

# Efek doping Al pada sifat optik dan listrik lapisan tipis ZnO hasil deposisi dengan *DC sputtering*

Sri Yani Purwaningsih,<sup>1</sup> Karyono,<sup>2</sup> dan Sudjatmoko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

<sup>2</sup>Jurusan Fisika FMIPA Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

<sup>3</sup>Badan Tenaga Nuklir Nasional, Kotak Pos 1008, Yogyakarta 55010

(Tanggal: May 30, 2005)

## Intisari

Telah dilakukan deposisi lapisan tipis ZnO didoping Al (ZnO:Al) pada substrat kaca dengan DC *sputtering*. Struktur kristal lapisan dikarakterisasi dengan difraksi sinar-X (XRD). Hasil XRD menunjukkan bahwa lapisan tipis ZnO:Al yang terdeposit pada substrat kaca adalah polikristal yang terorientasi dengan sumbu-c tegak lurus pada permukaan substrat. Orientasi kristalografi dipengaruhi oleh suhu substrat dan konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sifat optik lapisan diukur dengan spektrofotometer *UV-Visible* pada suhu kamar, hasilnya menunjukkan bahwa transmitansi rata-rata lapisan adalah 85,5% dalam rentang panjang gelombang (350~1100) nm. Indeks bias lapisan yang diperoleh meningkat dengan bertambahnya konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan menurun pada konsentrasi 3%. Sifat listrik lapisan tipis ZnO:Al ditentukan dengan metode I-V, dan hasilnya menunjukkan bahwa resistivitas listrik sebesar  $(108 \pm 4) \times 10^{-6} \Omega\text{m}$  telah diperoleh pada konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2%. © 2005 Jurusan Fisika FMIPA ITS

KATA KUNCI: *sputtering*, ZnO:Al, XRD, sifat optik dan sifat listrik

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu dan teknologi dewasa ini tidak terlepas dari rekayasa penggunaan material dalam bentuk lapisan padat tipis. Lapisan tipis adalah suatu lapisan yang mempunyai ketebalan dari orde angstrom hingga mikrometer. Lapisan tipis dapat dibuat dari bahan organik, anorganik, logam maupun campuran logam-organik (*organometallic*) yang memiliki sifat-sifat konduktor, semikonduktor, superkonduktor maupun insulator [1, 2].

Pada tahun-tahun terakhir ini telah banyak dilakukan penelitian tentang lapisan tipis ZnO dan pemanfaatannya dalam berbagai bidang. Pemanfaatan lapisan tipis ZnO tersebut disebabkan karena ZnO adalah bahan semikonduktor intrinsik tipe-n dengan celah pita energi 3,2 eV pada suhu 298 K, mempunyai struktur hexagonal dengan tipe kristal *wurtzite*, parameter kisi pada sumbu a = 3,2495 Å dan sumbu c = 5,2069 Å. Sifat-sifat yang menarik dari bahan ZnO lainnya adalah anisotropi dalam struktur kristal, struktur cacat *non-stoichiometric*, transparansi optik dalam daerah visible dan indeks biasnya cukup tinggi. Berdasarkan sifat-sifat tersebut, lapisan tipis ZnO dapat dimanfaatkan sebagai lapisan jendela dan elektroda depan yang sangat konduktif dan transparan pada sel surya silikon amorf (a-Si)[3, 4].

Beberapa teknik deposisi yang telah dikembangkan untuk menghasilkan lapisan tipis pada berbagai macam

substrat, antara lain : *sputtering*, *spray pyrolysis*, *ion plating*, *CVD (Chemical Vapour Deposition)*, *MOCVD (Metal Organic Chemical Vapour Deposition)* dan *sol-gel* [3]. Teknik yang sering digunakan untuk menghasilkan lapisan tipis ZnO adalah *sputtering*. *Sputtering* melibatkan pemindahan atom-atom target akibat tumbukan dengan ion-ion berenergi tinggi yang dipercepat dengan tegangan tinggi, sehingga atom-atom target dapat terlepas dari ikatannya dan terdeposit pada substrat membentuk lapisan tipis [5].

