

## STUDI SPEKTROSKOPI ELECTRON SPIN RESONANCE (ESR) LAPISAN TIPIS AMORF SILIKON KARBON (a-SiC:H) HASIL DEPOSISI METODE DC SPUTTERING

Rosari Saleh

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Depok, 16424

E-mail : rosari@email.globalinfo.net

### Abstrak

Defek *dangling bond* dari lapisan tipis amorf silikon karbon (a-SiC:H) hasil deposisi metode *dc sputtering* telah dipelajari dengan spektroskopi *ESR* (*electron spin resonance*). Densitas *spin* berkurang tidak terlalu besar dengan peningkatan *flow rate* gas metan. Pengaruh kehadiran karbon dan hidrogen terhadap harga-*g* menunjukkan bahwa sampai *flow rate* gas metan 8 sccm, sinyal *ESR* didominasi oleh karakteristik defek a-Si:H, sedangkan untuk *flow rate* gas metan lebih besar dari 8 sccm, harga-*g* berkurang mendekati harga-*g* dari a-C:H. Hasil analisis inframerah menunjukkan semakin banyak karbon dan hidrogen yang membentuk ikatan Si-H, Si-C dan C-H dengan bertambahnya *flow rate* gas metan. Relasi hasil yang diperoleh dari inframerah dengan densitas defek dan harga-*g* akan dipelajari.

### Abstract

The dangling bond defect density in sputtered amorphous silicon carbon alloys have been studied by electron spin resonance (ESR). The results show that the spin density decreased slightly with increasing methane flow rate (CH<sub>4</sub>). The influence of carbon and hydrogen incorporation on g-value revealed that for CH<sub>4</sub> flow rate up to 8 sccm, the ESR signal is dominated by defects characteristic of a-Si:H films and for CH<sub>4</sub> flow rate higher than 8 sccm the g-value decreased towards those usually found in a-C:H films. Infrared (IR) results suggest that as CH<sub>4</sub> flow rate increases more carbon and hydrogen is incorporated into the films to form Si-H, Si-C and C-H bonds. A direct relation between the IR results and the defect density and g-value is observed.

*Keywords: Electron spin resonance, silicon carbon, defect density, sputtering*

### Pendahuluan

Lapisan tipis amorf silikon karbon terhidrogenasi (a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H) banyak digunakan pada berbagai aplikasi karena kombinasi dari karakteristiknya yang unik seperti ketahanan mekanis, kestabilan kimiawi dan sifat listriknya. Keuntungan dari penggunaan material ini pada aplikasi mikroelektronik adalah kemungkinan untuk divariasikan karakteristik optik dan listriknya terhadap stoikiometri dan kondisi deposisi. Selain itu penambahan karbon akan meningkatkan disorder kimiawi dan topologi dari matriks amorf silikon sehingga material ini merupakan sistem yang menarik untuk dipelajari karakteristik sistem disordernya [1].

Karakteristik optik dan listrik lapisan tipis a-Si:H sangat bergantung pada densitas dan distribusi keadaan terlokalisasi di daerah *pseudo-gap* [2], demikianpula pada

lapisan tipis a-SiC:H. Oleh karena itu karakteristik densitas keadaan terlokalisasi dan relasinya terhadap komposisi dan ikatan hidrogen sangat penting untuk diteliti lebih lanjut [3]. Informasi tentang keadaan terlokalisasi tidak dapat diperoleh secara langsung dari hasil pengukuran transpor dan optik [2]. Spektroskopi *ESR* merupakan salah satu teknik yang dapat digunakan untuk memperoleh karakteristik keadaan terlokalisasi dengan mengetahui keadaan dan densitas *spin* elektron tak berpasangan (*unpaired*) [2-4] yang berkontribusi pada defek *dangling bond* [5]. Defek ini berpengaruh kurang baik terhadap karakteristik listrik lapisan tipis a-SiC:H, tetapi kuantitas defek ini dapat dikurangi dengan penurunan jumlah ikatan tak saturasi (*unsaturated bond*) melalui penambahan hidrogen [6]. Penelitian ini akan mempelajari tentang defek *dangling bond* dari lapisan tipis amorf silikon karbon a-

