan (*I-V*) menunjukkan bahwa pemberian doping Cu(2%) dapat menurunkan resistivitas film dari  $8,40 \times 10^9 \Omega \text{cm}$  menjadi  $6,92 \times 10^5 \Omega \text{cm}$ . Sebagai absorber sel surya, kualitas film tipis CdTe telah berhasil ditingkatkan dengan pemberian doping Cu(2%).

### ABSTRACT

CdTe:Cu(2%) thin film has been successfully grown on Indium Tin Oxide (ITO) substrates by using *dc magnetron sputtering*. This study was carried out in order to investigate the effect of Cu(2%) doping on the morphological structure, crystal structure, photoluminescence, and resistivity of CdTe thin film. Scanning Electron Microscopy (SEM) images and X-Ray Diffraction (XRD) results showed that CdTe:Cu(2%) thin film has morphological and crystal structures more perfect than undoped CdTe film. Photoluminescence spectroscopy results showed that CdTe and CdTe:Cu(2%) thin films have luminescence peak at three identical wavelength regions i.e. 685 nm (1.81 eV), 725 nm (1.71 eV) and 740 nm (1.67 eV) however CdTe:Cu(2%) film shows sharper photoluminescence peak at band energy of 1.81 eV. Current-Voltage (*I-V*) measurement showed that the presenting of Cu doping on CdTe film configuration could decrease its electrical resistivity from  $8.40 \times 10^9 \Omega \text{cm}$  to  $6.92 \times 10^5 \Omega \text{cm}$ . Indeed, as absorber layer of solar cell, the performance of CdTe thin film has been successfully improved by using Cu(2%) as doping.

© 2012 Jurusan Fisika FMIPA UNNES Semarang

**Keywords:** Cu doping; CdTe; morphological structure; crystal structure; photoluminescence; resistivity

### PENDAHULUAN

*Cadmium Telluride* (CdTe) merupakan salah satu semikonduktor paduan II-VI yang

telah lama dikembangkan untuk aplikasi *photovoltaic* seperti dalam sel surya CdTe/CdS *heterojunction* (Demtsu *et al.*, 2008). CdTe mempunyai koefisien absorpsi tinggi  $\alpha > 1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$  dan *direct band-gap* 1,5 eV sehingga sesuai diaplikasikan sebagai lapisan absorber pada sel surya film tipis. Film tipis CdTe dengan ketebalan 1  $\mu\text{m}$  mampu mengabsorpsi sekitar 90%

---

**\*Alamat Korespondensi:**

Gdg. D7 Lt. 2 Kampus Sekaran Gunungpati, Semarang, 50229  
E-mail: pmarwoto@yahoo.com

foton yang energinya lebih tinggi dari *band-gap* CdTe (Gupta *et al.*, 2006).

Performa tinggi CdTe yang diaplikasikan dalam sel surya sangat bergantung pada penggunaan *window layer* (Wu, 2004), *back contact* (Zhou *et al.*, 2007), dan penambahan doping (Nawarange *et al.*, 2009). Doping yang ditambahkan pada deposisi film tipis CdTe umumnya adalah Cu (Tembaga), Si (Silikon), dan P (Phospor). Cu lebih sering digunakan karena kemampuannya untuk meningkatkan konduktivitas film tipis CdTe (Dzhafarov *et al.*, 2005). Pemberian doping Cu juga dapat memperbaiki struktur mikro dan sifat optik CdTe sehingga meningkatkan kualitas film (Rusu, 2005). Selain itu, penggunaan Cu sebagai doping CdTe *bulk* (padatan) dapat meningkatkan konsentrasi pembawa muatan (*carrier*) (Zhou *et al.*, 2007).

