

PENENTUAN TEBAL BAHAN TRANSPARAN (ZnO) MENGGUNAKAN INTERFEROMETER MICHELSON

Sulung Edy Nugroho¹, K. Sofyan Firdausi², Indras Marhaendarjaya²

(¹ Mahasiswa Fisika FMIPA Undip, ² Dosen Fisika Fakultas FMIPA Undip)

Laboratorium Elektronika-Optik dan Laser Jurusan Fisika FMIPA Undip

ABSTRACT

Thickness determination of ZnO transparent material on a substrate (microscope slide) by using Michelson Interferometer has been carried out.

Materials which used in the research were a microscope slide, which thickness of 1 mm, and ZnO transparent material on a 1 mm microscope slide. Refractive index of the microscope slide and the thickness of ZnO were measured by counting the fringes transitions as the materials rotated large as ϕ , on the other words, fringes transitions N as function of sinus incident angles ϕ of laser ray, $N \equiv N(\sin \phi)$. Incident angles of laser ray, which are used in the measurement of refractive index of microscope slide and of ZnO transparent material thickness on microscope slide, are 1° , 2° , 3° , 4° , 5° , 6° , 7° , 8° , 9° , dan 10° . Laser ray used in this research was He-Ne laser, which has $\lambda = 633$ nm and its output power was < 1 mW.

The results of this research show that there were N fringes transitions as research-materials rotated large as ϕ . Those measured fringes transitions still have remarkable agreement with the theoretical fringes transitions, by which has to be compared. As the incident angles get bigger, the fringes transitions N get bigger too. The thickness of the ZnO thin film, which was resulted from the research, was $(6.0 \pm 1.8) \times 10^{-5}$ m.

INTISARI

Telah dilakukan penelitian untuk menentukan tebal bahan transparan (ZnO) pada suatu substrat (kaca preparat) dengan menggunakan Interferometer Michelson.

Bahan yang digunakan berupa kaca preparat dengan tebal 1 mm dan kaca preparat berlapis ZnO. Indeks bias kaca preparat dan tebal lapisan tipis ZnO pada kaca preparat dapat diketahui dengan menghitung jumlah perubahan frinji atau transisi frinji N akibat bahan-transparan-uji diputar sebesar ϕ , atau dengan kata lain, jumlah perubahan frinji N sebagai fungsi sinus sudut datang ϕ sinar laser, $N \equiv N(\sin \phi)$. Besar sudut datang sinar laser yang digunakan untuk penentuan indeks bias kaca preparat tebal lapisan ZnO pada kaca preparat adalah sebesar 1° , 2° , 3° , 4° , 5° , 6° , 7° , 8° , 9° , dan 10° . Sinar laser yang digunakan berupa sinar laser He-Ne dengan $\lambda = 633$ nm dan daya keluaran < 1 mW.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat jumlah perubahan frinji N akibat bahan-transparan-uji diputar sebesar ϕ . Bila dibandingkan jumlah perubahan frinji hasil teori, jumlah perubahan frinji N hasil eksperimen ternyata masih sesuai. Makin besar sudut datang ϕ maka makin besar pula jumlah perubahan frinji. Tebal lapisan tipis ZnO hasil penelitian ini adalah sebesar $(6,0 \pm 1,8) \times 10^{-5}$ m.

PENDAHULUAN

ZnO (seng oksida) merupakan semikonduktor II-VI dengan *band-gap* lebar, yaitu $E_g = 3,3$ eV [1]. Beberapa tahun terakhir, terdapat peningkatan penelitian berkenaan aplikasi ZnO, sehingga menjadikan lapisan tipis ZnO dipertimbangkan sebagai pesaing ITO (*indium tin oxide*) dalam penggunaannya sebagai elektroda transparan [2]. Lapisan tipis logam oksida memiliki aplikasi yang luas, antara lain alat gelombang akustik permukaan (*surface acoustic wave devices*/SAW), alat gelombang bulk akustik (*bulk acoustic wave devices*/BAW), alat optik-akustik (*acoustic-optic devices*), sistem mikro-elektromekanik (*micro-electromechanical systems*), filter lolos pita (*band pass filters*), pandu gelombang optik (*optical wave-guide*) dan deflektor laser yang menggunakan kesifatan piezoelektrik dan piezooptik [3].