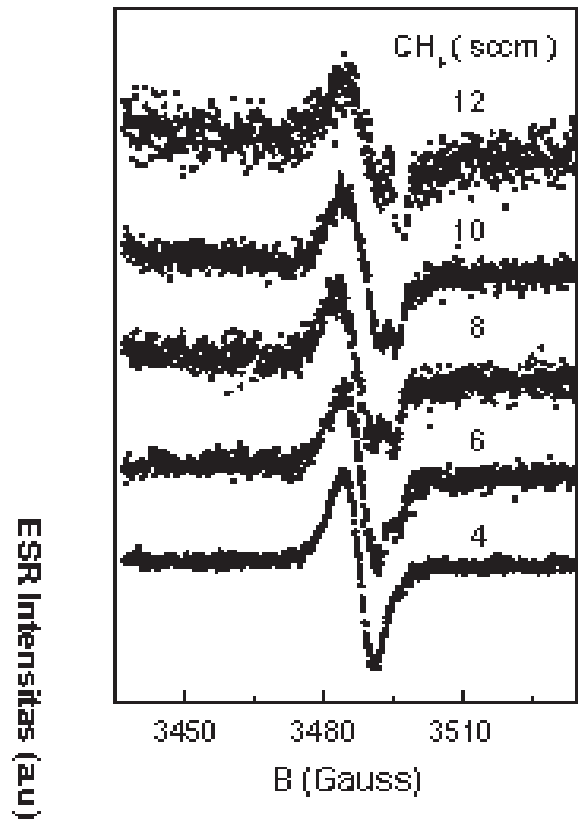
$\text{Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  dengan menggunakan spektroskopi ESR. Pengaruh komposisi dan ikatan hidrogen pada densitas defek tersebut juga akan dibantu dengan beberapa hasil pengukuran menggunakan *microprobe*, efusi hidrogen dan spektrum ESR yang mendukung hasil karakterisasi tersebut.

## Eksperimental

Lapisan tipis amorf silikon karbon terhidrogenasi ( $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ) dideposisi dengan metode *d.c.* pada temperatur  $T_s=200$  °C di atas substrat silikon tipe-*p* <100> untuk pengukuran spektroskopi ESR. Untuk pengukuran inframerah, dengan menggunakan kristal silikon tipe-*p* dalam campuran gas metana dan metan divariasi dari 4 sampai 12 sccm *flow* massa untuk mendapatkan variasi komposisi silikon, karbon dan hidrogen. Dengan menggunakan daya sebesar 200 W dan tekanan sekitar  $5 \times 10^{-3}$  mbar dan diperoleh ketebalan film sekitar 1  $\mu\text{m}$ . Jumlah karbon dan silikon tipis diperoleh dari hasil analisis dengan menggunakan *(electron probe microanalysis)* dan *(backscattering)* menggunakan kristal silikon sebagai standar. Pengukuran ESR dilakukan pada temperatur ruang menggunakan *X-band* Bruker ESP 380E. Lapisan tipis amorf silikon tanpa hidrogen (*a-Si*) yang dihasilkan dengan menggunakan *rf sputtering* digunakan untuk kalibrasi dan sebagai standar *spin*. Ikatan hidrogen dan karbon diketahui dari spektrum absorpsi inframerah yang diukur di daerah bilangan gelombang 400-4000  $\text{cm}^{-1}$  menggunakan *FTIR (Fourier-transformed infra red)* dan pengukuran dilakukan terhadap standar berupa kristal silikon yang digunakan sebagai substrat. Penentuan jumlah hidrogen yang terdapat pada lapisan tipis diperoleh dari hasil pengukuran efusi hidrogen dengan cara yang telah dikemukakan sebelumnya [7].