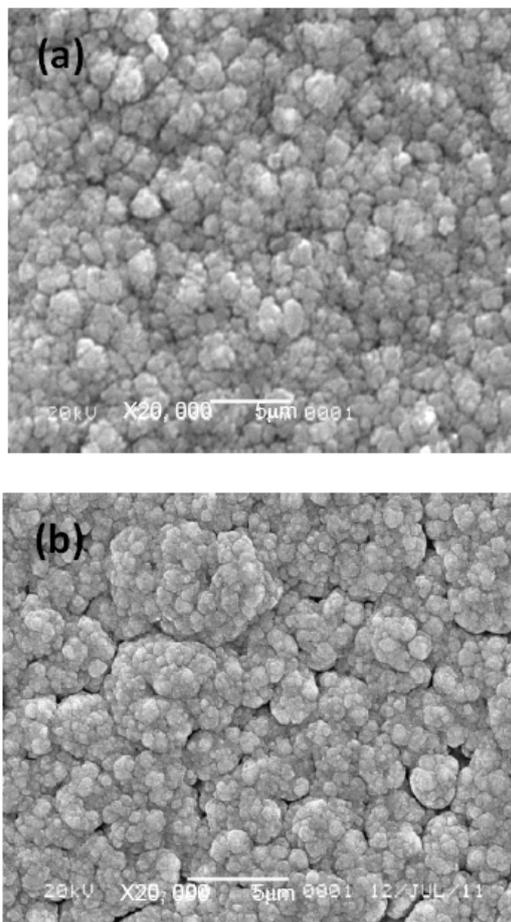
Pada penelitian ini film tipis CdTe ditumbuhkan dengan *home made dc magnetron sputtering*. Metode ini mempunyai beberapa kelebihan, di antaranya adalah lapisan yang terbentuk mempunyai komposisi yang serupa dengan bahan target (Sudjatmoko, 2003), *low growth temperature*, dan kontrol saat pendopongan dapat dilakukan dengan baik (Compaan, 2004). Dalam penelitian ini akan dibahas pengaruh doping Cu(2%) terhadap struktur kristal, spektrum fotoluminesensi dan resistivitas listrik film tipis CdTe yang ditumbuhkan dengan metode *dc magnetron sputtering*.

## METODE

Film tipis CdTe doping Cu 2% (CdTe:Cu(2%)) ditumbuhkan di atas *Indium Tin Oxide* (ITO) pada temperatur 350 °C dan daya plasma 43 W dengan metode *dc magnetron sputtering*. Target *pellet* dibuat dengan sistem pengepresan. Bahan *pellet* CdTe yang digunakan mempunyai kemurnian 99,999%, dan Cu<sub>2</sub>Te dengan kemurnian 99,999% dengan massa total 10 gram untuk target CdTe:Cu(15%) dan 15 gram untuk target CdTe:Cu(2%). Mekanisme pembuatannya meliputi: pencampuran CdTe dan Cu<sub>2</sub>Te kemudian penggerusan serbuk selama 2 jam, pemadatan atau pengepresan dengan menggunakan sistem pompa hidrolik menjadi *pellet* dengan diameter 2 cm, kemudian *pellet* tersebut disintering pada suhu 700 °C selama 2 jam dan kemudian didinginkan. Struktur kristal film tipis CdTe dan CdTe:Cu(2%) dianalisis dengan menggunakan XRD *X-Ray Diffraction* (XRD), struktur mikro menggunakan *Scanning Elec-*

*tron Microscopy* (SEM), sifat fotoluminesensi film dikarakterisasi dengan *Photoluminescence Spectroscopy* (PL Spektroskopi) dan resistivitas film dianalisis dengan menggunakan I-V Meter ELKAHFI 100.