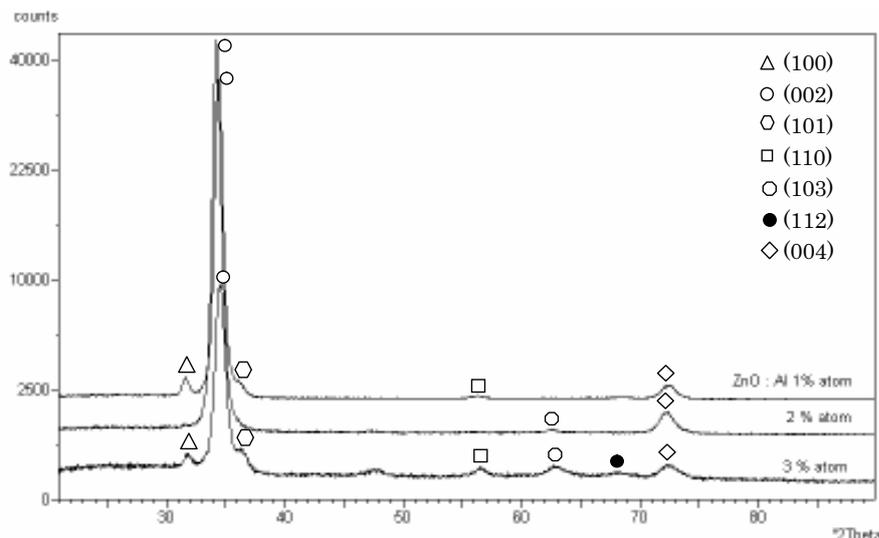
Tujuan penelitian ini adalah mengoptimalkan konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> agar menghasilkan lapisan tipis ZnO:Al yang sangat konduktif dan transparan dengan DC *sputtering*, sehingga lapisan tipis yang diperoleh dapat dikembangkan sebagai lapisan jendela (*window*) dan elektrode depan pada sel surya a-Si.

## II. TATA KERJA DAN PERCOBAAN

### A. Persiapan Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan target yang disinter adalah ZnO dalam bentuk serbuk dengan kemurnian 99,8% dan doping Al diperoleh dari Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan kemurnian 99,3%. Konsentrasi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang ditambahkan dalam ZnO divariasikan 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5% dan 3%.

Prosedur kerja pembuatan target yaitu serbuk ZnO dan



Gambar 1: Pola difraksi sinar-X lapisan tipis ZnO:Al yang dibuat pada tekanan  $6 \times 10^{-2}$  torr, waktu deposisi 1,5 jam dan suhu substrat  $450^\circ\text{C}$  untuk konsentrasi doping  $\text{Al}_2\text{O}_3$  : (a) 1%, (b) 2% dan (c) 3%

$\text{Al}_2\text{O}_3$  ditimbang, kemudian dicampur dan dipanaskan (sintering) pada suhu  $600^\circ\text{C}$  selama 15 menit. Serbuk panas tersebut dimasukkan ke dalam wadah peletisasi lalu dilakukan penekanan panas dengan tekanan  $17 \text{ kN/m}^2$ , sehingga berbentuk pelet. Pelet dipanaskan lagi pada suhu  $650^\circ\text{C}$  selama 1 jam. Target yang terbentuk berdiameter 60 mm dan tebal 2 mm. Substrat (kaca preparat) dipotong dengan ukuran  $10 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ , selanjutnya dibersihkan dengan air, deterjen dan alkohol dalam *ultrasonic cleaner*. Substrat dikeringkan dalam oven dan disimpan ke dalam desikator.

Lapisan tipis ZnO:Al dideposisikan dengan DC *sputtering* yang komponen utamanya terdiri dari: (1) tabung lucutan berbentuk silinder yang di dalamnya terdapat sepasang elektroda, pada katoda dilengkapi dengan sistem pendingin target, sedangkan pada anoda dipasang sistem pemanas substrat dan pengatur suhu, (2) pompa vakum rotari dan difusi, (3) sistem tegangan tinggi DC, (4) sistem pengatur masukan gas argon.