## Hasil dan Pembahasan

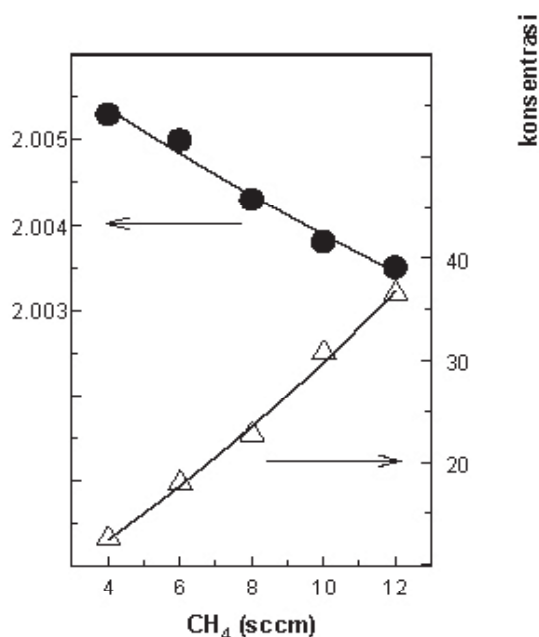
Spektrum ESR lapisan tipis amorf silikon karbon terhidrogenasi ( $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ) untuk lima variasi *flow rate* gas metan 4, 6, 8, 10 dan 12 sccm diperlihatkan pada Gambar 1. Gambar tersebut memperlihatkan derivatif spektrum ESR yang telah dinormalisasi terhadap intensitas puncak ke puncak yang sama, sehingga perbedaan spektrum untuk *flow rate* gas metan yang berbeda dapat terlihat lebih baik, dengan demikian dapat dilakukan perbandingan spektrum dan dapat diamati perubahannya dengan bertambahnya *flow rate* gas metan, selain itu terlihat pula adanya resonansi sangat lemah dengan harga-*g* mendekati 2.0000 yang berasal dari substrat. Sinyal ESR diperkirakan berasal dari *dangling bond* pada atom Si atau atom C. Hal yang



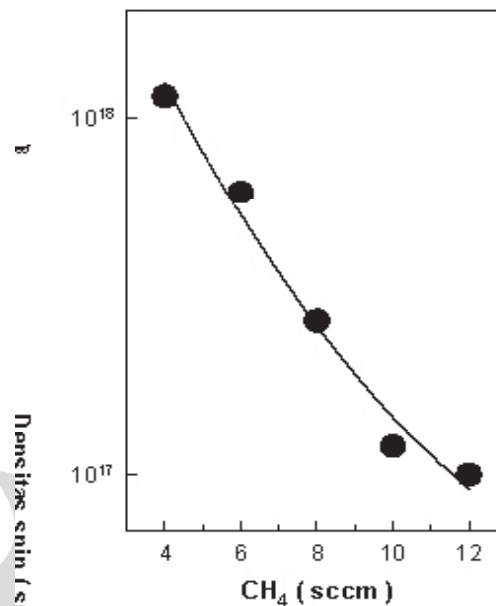
Gambar 1. Spektrum ESR lapisan tipis  $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  untuk lima variasi *flow rate* gas metan

menyulitkan dari analisis lapisan tipis  $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  dengan spektroskopi ESR adalah sinyal ESR yang diperoleh dari *dangling bond* pada atom Si dan *dangling bond* pada atom C tidak terpisahkan dengan baik. Hal ini tidak ditemui untuk lapisan tipis berbasis  $\text{a-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$  yang memiliki sinyal ESR yang terpisah untuk *dangling bond* pada atom Si dan *dangling bond* pada atom Ge [8], karena selisih harga-*g* dan lebar kurva dari *dangling bond* pada atom Si dengan atom Ge cukup besar, sedangkan kedua hal tersebut sangat kecil untuk atom Si dengan atom C. Oleh karena itu dalam mempelajari pembentukan *dangling bond* pada atom Si dan atom C untuk lapisan tipis  $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  dilakukan melalui pengamatan terhadap perubahan harga-*g* [3].

Harga-*g* dari sinyal ESR lapisan tipis amorf silikon karbon terhidrogenasi  $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  (Gambar 1) untuk kelima variasi *flow rate* gas metan diperlihatkan pada Gambar 2. Selain itu juga diperlihatkan konsentrasi karbon yang terdapat pada lapisan tipis  $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$  untuk kelima *flow rate* gas metan. Harga-*g* berkurang dengan meningkatnya *flow rate* gas metan dan diperoleh dalam kisaran 2.0052-2.0033. Pengaruh peningkatan *flow rate* gas metan



Gambar 2. Harga-g dari sinyal ESR dan konsentrasi karbon hasil analisis EPMA dan RBS untuk setiap flow rate gas metan