## HASIL DAN PEMBAHASAN



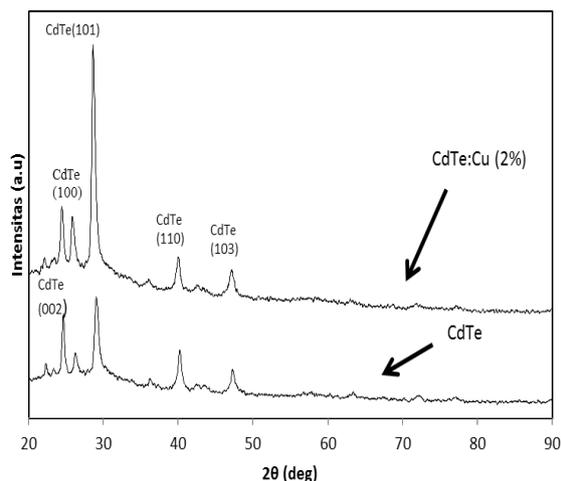
**Gambar 1.** Citra SEM film tipis (a) CdTe dan (b) CdTe:Cu(2%) dengan perbesaran 5.000 kali

Gambar 1 menunjukkan struktur morfologi permukaan film tipis CdTe dan CdTe:Cu(2%). Teramati bahwa kedua film memiliki morfologi yang relatif hampir sama. Film tipis CdTe tanpa doping terlihat lebih tebal dibandingkan dengan film CdTe:Cu(2%). Tampak bahwa film CdTe yang ditumbuhkan dengan doping Cu(2%) membentuk gerombolan dengan ukuran yang lebih besar dibandingkan dengan film tanpa doping.

Pada penelitian sebelumnya film ditumbuhkan dengan daya plasma 14 watt dan suhu penumbuhan 250 °C. Pada penumbuhan ini masih dihasilkan film dengan morfologi yang

tidak rata (Prabawati, 2008). Penggunaan daya plasma tinggi menyebabkan bertambahnya energi kinetik dan momentum atom-atom target yang menuju substrat. Bertambahnya energi kinetik dan momentum atom-atom target yang menuju substrat dapat meningkatkan mobilitas atom-atom target menuju permukaan substrat (Sudjatmoko, 2003). Peningkatan suhu penumbuhan menyebabkan peningkatan laju mobilitas atom di permukaan substrat. Semakin tinggi suhu substrat, atom-atom yang berada pada permukaan substrat akan mudah bermigrasi dan menata diri sehingga morfologi permukaan akan lebih rata (Prabawati, 2008). Citra SEM menunjukkan bahwa film CdTe yang ditumbuhkan memiliki bulir yang tumbuh merata di permukaan substrat. Hal ini merupakan akibat dari penggunaan daya plasma dan suhu penumbuhan yang relatif tinggi. Namun demikian, film CdTe yang ditumbuhkan dengan doping Cu tampak mempunyai struktur morfologi yang lebih rata dibandingkan dengan struktur morfologi film CdTe yang ditumbuhkan tanpa doping. Struktur morfologi yang tidak rata pada film CdTe tanpa doping Cu diduga terjadi karena adanya cacat alami yang berupa cacat lokal Cd-*vacancy* dalam kristal tunggal, dan kehadiran Cu dapat mengisi kekosongan tersebut sehingga film yang dihasilkan menjadi lebih rapat (Lany *et al.*, 2001).

Gambar 2 menunjukkan pola XRD film tipis CdTe dan CdTe:Cu(2%) yang ditumbuhkan pada temperatur 325 °C dan daya plasma 43 W. Teramati bahwa kedua film mempunyai puncak-puncak difraksi pada  $2\theta$  yang identik meskipun mempunyai intensitas yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian doping Cu dengan konsentrasi 2% tidak mengubah struktur kristal film CdTe. Puncak tertinggi masing-masing film teramati pada sudut difraksi  $2\theta = 28,66^\circ$  untuk film CdTe dan  $2\theta = 28,28^\circ$  untuk film CdTe:Cu(2%), dengan intensitas yang berbeda. Kedua sampel mempunyai struktur kristal heksagonal dengan intensitas tertinggi pada bidang (101).