**B. Proses Deposisi Lapisan Tipis ZnO:Al**

Prosedur kerja pembuatan lapisan tipis ZnO:Al adalah target dipasang pada katoda dan substrat diletakkan pada anoda, jarak target dengan substrat diatur 2 cm. Substrat dipanaskan pada suhu  $450^\circ\text{C}$  dengan mengatur pengontrol suhu. Tabung lucutan dihampakan dengan pompa rotari dan pompa difusi hingga mencapai tekanan  $10^{-5}$  torr. Proses deposisi dilakukan dalam lingkungan gas argon murni yang dialirkan secara kontinu ke dalam tabung lucutan dan dipertahankan pada tekanan kerja  $6 \times 10^{-2}$  torr, tegangan antara 2 elektrode 2,5 kV dengan arus 8 mA. Daya yang digunakan selama proses deposisi sebesar 20

watt.

**C. Karakterisasi Lapisan Tipis ZnO:Al**

Orientasi atau arah sumbu kristal lapisan tipis ZnO:Al yang terdeposit pada substrat kaca ditentukan dengan pengukuran difraksi sinar-X (XRD) menggunakan radiasi  $\text{Cu K}\alpha$  yang memiliki panjang gelombang  $1,54056 \text{ \AA}$ . Pengukuran transmitansi optik lapisan tipis ZnO:Al dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis Shimadzu model 1601PC dengan rentang panjang gelombang (350–1100) nm. Resistansi lapisan tipis ZnO:Al diukur dengan metode I-V, sedangkan resistivitas listrik lapisan dihitung berdasarkan persamaan Smits.

**III. HASIL DAN PEMBAHASAN**

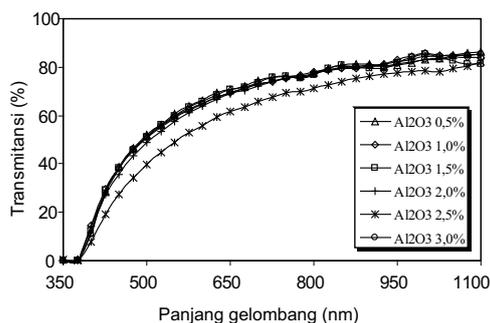
Pola difraksi sinar-X lapisan tipis ZnO:Al yang didepositkan pada substrat kaca dengan konsentrasi doping  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1%, 2% dan 3% pada tekanan  $6 \times 10^{-2}$  torr, waktu deposisi 1,5 jam dan suhu substrat  $450^\circ\text{C}$  ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan analisis struktur kristal lapisan pada konsentrasi doping  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1%, teramati beberapa puncak pada  $2\theta = 31,6^\circ, 34,4^\circ, 36,3^\circ, 56,2^\circ$  dan  $72,1^\circ$  yang bersesuaian dengan puncak (100), (002), (101), (110) dan (004) yang berasal dari fase hexagonal ZnO. Pola difraksi sinar-X yang ditunjukkan pada Gambar 1 sangat berbeda untuk konsentrasi doping  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2%, hanya teramati 3 puncak pada  $2\theta = 34,2^\circ, 62,5^\circ$  dan  $72,05^\circ$  yang bersesuaian dengan puncak (002), (103) dan (004), sedangkan puncak-puncak lainnya seperti (100), (101), (110) tidak terdeteksi dalam lapisan ini. Pola

difraksi sinar-X lapisan tipis ZnO:Al dengan konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3% menunjukkan beberapa puncak (100), (002), (101), (110), (103), (112) dan (004), dengan intensitas puncak (112) sangat kecil.