Gambar 3. Densitas spin untuk setiap flow rate gas metan

harga-g terlihat bahwa hingga *flow rate* gas metan 8 sccm, harga-g yang diperoleh mendekati harga-g dari defek pada lapisan tipis a-Si:H yakni sekitar 2.0055 [9] sedangkan untuk *flow rate* gas metan di atas 8 sccm sampai 12 sccm, harga-g yang diperoleh mendekati harga-g dari defek pada lapisan tipis a-C:H yaitu sekitar 2,0023 [10]. Berdasarkan hasil tersebut dapat dikatakan bahwa untuk *flow rate* gas metan  $\leq 8$  sccm defek dominan berasal dari *dangling bond* pada atom Si, sedangkan defek yang berasal dari *dangling bond* pada atom C dominan terjadi pada *flow rate* gas metan  $> 8$  sccm. Harga-g berkurang secara signifikan dari 2.0052 menjadi 2.0033 dengan peningkatan *flow rate* gas metan dari 4 sampai 12 sccm (konsentrasi karbon dari 10 sampai 40 % atom). Peningkatan *flow rate* gas metan dalam hal menyangkut pembentukan *dangling bond* pada atom Si dan atom C pada lapisan tipis a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H berhubungan dengan peningkatan konsentrasi karbon. Penurunan harga-g tersebut diperkirakan karena terjadi saturasi ikatan *dangling bond* pada atom Si melalui pembentukan ikatan Si-C dan Si-H dengan meningkatnya *flow rate* gas metan. Selain itu peningkatan *flow rate* gas metan yang menambah jumlah karbon juga meningkatkan *dangling bond* pada atom C, walaupun juga disertai saturasi ikatan *dangling bond* pada atom C melalui pembentukan ikatan C-H dan C-C. Harga-g pada *flow rate* gas metan 12 sccm (konsentrasi karbon sekitar 40 %) memperlihatkan harga-g yang mendekati harga-g dari a-C:H meskipun lapisan tipis masih dalam kondisi silikon dominan. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan dominasi atom *dangling bond* dari Si ke C dan perubahan yang cukup besar tersebut terjadi karena berkurangnya *dangling bond* pada atom Si yang

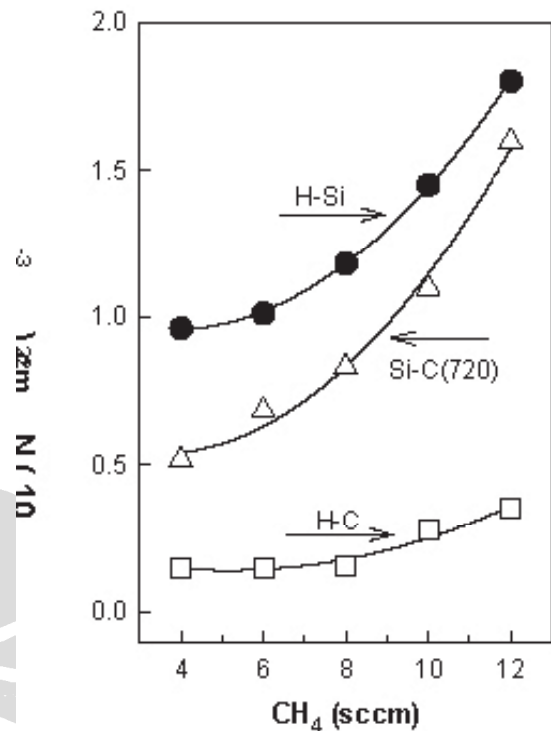
cukup besar diikuti dengan peningkatan *dangling bond* pada atom C. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa peningkatan *flow rate* gas metan tidak menyebabkan terjadinya saturasi ikatan *dangling bond* pada atom C yang cukup besar melalui pembentukan ikatan C-H dan C-C, diperlukan hasil pengukuran lain seperti spektroskopi Raman untuk menunjukkan hal tersebut. Marimoto dkk. [3] memperoleh harga-g yang berkurang dari 2.0055 menjadi 2.0052 dengan bertambahnya konsentrasi karbon sampai 40% untuk lapisan tipis a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H hasil deposisi metode GD (*glow discharge*). Beberapa peneliti lain [11,12] juga memperoleh penurunan harga-g dengan bertambahnya konsentrasi karbon untuk lapisan tipis a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H hasil deposisi metode CVD (*chemical vapour deposition*) dan *rf sputtering*, hanya saja penurunan harga-g terjadi secara cepat dari 2.0055 menjadi 2.0030 dengan penambahan konsentrasi karbon hingga 40 %. Perubahan harga-g lapisan tipis a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H hasil penelitian ini terhadap meningkatnya *flow rate* gas metan, dalam hal ini konsentrasi karbon, memperlihatkan kecenderungan yang mirip dengan hasil deposisi metode CVD dan *rf sputtering*.