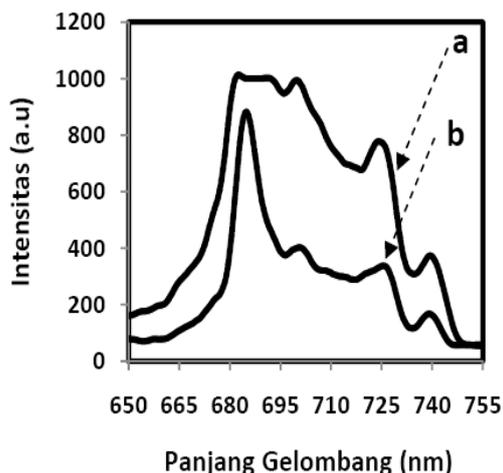


**Gambar 2.** Difraksi sinar-X film tipis CdTe dan CdTe:Cu(2%) yang ditumbuhkan pada 325 °C, 14 W

Puncak-puncak difraksi film tipis CdTe:Cu(2%) teramati lebih tinggi dibandingkan dengan film tipis CdTe. Hal ini menunjukkan bahwa film tipis CdTe dengan doping Cu(2%) mempunyai struktur kristal yang lebih sempurna dibandingkan dengan struktur kristal CdTe tanpa doping. Atom-atom Cu dalam kristal tunggal CdTe dianggap sebagai ion *interstitial* ( $\text{Cu}^+$ ) yang akan menempati kekosongan Cd-*vacancy* (Dzhafarov *et al.*, 2005). Hasil analisis ini sesuai dengan struktur morfologi yang film CdTe yang dihasilkan. Rusu *et al* (2005) dalam penelitiannya juga menyebutkan bahwa atom Cu menutupi kekosongan cacat Cd-*vacancy* sehingga meningkatkan kualitas kristal film yang ditumbuhkan.

Gambar 3 menunjukkan hasil karakterisasi film tipis CdTe dan CdTe:Cu(2%) dengan spektrometer fotoluminisensi dengan eksitasi pada panjang gelombang 236 nm. Seperti halnya hasil karakterisasi XRD, pola spektrum fotoluminisensi dari kedua film juga identik. Tampak bahwa fotoluminisensi kedua film terjadi pada spektrum warna merah dengan puncak fotoluminisensi pada panjang gelombang yang sama yaitu 685 nm, 740 nm dan 725 nm. Ketiga pita panjang gelombang tersebut bersesu-

aian dengan nilai energi foton sebesar 1,81 eV, 1,71 eV dan 1,67 eV dengan intensitas yang lebih tinggi pada film CdTe tanpa doping Cu. Intensitas yang lebih tinggi pada film CdTe yang ditumbuhkan tanpa doping Cu terjadi karena film tersebut lebih tebal dibandingkan pada film CdTe yang ditumbuhkan tanpa Cu sebagaimana tampak pada hasil analisis morfologi permukaan dengan SEM.



**Gambar 3.** Spektrum fotoluminisensi film tipis: a) CdTe dan b) CdTe:Cu(2%)

Terdapatnya tiga puncak eksitasi yang identik dari kedua film memperlihatkan bahwa kedua film tumbuh dengan tiga dominasi ukuran bulir yang sedikit berbeda sehingga mengakibatkan terjadinya tiga puncak eksitasi yang berhimpit sebagai akibat *quantum size effect* (Cao, 2003). Ukuran bulir yang lebih kecil berkontribusi pada terjadinya eksitasi pada panjang gelombang yang pendek sedangkan bulir yang lebih besar berkontribusi pada terjadinya eksitasi pada panjang gelombang yang lebih besar. Selain itu, munculnya tiga puncak fotoluminisensi dapat ditafsirkan terjadi karena selain melalui mekanisme lompatan (*hopping mechanism*) *band to band* juga melalui mekanisme lompatan *multi-defect*. *Defect* berperan sebagai *trapped* pada *band tail* di dalam *band gap*. Peristiwa rekombinasi yang terjadi pada satu *defect*, kemudian dilanjutkan dengan rekombinasi pada satu *defect* yang lain pada level energi yang lebih rendah, sehingga menghasilkan puncak fotoluminisensi lebih dari satu. Mekanisme ini mirip dengan kasus pada film tipis karbon amorf terhidrogenasi (Marwoto, 2004).