Studi terakhir yang berkaitan dengan penentuan tebal lapisan ZnO pada kaca preparat berlapis ZnO menggunakan interferometer Michelson dilakukan oleh Muhamad Adi. Bahan-transparan-uji yang digunakan oleh Muhamad Adi berupa kaca preparat dengan tebal 1 mm, dan kaca preparat berlapis ZnO dengan tebal kaca preparat sebesar 1 mm. Tebal lapisan ZnO pada kaca preparat berlapis ZnO tersebut

yang didapatkan oleh Muhamad Adi adalah sebesar $5,4 \times 10^{-5}$ m [4], dengan menggunakan persamaan $N \equiv N(\sin \phi)$ untuk satu lapisan bahan transparan sehingga transisi frinji N untuk lapisan ZnO didapat dari pengurangan transisi frinji N kaca preparat berlapis ZnO dikurangi transisi frinji N kaca preparat.

Berdasarkan pemisahan gelombang-primer cahaya untuk menghasilkan pola interferensi, interferometer terbagi menjadi dua jenis, antara lain interferometer pemisah gelombang-muka (*wavefront splitting interferometer*) dan interferometer pemisah amplitudo (*amplitude splitting interferometer*). Dari sekian banyak jenis interferometer pemisah amplitudo, interferometer Michelson yang paling terkenal dan, secara historis, yang terpenting. Beberapa contoh aplikasi interferometer Michelson, antara lain pengukuran satuan panjang baku, indeks bias bahan transparan dan laju cahaya dalam ruang vakum [5].

Dalam penelitian ini digunakan interferometer Michelson untuk mendapatkan tebal lapisan bahan transparan ZnO yang melekat pada kaca preparat dengan menggunakan persamaan $N \equiv N(\sin \phi)$ untuk dua lapisan bahan transparan. Karena menggunakan sumber monokromatik, maka jumlah perubahan

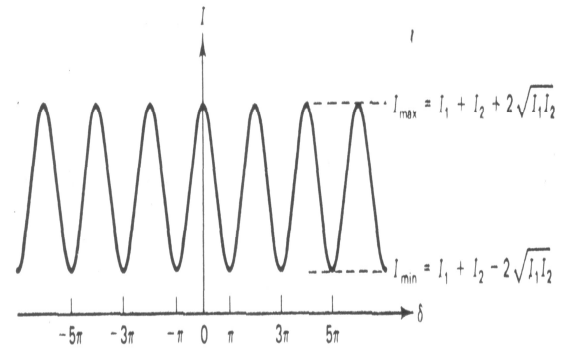
frinji yang dihasilkan dari pergeseran cermin-tetap tak terbedakan, jumlah perubahan frinji dihitung dengan merotasikan kaca preparat berlapis ZnO sebesar ϕ tertentu.

DASAR TEORI

Tinjau dua gelombang cahaya yang diwakili oleh medan listrik E_1 dan E_2 . Kedua gelombang cahaya tersebut, dalam kasus interferensi, dihasilkan oleh suatu sumber cahaya dan digabungkan (*reunite*) setelah melalui lintasan-lintasan yang berbeda. Pedrotti [6] menyatakan bahwa intensitas cahaya (hasil interferensi gelombang cahaya E_1 dan E_2) pada titik P I_p adalah sebesar :

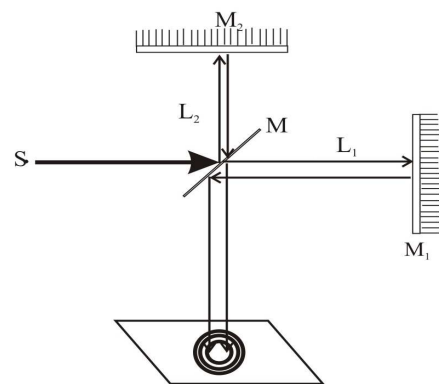
$$I_p = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (2.1)$$

Besar $I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$ bergantung pada apakah nilai $\cos \delta > 0$ atau $\cos \delta < 0$, yang berakibat menambah atau mengurangi nilai I_p . Pola interferensi (garis-garis / cincin-cincin interferensi atau frinji interferensi) akan teramati bila kedua gelombang cahaya yang saling berinterferensi memiliki beda fase yang konstan (meski fase kedua gelombang tersebut berbeda) [5].