Hasil perhitungan densitas spin  $N_s$  dari spektrum ESR lapisan tipis a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H (Gambar 1) setelah dibandingkan dengan standar *spin* lapisan tipis a-Si diperlihatkan pada Gambar 3 untuk setiap *flow rate* gas metan. Densitas *spin*  $N_s$  berkurang dari  $1.0 \times 10^{18}$  *spin/cm*<sup>3</sup> untuk *flow rate* gas metan 4 sccm menjadi  $\sim 1.0 \times 10^{17}$  *spin/cm*<sup>3</sup> untuk *flow rate* gas metan 12 sccm. Densitas *spin* menyatakan total densitas keadaan yang mendominasi *dangling bond*

keseluruhan baik pada atom Si maupun C. Berdasarkan harga- $g$  yang mewakili atom *dangling bond* yang dominan maka untuk *flow rate* gas metan rendah (4 sccm) densitas *spin* didominasi oleh densitas *dangling bond* pada atom Si, sedangkan untuk *flow rate* gas metan tinggi (12 sccm), densitas *spin* didominasi oleh densitas dari *dangling bond* pada atom C. Berkurangnya densitas *spin* dengan bertambahnya *flow rate* gas metan dan perubahan dominasi atom pada *dangling bond* diperkirakan karena berkurangnya densitas *dangling bond* pada atom Si yang besar dibandingkan atom C. Pengaruh peningkatan *flow rate* gas metan terhadap berkurangnya densitas *spin* melibatkan pengaruh peningkatan hidrogen dan karbon terhadap densitas *dangling bond* atom Si dan C. Peningkatan hidrogen berkontribusi pada pembentukan ikatan Si-H dan C-H yang dapat mengurangi densitas *dangling bond* atom Si dan C, sedangkan peningkatan karbon berkontribusi pada pembentukan ikatan Si-C dan C-C yang dapat mengurangi densitas *dangling bond* atom Si dan C, selain itu peningkatan karbon juga dapat meningkatkan *dangling bond* pada atom C.

Spektroskopi inframerah dapat digunakan untuk mempelajari kehadiran ikatan Si-C, Si-H dan C-H pada lapisan tipis a-SiC:H. Densitas ketiga ikatan tersebut dapat diketahui dari hasil analisis spektroskopi infra merah dan efusi hidrogen, seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa ikatan Si-H paling banyak terbentuk untuk setiap *flow rate* gas metan dibandingkan kedua ikatan yang lain, sedangkan ikatan C-H paling sedikit terbentuk hanya sekitar 0.1-0.2, dengan demikian dapat dikatakan bahwa hidrogen cenderung berikatan dengan silikon dibandingkan dengan karbon, bahkan hampir seluruh hidrogen berikatan dengan silikon. Ikatan Si-C yang ditampilkan hanya dari kurva absorpsi vibrasi Si-C di sekitar  $720\text{ cm}^{-1}$ , selain itu masih terdapat absorpsi vibrasi Si-C di sekitar  $780\text{ cm}^{-1}$  [13].

Hasil analisis inframerah dan efusi hidrogen mendukung hasil analisis yang diperoleh dari teknik ESR. Kecenderungan hidrogen berikatan dengan silikon dibandingkan dengan karbon bersesuaian dengan berkurangnya harga- $g$  dan densitas *spin*  $N_s$  dengan bertambahnya *flow rate* gas metan. Peningkatan *flow rate* gas metan akan meningkatkan densitas ikatan Si-H, Si-C dan C-H sehingga menurunkan *dangling bond* pada atom Si dan C. Kecenderungan hidrogen membentuk ikatan dengan silikon dibandingkan karbon menyebabkan densitas ikatan Si-H jauh lebih besar dibandingkan ikatan C-H sehingga berkurangnya *dangling bond* pada atom C karena peningkatan ikatan C-H sangat kecil. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa berkurangnya densitas *spin*  $N_s$  dominan disebabkan karena berkurangnya *dangling bond* pada atom Si dengan terjadinya ikatan Si-H, dan ikatan Si-C. Berkurangnya densitas *spin*  $N_s$