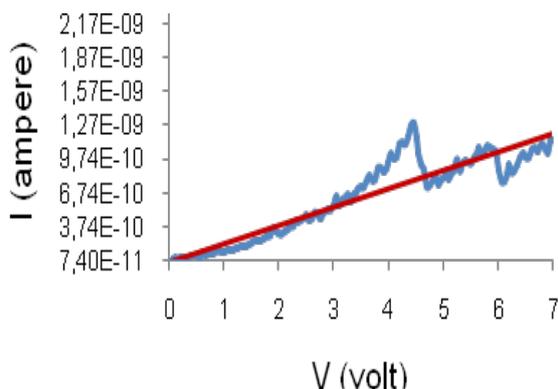
Film CdTe:Cu(2%) yang ditumbuhkan memperlihatkan intensitas puncak fotoluminisensi yang dominan pada energi di sekitar 1,81 eV dan mengindikasikan terjadinya peristiwa

rekombinasi pada film CdTe:Cu(2%) dominan pada level energi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme lompatan dominan pada level energi  $\sim 1,81$  eV. Berbeda dengan film CdTe tanpa doping yang memperlihatkan intensitas yang relatif lebih merata antara level energi 1,71 – 1,81 eV yang mengindikasikan tersebarnya pusat-pusat rekombinasi pada level energi sebagaimana dilaporkan oleh Dzhaifarov *et al.*, (2005). Dapat dikatakan bahwa film tipis CdTe tanpa doping Cu memiliki banyak kecacatan dalam struktur kristalnya. Fakta ini sesuai dengan hasil analisis SEM dan XRD dari kedua film. Hadirnya doping Cu memperkuat argumentasi bahwa Cu dalam kristal tunggal CdTe dianggap sebagai ion *interstitial* ( $\text{Cu}^+$ ) yang akan menempati kekosongan Cd-*vacancy* sebagaimana dikemukakan oleh Dzhaifarov *et al.*, (2005). Kekosongan Cd-*vacancy* pada film yang ditumbuhkan tanpa Cu inilah yang berperan sebagai *defect*.

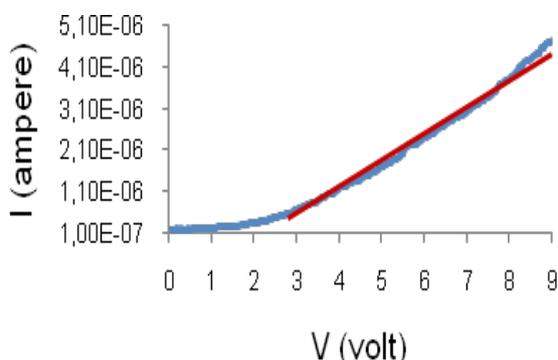
Spektrum fotoluminisensi yang diperoleh menunjukkan bahwa film yang telah ditumbuhkan diduga memiliki energi gap antara 1,67 – 1,81 eV. Film tersebut mempunyai kemampuan mengeksitasi foton yang dominan pada pita energi dengan tiga panjang gelombang sekaligus. Dengan demikian, jika diterapkan pada sel surya kedua jenis film diharapkan dapat beroperasi secara optimal pada level energi antara 1,67 eV – 1,81 eV. Level energi ini hampir sama dengan energi *bandgap* silikon  $\sim 1,65$  eV (Takahashi dan Konagai, 1986) dan sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan energi *direct band-gap* 1,5 eV yang digunakan sebagai lapisan absorber pada sel surya film tipis (Gupta *et al.*, 2006). Level energi 1,67 eV pada film CdTe yang ditumbuhkan diduga merupakan energi *direct band-gap* dan level energi 1,81 eV merupakan *indirect band-gap* terlebar yang dimiliki oleh film CdTe yang berhasil ditumbuhkan dalam penelitian ini. Pita energi 1,81 eV yang tajam pada film tipis CdTe yang didoping Cu(2%) menunjukkan bahwa film tersebut mempunyai tepi pita *indirect band-gap* yang lebih tajam dibandingkan dengan film tanpa doping Cu. Sebagai absorber sel surya, elektron yang tereksitasi oleh foton (sinar matahari) pada film tipis CdTe yang didoping Cu(2%) lebih terpusat pada level energi di sekitar 1,81 eV. Karena *defect* yang relatif banyak pada CdTe tanpa doping, maka ketika diterapkan sebagai absorber sel surya akan menyebabkan banyak elektron yang tereksitasi terperangkap pada *defect* sehingga dapat mengurangi efisiensi sel surya.