Pola difraksi sinar-X (Gambar 1) memperlihatkan intensitas yang relatif besar pada puncak (002) dibandingkan puncak-puncak lainnya. Nilai intensitas puncak (002) yang diperoleh pada konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1%, 2% dan 3% masing-masing sebesar 34620,44 cacah, 41568,41 cacah dan 9177,10 cacah. Berdasarkan hasil tersebut intensitas puncak (002) yang tertinggi dicapai pada konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2% dan mengalami penurunan sangat signifikan pada konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3%. Menurut Minami, penurunan tinggi puncak (002) berhubungan dengan pembentukan partikel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang tersegregasi pada batas butir akibat kandungan Al yang berlebihan dalam lapisan pada suhu tinggi dan menghalangi pertumbuhan kristal ZnO [6].

Menurut Wasa dan Hayakawa, Puchert bahwa puncak difraksi lapisan tipis ZnO:Al dominan pada puncak (002) dengan sudut  $2\theta = 34,4^\circ$  yang bersesuaian dengan refleksi puncak (002) memiliki intensitas sangat kuat dan memperlihatkan sifat kristal yang bagus dengan butir-butir terorientasi ke arah sumbu-c tegak lurus pada permukaan substrat, sedangkan refleksi puncak (100) dan (110) menunjukkan butir-butir terorientasi dengan sumbu-c sejajar pada permukaan substrat. Puncak (002) tersebut muncul dari difraksi bidang dasar ZnO, karena kristal ZnO cenderung tumbuh secara alami berupa batang hexagonal yang panjang ke arah sumbu-c, sehingga struktur kristal lapisan tipis ZnO terdiri dari butir-butir *columnar* yang berdiri tegak lurus pada permukaan substrat [2, 7].

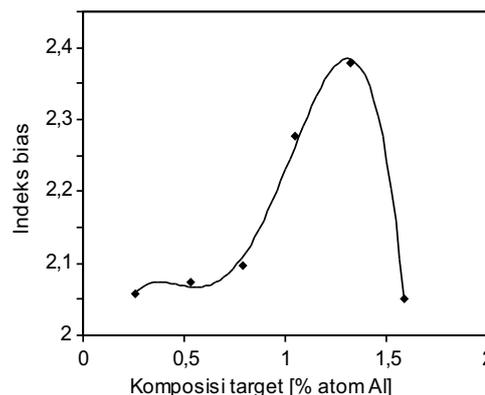
Gambar 2 menunjukkan spektrum transmitansi optik lapisan tipis ZnO:Al sebagai fungsi panjang gelombang yang dibuat pada tekanan  $6 \times 10^{-2}$  torr, waktu deposisi 1,5 jam dan suhu substrat 450°C pada berbagai konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Berdasarkan hasil pengukuran yang ditampilkan pada Gambar 2, terlihat bahwa trans-



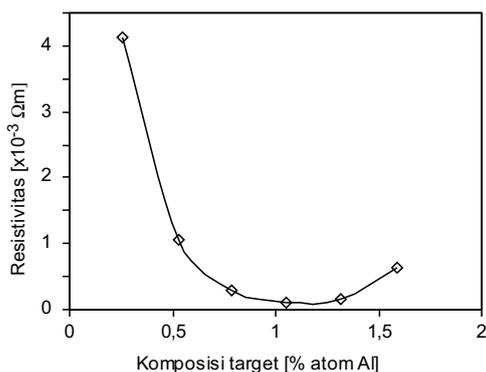
Gambar 2: Spektrum transmitansi optik lapisan tipis ZnO:Al sebagai fungsi panjang gelombang yang dibuat pada tekanan  $6 \times 10^{-2}$  torr, waktu deposisi 1,5 jam dan suhu substrat 450°C pada berbagai konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

mitansi optik lapisan tipis ZnO:Al pada berbagai konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hampir konstan hingga konsentrasi 2% dan menurun sangat signifikan pada konsentrasi 2,5%, selanjutnya meningkat lagi pada konsentrasi 3%. Menurut Ohring, penurunan transmitansi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jumlah atom Al yang masuk ke dalam kisi ZnO, ukuran butir kristal, permukaan lapisan bertekstur, kekasaran permukaan, kerapatan lapisan, pembentukan senyawa lain yang tumbuh pada waktu yang sama dengan lapisan ZnO:Al dan serapan pembawa bebas. Selain itu Al juga merupakan logam yang bersifat memantulkan cahaya datang dan memiliki reflektansi cukup tinggi dalam daerah tampak (*visible*), sehingga Al mempengaruhi transmisi cahaya yang melewati lapisan tipis [2]. Nilai transmitansi rata-rata lapisan tipis ZnO:Al yang diperoleh pada berbagai konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sekitar 85,5% dalam rentang panjang gelombang (350–1100) nm.