Gambar 2.1 Intensitas pola interferensi sebagai fungsi beda fase δ

Gambar 2.2 mengilustrasikan konfigurasi Interferometer Michelson. Berkas cahaya dari sumber cahaya monokromatik S jatuh pada cermin setengah mengkilat (*beam splitter*) M. Untuk sederhananya, dalam gambar 2.2 dianggap bahwa tebal cermin tersebut dapat diabaikan. Di M cahaya terbagi menjadi dua gelombang. Yang satu oleh transmisi menuju cermin M_1 , yang lain oleh refleksi menuju ke M_2 . Oleh masing-masing, kedua sinar ini direfleksikan kembali ke arah datangnya, dan akhirnya jatuh pada layar.



Gambar 2.2 Skema Interferometer Michelson

Karena keduanya berasal dari sumber cahaya yang sama, maka keduanya saling koheren dan dapat berinterferensi. Andaikan pusat dari pola lingkaran interferensi yang terjadi kelihatan terang. Bila M_2 digeser sedemikian rupa sehingga cincin terang pertama berubah menjadi pusat pola (interferensi), maka lintasan cahaya yang menumbuk M_2 telah berubah sebesar satu panjang gelombang. Karena cahaya dua kali (bolak-balik) melalui lintasan udara yang sama, maka berarti cermin M_2 telah mundur sejauh setengah panjang gelombang [7].

Berubahnya cincin terang pertama menjadi pusat terang tersebut mengindikasikan adanya perubahan beda fase $\Delta\delta$ dan perubahan beda lintasan optis Δd karena [5] :

$$\Delta\delta = k\Delta d = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Delta d. \quad (2.2)$$

Secara umum dengan mengacu pada gambar 2.1, perubahan beda fase sebesar :

$$\Delta\delta = (2\Delta m + 1)\pi, \quad \Delta m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.3)$$

, antara kedua gelombang cahaya \mathbf{E}_1 dan \mathbf{E}_2 dari Interferometer Michelson yang saling berinterferensi pada layar, menyebabkan cincin/garis terang (gelap) pada suatu titik referensi (dekat pusat pola interferensi) pada layar berubah menjadi cincin/garis gelap (terang). Berdasar gambar 2.1 pula, perubahan beda fase $\Delta\delta$

yang bernilai :

$$\Delta\delta = \Delta m 2\pi, \quad \Delta m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.4)$$

akan menyebabkan cincin/garis terang (gelap) pada suatu titik referensi (dekat pusat pola interferensi) pada layar kembali ditempati cincin terang/gelap.

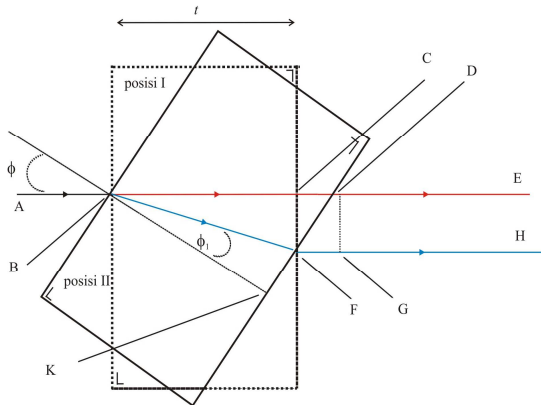
Menurut Morgan [8] dan Jenkins dan White [9], penentuan jumlah perubahan frinji N dapat dilakukan dengan memutar kaca preparat sebesar ϕ secara perlahan sehingga pemanjangan lintasan optis merupakan fungsi tebal kaca preparat t , sudut datang ϕ sinar monokromatik terhadap sumbu normal pelat kaca dan indeks bias kaca preparat n_1 . Hubungan antara jumlah perubahan frinji N terhadap sinus sudut datang ϕ sinar laser pada kaca preparat adalah :

$$\frac{2}{\lambda} \left\{ t \left(n_1^2 - \sin^2 \phi \right)^{1/2} - t \left(1 - \sin^2 \phi \right)^{1/2} + t - t n_1 \right\} = N. \quad (2.5)$$

Indeks bias kaca preparat n_1 dalam persamaan (2.5) dapat dihitung bila tebal kaca preparat t , sudut datang ϕ sinar monokromatik (yang didapat dengan memutar kaca preparat sebesar ϕ terhadap garis normal kaca preparat pada salah satu berkas cahaya pada Interferometer Michelson), dan jumlah perubahan frinji N

diketahui [8] yang dinyatakan oleh :

$$n_1 = \frac{(2t - N\lambda)(1 - \cos\phi) + \left(\frac{N^2\lambda^2}{4t}\right)}{2t(1 - \cos\phi) - N\lambda} \quad (2.6)$$