Restisivitas film tipis CdTe dan

CdTe:Cu(2%) diukur menggunakan I-V Meter. Data yang diperoleh dari karakterisasi ini berupa grafik arus *I* dan tegangan *V*. Gambar 4 dan Gambar 5 masing-masing menunjukkan hasil pengukuran arus dan tegangan (I-V) kedua sampel. Terlihat bahwa grafik I-V film tipis CdTe masih menunjukkan pola tidak linier yang mengindikasikan bahwa sifat resistivitas film masih bersifat *schottky*. Pada grafik I-V film tipis CdTe:Cu(2%) teramati pola yang berbeda, pola grafik linier mulai terjadi pada tegangan 3 volt. Hal ini menunjukkan bahwa pada tegangan 3 volt, konduktivitas film mulai bersifat Ohmik. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Wiyanto (1993) yang menunjukkan bahwa jika karakteristik arus-tegangan linier maka kontak bersifat Ohmik. Perubahan grafik I-V film tipis CdTe:Cu(2%) yang ditumbuhkan pada 325 °C dan 43 watt menjadi linier selain disebabkan oleh terjadinya difusi antara doping Cu dengan lapisan tipis CdTe juga dikarenakan tinggi potensial penghambat (*barrier*) dapat tereduksi akibat elektron mendapat energi termal.



**Gambar 4.** Grafik hasil pengukuran I-V film tipis CdTe yang ditumbuhkan 325 °C dan 43 W



**Gambar 5.** Grafik hasil pengukuran I-V film tipis CdTe:Cu(2%) yang pada 325 C dan daya plasma 43 W

Nilai resistivitas kedua film ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut dan perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 1.

$$\rho = \frac{2\pi rV}{I}$$

dengan  $\rho$  adalah resistivitas film,  $I$  adalah kuat arus dan  $V$  adalah tegangan. Terlihat bahwa pemberian doping Cu(2%) memberi pengaruh yang signifikan terhadap perubahan resistivitas film sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Film tipis CdTe tanpa doping memiliki resistivitas  $8,40 \times 10^9$  ( $\Omega\text{cm}$ ) sedangkan film tipis CdTe:Cu (2%) memiliki resistivitas yang lebih rendah, yaitu  $6,92 \times 10^5$   $\Omega\text{cm}$ . Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan doping Cu mampu meningkatkan konduktivitas film tipis CdTe (Dzhafarov *et al.*, 2005). Resistivitas yang relatif tinggi pada CdTe tanpa doping Cu menunjukkan bahwa gerak elektron konduksi pada film tersebut terhalang oleh banyaknya kecacatan alami yang berupa cacat lokal Cd-*vacancy* (Dzhafarov *et al.*, 2005). Hal ini menunjukkan bahwa CdTe tanpa doping Cu mempunyai konsentrasi *barrier* berupa *defect* yang relatif lebih banyak sebagaimana ditunjukkan oleh hasil karakterisasi XRD dan fotoluminisensi. Selain itu, menurut Hirasawa *et al.* (2001), peningkatan ketebalan film tipis seperti ZnO akan meningkatkan resistivitas film. Hasil observasi dengan SEM, dapat dilihat bahwa film CdTe tanpa doping Cu lebih tebal dibandingkan dengan film CdTe yang ditumbuhkan dengan doping Cu.