Gambar 3 menunjukkan grafik hubungan indeks bias lapisan tipis ZnO:Al terhadap komposisi target yang dinyatakan dalam % atom Al. Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 3, terlihat bahwa indeks bias lapisan tipis ZnO:Al cenderung meningkat dengan bertambahnya konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, namun pada konsentrasi doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3% terjadi penurunan indeks bias sebesar  $2,05 \pm 0,013$ . Menurut Chopra, pengaruh doping Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang berlebihan dalam ZnO dapat menyebabkan pertumbuhan lapisan tipis yang disertai dengan pembentukan sejenis Al, Al<sup>3+</sup> atau Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang terletak pada batas-batas butir [8]. Menurut Ohring, pembentukan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang memisah pada batas-batas butir menyebabkan lapisan tipis menjadi porous karena adanya pori-pori mikro. Pori-pori mikro ini akan mengurangi kerapatan atom-atom dalam lapisan tipis yang mengakibatkan indeks biasnya menurun. Indeks bias  $n_f$  mempunyai hubungan dengan kerapatan lapisan



Gambar 3: Grafik hubungan indeks bias lapisan tipis ZnO:Al terhadap komposisi target



Gambar 4: Resistivitas lapisan tipis ZnO:Al sebagai fungsi komposisi target yang dibuat pada tekanan  $6 \times 10^{-2}$  torr, waktu deposisi 1,5 jam dan suhu substrat  $450^\circ C$

berdasarkan persamaan Lorentz-Lorentz [2], yaitu:

$$\rho_f = \frac{3}{4\pi N_A} \left( \frac{n_f^2 - 1}{n_f^2 + 2} \right) \frac{M}{\alpha_p} \quad (1)$$

dengan  $\rho_f$  adalah kerapatan lapisan,  $N_A$  adalah bilangan Avogadro,  $M$  adalah berat molekul dan  $\alpha_p$  adalah polarisabilitas. Persamaan (1) menunjukkan bahwa indeks bias lapisan tipis akan menurun dengan berkurangnya kerapatan lapisan.

Gambar 4 menunjukkan resistivitas lapisan tipis ZnO:Al sebagai fungsi komposisi target (dalam % atom Al) yang dibuat pada tekanan  $6 \times 10^{-2}$  torr, waktu deposisi 1,5 jam dan suhu substrat  $450^\circ C$ . Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4, terlihat bahwa resistivitas lapisan tipis ZnO:Al berangsur-angsur menurun dengan bertambahnya konsentrasi doping  $Al_2O_3$  dan mencapai nilai optimum pada konsentrasi doping 2% (1,06% atom Al) sebesar  $(108 \pm 4,23) \times 10^{-6} \Omega m$ , selanjutnya resistivitasnya meningkat lagi pada konsentrasi doping 2,5% (1,32% atom Al) dan 3% (1,59% atom Al). Perilaku yang demikian disebabkan oleh substitusi doping  $Al^{3+}$  pada tempat-tempat  $Zn^{2+}$  menciptakan satu tambahan pembawa bebas dalam proses. Selama level doping  $Al_2O_3$  bertambah, atom-atom dopan lebih banyak mengisi tempat-tempat kisi atom-atom seng, sehingga menghasilkan pembawa-pembawa muatan lebih banyak. Tetapi, setelah mencapai level doping tertentu, atom-atom dopan dalam butir kristal dan batas-batas butir cenderung jenuh. Dalam kondisi ini, konsentrasi doping yang lebih tinggi akan menyebabkan jumlah impuritas terionisasi

yang besar. Impuritas terionisasi ini memberikan pusat-pusat hamburan yang kuat untuk pembawa-pembawa muatan.