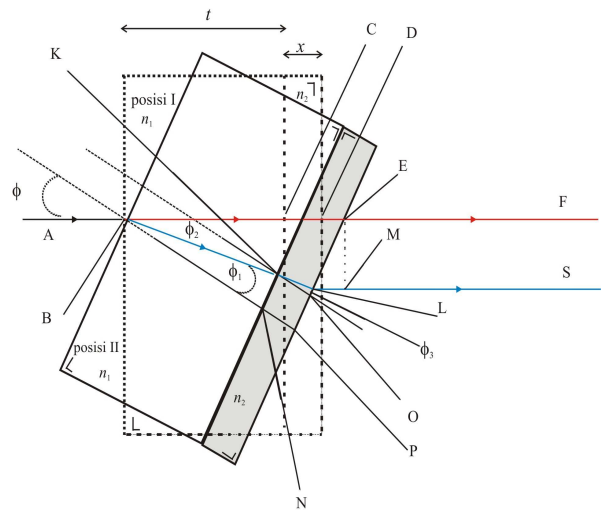
Gambar 2.3 Penentuan indeks bias kaca preparat menggunakan interferometer Michelson

Persamaan (2.5) tidak dapat digunakan dalam perhitungan tebal bahan transparan ZnO, dalam penelitian ini, karena lapisan ZnO melekat pada kaca preparat, atau dengan kata lain terdapat dua lapisan yang berbeda dalam sampel lapisan bahan transparan yang digunakan yang digunakan. Gambar 2.4 memperlihatkan penentuan tebal x lapisan ZnO berindeks bias n_2 , yang melekat pada kaca preparat menggunakan interferometer Michelson. Jumlah perubahan frinji atau transisi frinji N pada kaca preparat berlapis ZnO sebagai fungsi sinus sudut datang ϕ , $N \equiv N(\sin\phi)$, dinyatakan oleh persamaan (2.7) di bawah :

$$N = \frac{2}{\lambda} \left\{ (n_1^2 - \sin^2\phi)^{1/2} - t(1 - \sin^2\phi)^{1/2} + t - n_1t + x(n_2^2 - \sin^2\phi)^{1/2} - x(1 - \sin^2\phi)^{1/2} + x - n_2x \right\} \quad (2.7)$$

Perhitungan tebal lapisan ZnO menggunakan persamaan (2.8) (yang didapat dari manipulasi persamaan (2.7)), yaitu :

$$x = \frac{N\lambda}{2} \frac{\left\{ (n_1^2 - \sin^2\phi)^{1/2} - \cos\phi + 1 - n_1 \right\}}{\left\{ (n_2^2 - \sin^2\phi)^{1/2} - \cos\phi + 1 - n_2 \right\}} \quad (2.8)$$



Gambar 2.4 Penentuan tebal lapisan ZnO pada kaca preparat berlapis ZnO menggunakan Interferometer Michelson. n_1 , n_2 , t dan x berturut-turut adalah indeks bias kaca preparat, indeks bias lapisan ZnO, tebal kaca preparat dan tebal lapisan ZnO.

METODE PENELITIAN

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Seperangkat Precision Michelson buatan PASCO Scientific, USA ; tersusun dalam mode interferometer Michelson
2. Dudukan atur laser He-Ne buatan

PASCO Scientific, USA

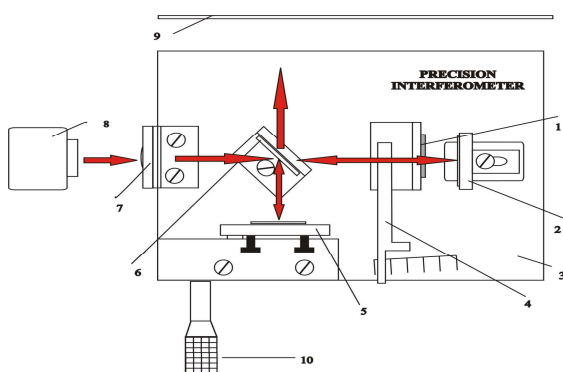
3. Layar bermistar
 4. Laser He-Ne buatan JDS Uniphase, Singapura. Panjang gelombang λ : 633 nm.
 5. Kamera CCD (Charge Coupled Device)
- Sedangkan bahan yang digunakan berupa :