**Tabel 1.** Resistivitas film tipis CdTe dan CdTe:Cu (2%)

Sampel	Suhu Substrat (°C)	Daya Plasma (W)	Resistivitas ( $\Omega\text{cm}$ )
CdTe	325	43	$8,40 \times 10^9$
CdTe:Cu (2%)	325	43	$6,92 \times 10^5$

Hasil karakterisasi dengan menggunakan SEM, XRD, spektrometer fotoluminisensi dan I-V meter dapat menunjukkan bahwa penambahan doping Cu(2%) dalam film tipis CdTe dapat meningkatkan kualitas film. Hasil pengukuran resistivitas dapat memberikan informasi bahwa film CdTe yang ditumbuhkan dengan doping Cu mempunyai konduktivitas  $\sim 1,44 \times 10^{-7} (\Omega\text{cm})^{-1}$ . Untuk penerapan sel surya

harga konduktivitas tersebut masih termasuk dalam kategori kurang baik (Takahashi dan Konagai, 1986). Namun demikian, dalam penelitian ini dapat diperoleh informasi bahwa kualitas film CdTe sebagai lapisan absorber pada sel surya film tipis telah berhasil ditingkatkan dengan pemberian doping Cu (2%). Lapisan absorber dengan konduktivitas yang lebih tinggi secara teoritis mampu meningkatkan kinerja sel surya sehingga dapat meningkatkan efisiensi sel surya tersebut. Sel surya dengan efisiensi tinggi akan mengkonversi lebih banyak foton menjadi arus listrik sehingga daya listrik yang dihasilkan sel surya tersebut menjadi lebih besar. Oleh karena itu untuk memperoleh sel surya film tipis dengan absorber CdTe yang berkinerja tinggi perlu dilakukan optimasi dengan memberikan doping Cu untuk berbagai konsentrasi.

### PENUTUP

Pendopingan film tipis CdTe dengan tembaga (Cu) berkonsentrasi 2% telah berhasil dilakukan dengan menggunakan *dc magnetron sputtering*. Berdasarkan eksperimen dapat disimpulkan bahwa analisis struktur kristal dengan XRD, analisis permukaan dengan SEM, analisis spektrum fotoluminisensi dan pengukuran I-V meter menunjukkan bahwa film CdTe:Cu(2%) mempunyai kualitas film yang lebih baik dibandingkan dengan film yang ditumbuhkan tanpa doping. Hasil analisis struktur morfologi permukaan CdTe dengan SEM memperlihatkan bahwa kehadiran doping Cu(2%) menghasilkan struktur permukaan yang lebih rata dan spektrum XRD menunjukkan bahwa pemberian doping Cu(2%) dapat meningkatkan kualitas kristal film CdTe. Analisis dengan spektrometer fotoluminisensi menunjukkan bahwa film CdTe dan CdTeCu(2%) mempunyai puncak intensitas pada tiga panjang gelombang yang identik yaitu 685 nm (1,81 eV), 725 nm (1,71 eV) dan 740 nm (1,67 eV), dengan intensitas puncak yang tajam dan dominan pada pita energi 1,81 eV untuk film yang diberi doping Cu(2%). Hasil pengukuran I-V menunjukkan bahwa pemberian doping Cu(2%) dapat menurunkan resistivitas film dari  $8,40 \times 10^9 \Omega \text{cm}$  menjadi  $6,92 \times 10^5 \Omega \text{cm}$ .