Gambar 4. Densitas ikatan H-Si, H-C dan Si-C untuk setiap peningkatan *flow rate* gas metan

terhadap peningkatan *flow rate* gas metan menunjukkan bahwa peningkatan *dangling bond* pada atom C dengan peningkatan konsentrasi karbon tidak terlalu signifikan, walaupun harga- $g$  pada *flow rate* gas metan tinggi (12 sccm) menunjukkan dominasi *dangling bond* pada atom C. Jumlah konsentrasi silikon pada lapisan tipis masih berada dalam kondisi silikon dominan ( $x < 0.5$ ) dan peningkatan konsentrasi karbon yang mengurangi *dangling bond* pada atom C dengan terbentuknya ikatan Si-C dan C-H masih tetap menghasilkan dominasi atom C pada *dangling bond*, dengan demikian dapat dikatakan bahwa *dangling bond* pada atom Si berkurang sangat besar dan hanya sedikit yang masih terdapat pada lapisan tipis.

## Kesimpulan

Keadaan elektron tak-berpasangan (*unpaired*) pada lapisan tipis a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H hasil deposisi metode *dc sputtering* dengan *flow rate* gas metan rendah didominasi oleh atom Si berdasarkan harga- $g$  yang diperoleh dari sinyal ESR sekitar 2.0052, sedangkan untuk *flow rate* gas metan tinggi didominasi oleh atom C dengan harga- $g$  diperoleh sekitar 2.0033. Peningkatan *flow rate* gas metan mengurangi densitas *spin* melalui saturasi ikatan dengan terbentuknya ikatan Si-H, Si-C dan C-H yang didukung hasil eksperimen inframerah dan efusi hidrogen. Elektron atom Si yang tak-berpasangan sangat banyak yang mengalami saturasi ikatan dengan peningkatan *flow rate* gas metan dibandingkan atom C.

### Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini terlaksana atas bantuan Lusitra Munisa dan dukungan hibah tim penelitian proyek URGE Batch III dengan nomor kontrak 005/HTPP-III/URGE/1997 serta kerja sama International Bureau of BMBF (Germany) dengan Universitas Indonesia (Indonesia).

### Daftar Acuan

1. S. Tusso, C. Vasi, F. Barreca, F. Neri, *J. Vac. Sci. Technol. A* 16 (1998) 3020.
2. H. Dersch, J. Stuke, J. Beichler, *Phys. Stat. Sol. (b)* 107 (1981) 307.
3. A. Morimoto, T. Miura, M. Kumeda, T. Shimizu, *Jap. J. Appl. Phys.* 21 (1982) L119.
4. I. Watanabe, K. Sugata, *Jap. J. Appl. Phys.* 27 (1988) 1808.
5. M. Hoinkis, E.D. Tober, R.L. White, M.S. Crowder, *Appl. Phys. Lett.* 61 (1992) 2653.
6. Y. Hishikawa, S. Tsuge, N. Nakamura, S. Tsuda, S. Nakano, Y. Kuwano, *J. Appl. Phys.* 69 (1991) 508.
7. R. Saleh, L. Munisa, W. Beyer, R. Carius, F. Finger, *Phys. J. Ind. Phys. Soc.* 2 (1999) 41.
8. A. Morimoto, T. Miura, M. Kumeda, T. Shimizu, *Jap. J. Appl. Phys.* 20 (1981) L833.
9. Baojie Yan, P.C. Taylor, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 507 (1998) 805.
10. A. L. Baia Neto, R.A. Santos, F.L. Freire, Jr., S.S. Camargo, Jr., R. Carius, F. Finger, W. Beyer, *Thin Solid Films* 293 (1997) 206.
11. P. H. Gaczi, D.C. Booth, *Solar Energy Mater.* 4 (1981) 297.
12. T. Shimizu, M. Kumeda, Y. Kirimaya, *Solid State Commun.* 37 (1981) 699.
13. Rosari Saleh, Lusitra Munisa, *Makara Seri Sains & Teknologi* No.7 (2000) 54.