Menurut persamaan conwell-weisskofft, ketika pembawa-pembawa muatan degenerate dihamburkan oleh ion impuritas, ketergantungan energi terhadap mobilitas hamburan impuritas terionisasi dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut [9]:

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{e}{m^*} \tau_i(E_F) \\ &= \sqrt{\frac{2}{m^*}} \frac{\sqrt{\epsilon E_F^3}}{\pi e^3 N_i Z^2} \frac{1}{\ln \left( 1 + \frac{\epsilon E_F}{N_i^{1/3} Z e^2} \right)} \quad (2) \end{aligned}$$

dengan  $\tau_i$  adalah waktu relaksasi, dengan memperhitungkan peristiwa hamburan yang terjadi dekat level Fermi  $E_F$ ,  $\epsilon$  adalah tetapan dielektrik statik lapisan,  $m^*$  adalah massa efektif elektron,  $e$  adalah muatan ion dan  $N_i$  adalah konsentrasi pusat-pusat hamburan. Berdasarkan persamaan (2) terlihat bahwa konsentrasi doping yang tinggi akan menyebabkan jumlah impuritas terionisasi yang lebih besar dan mengakibatkan pengurangan pada mobilitas lapisan tipis ZnO:Al.

Hasil karakterisasi sifat listrik yang ditunjukkan pada Gambar 4, terlihat bahwa doping  $Al_2O_3$  yang optimum dalam lapisan tipis ZnO:Al yang dibuat pada tekanan  $6 \times 10^{-2}$  torr, waktu deposisi 1,5 jam dan suhu substrat  $450^\circ C$  dicapai pada konsentrasi 2%.

#### IV. KESIMPULAN

Lapisan tipis ZnO:Al telah berhasil didepositkan pada substrat kaca dengan DC sputtering. Hasil analisis difraksi sinar-X menunjukkan bahwa lapisan tipis ZnO:Al yang terbentuk pada substrat kaca memiliki orientasi bidang (002), yang berarti kristal-kristalnya terorientasi kuat dengan sumbu-c tegak lurus pada permukaan substrat untuk konsentrasi doping  $Al_2O_3$  2%. Transmittansi rata-rata lapisan tipis ZnO:Al diperoleh sekitar 85,5% dalam rentang panjang gelombang (350–1100) nm. Indeks bias lapisan tipis ZnO:Al meningkat terhadap konsentrasi doping  $Al_2O_3$  dan mengalami penurunan pada konsentrasi doping 3%. Resistivitas listrik lapisan yang paling rendah adalah  $(108 \pm 4) \times 10^{-6} \Omega m$  dan diperoleh pada konsentrasi doping  $Al_2O_3$  yang optimum sebesar 2%.

[1] M. Komuna, *Film Deposition by Plasma Techniques* (Springer-Verlag, New York, USA, 1991).  
 [2] M. Ohring, *The Materials Science of Thin Films* (Academic Press Inc, Harcourt Brace Jovanovich, Boston, 1992).

[3] F. C. M. V. D. Pol, *J. Ceramic Bulletin* **69**, 741 (1990).  
 [4] W. Wilson, *Study of Transparent Conducting ZnO Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition and Its Applications to Amorphous Silicon Solar Cell* (Dissertation, Tokyo

- Institute of Technology, Japan, 1994).
- [5] K. Wasa and S. Hayakawa, *Handbook of Sputter Deposition Technology, Principles, Technology and Applications* (Noyes Publications, Osaka, Japan, 1992).
- [6] T. Minami, *Appl. Phys. Lett.* **41** (1982).
- [7] M. K. Puchert, *J. Applied Physics* **14** (1996).
- [8] K. L. Chopra, *Thin Solid Films* **280**, 20 (1996).
- [9] M. Jin, *Thin Solid Films* **357** (1999).

**Kumpulan Intisari Seminar**  
**Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya**

---

---