### DAFTAR PUSTAKA

- Cao, Guozhong. 2003. *Nanostructures & Nanomaterials (Synthesis, Properties & Applications)*. London: Imperial College Press.
- Compaan, A.D., A. Gupta, S. Lee, S. Wang, & J. Drayton. 2004. High efficiency, magnetron sputtered CdS/CdTe solar cells. *Solar Energy*. 77, hlm. 815-822.
- Demtsu, S. H., Albin, D.S., Sites, J.R., Metzger, W.K., Duda, A. 2008. Cu-Related Recombination in CdS/CdTe solar cells. *Thin Solid Films*. 516, hlm. 2251-2254
- Dzhavarof, T.D., S.S. Yesilkaya, N.Y. Canli, & M. Caliskan. 2005. Diffusion and Influence of Cu on properties of CdTe thin films and CdTe/CdS cells. *Solar Energy* 77, hlm. 371-383.
- Gupta, A., V. Parikh, & A.D. Compaan. 2006. High Efficiency Ultra-thin Sputtered CdTe Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90, hlm. 2263-2271.
- Hirasawa, H., M. Yoshida, S. Nakamura, Y. Suzuki, S. Okada, K. Kondo. 2001. ZnO:Ga conducting-films grown by DC arc-discharge ionplating. *Solar Energy Material and Solar Cells*. 67 p. 231-236.
- Lany, S., V. Ostheimer, H. Wolf, Th. Wichert. 2001. Vacancies in CdTe: experiment and theory. *Physica B* 308-310, hlm. 958-962.
- Marwoto, P. 2004. *Pembangunan Reaktor DC PECVD dan Kajian Film Tipis Carbon Amorfus Terhidrogen (a-C:H)*. Disertasi Program Ph.D, tidak diterbitkan. Johor Bahru: Universiti Teknologi Malaysia
- Nawarange, Amruta, Xiangxin Liu, & Alvin D. Compaan. 2009. Transient Response of CdS/CdTe Cells With Heavy Doping Of Si, P And Cu. *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference Proceeding. Philadelphia, Pennsylvania, USA, 7-12 June 2009* hlm. 1378 – 1380.
- Prabawati, D.N. 2008. *Pengaruh Suhu Substrat Pada Struktur Kristal dan Sifat Optik Film Tipis CdTe yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. tidak diterbitkan. Semarang: FMIPA UNNES.
- Rusu, G.G, M. Rusu. 2005. Optical Behavior of Multilayered CdTe/Cu Thin Films Deposited by Stacked Layer Method. *Journal of Optoelectronic and Advanced Materials*, 7(2), hlm. 885-889.
- Takahashi, K. dan M. Konagai. 1986. *Amorphous Silicon Solar Cells*, Translated by F.R.D. Apps, London: North Oxford Academic Publisher Ltd.
- Rusu, G.G, M. Rusu, E.K. Polychroniadis, C. Lioutas. 2005. Characterization of CdTe Thin Films Prepared by Stacked Layer Method. *Journal of Optoelectronic and Advanced Materials*, 7(4), hlm. 1957-1964.
- Sudjatmoko. 2003. Aplikasi Teknologi Sputtering untuk Pembuatan Sel Surya Lapisan Tipis. *Workshop: Sputtering untuk Rekayasa Permukaan Bahan*. Yogyakarta: Puslitbang Teknologi Maju Batan: 3.
- Wiyanto. 1993. *Karakterisasi Sifat Listrik Film Tipis ZnO dengan Metode Van Der Pauw*. Tesis S-2 Tidak diterbitkan. Bandung: ITB.

- Wu, X., J. Zhou, A. Duda, Y. Yan, G. Teeter, S. Asher, W.K. Metzger, S. Demtsu, Sua-Huai. Wei, R. Noufi. 2007. Phase control of  $\text{Cu}_x\text{Te}$  film and its effect on CdS/CdTe solar cells. *Thin Solid Films* 515, hlm. 5798-5803
- Zhou, J., X. Wu, A. Duda, G. Teeter, S.H. Demtsu. 2007. The formation of different phases of  $\text{Cu}_x\text{Te}$  and their effect on CdTe/CdS solar cells. *Thin Solid Film* 515, hlm. 7364-7369.