1. Kaca preparat dengan tebal 1 mm
2. Kaca preparat berlapis ZnO dengan tebal kaca preparat 1 mm

Cara Kerja :

1. Mempersiapkan sampel
2. Mengoptimalkan interferometer Michelson
3. Meletakkan sampel dan pointer sudut pada interferometer Michelson
4. Mengukur transisi frinji untuk masing-masing $\phi = 1^\circ$ hingga 10° (kenaikan 1°)
5. Menganalisa dan membahas analisa

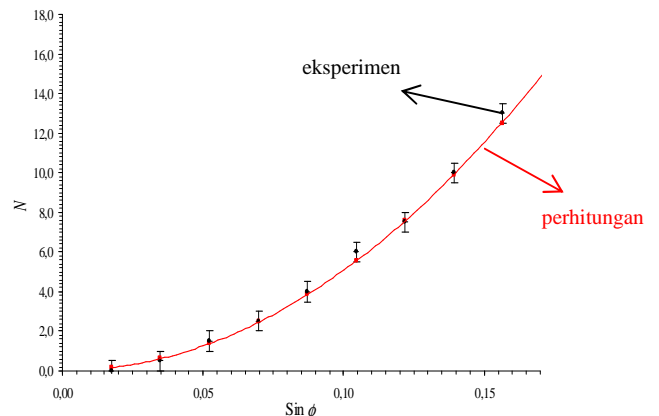
Skema Alat Penelitian



Gambar 3.1 Rangkaian peralatan yang digunakan dalam penelitian, 1.Sampel (kaca preparat dan kaca preparat-ZnO), 2.Cermin-geser, 3.Kotak-dasar Interferometer Michelson, 4.Penunjuk sudut, 5.Cermin-atur, 6.Beam splitter, 7.Lensa positif, 8.Laser He-Ne, 9.Layar, 10.Mikrometer

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hubungan jumlah perubahan frinji N , yang didapat dengan Interferometer Michelson, terhadap sinus sudut datang ϕ sinar laser He-Ne perlu dibandingkan dengan hubungan jumlah perubahan frinji N_{teori} , hasil perhitungan suatu persamaan $N_{teori} \equiv N(\sin \phi)$ untuk bahan-transparan-uji yang bersesuaian, terhadap sinus sudut datang ϕ sinar laser He-Ne untuk menguji kesesuaian antara hasil penelitian dengan referensi, yaitu [4]. Pengujian kesesuaian hasil penelitian tersebut menggunakan persamaan (2.5), untuk kaca preparat, dan persamaan (2.7), untuk kaca preparat berlapis ZnO.



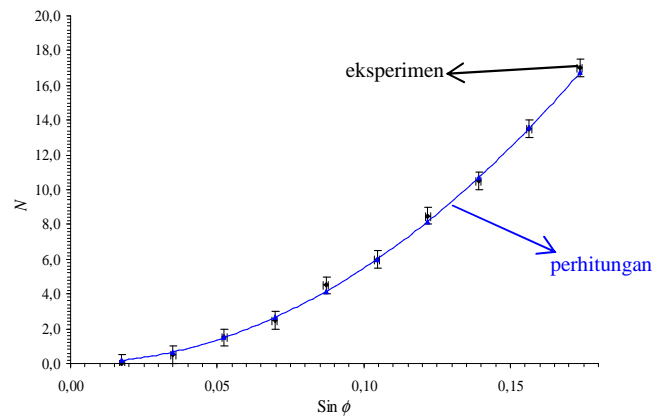
Gambar 4.1 Grafik hubungan jumlah perubahan frinji N terhadap sinus sudut datang ϕ pada kaca preparat. Plot (—) menyatakan hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.5) sedangkan plot (●) menyatakan data eksperimen

Plot garis dalam gambar 4.1 mewakili hubungan jumlah perubahan frinji N_{teori} terhadap sinus sudut datang ϕ yang didapat

dengan cara mensubstitusikan nilai tebal kaca preparat t , sebesar 10^{-3} m, panjang gelombang laser He-Ne λ yang digunakan, yakni $0,633 \times 10^{-6}$ m, dan indeks bias kaca preparat n_1 yang didapat dari referensi, 1,470 [4], ke dalam persamaan (2.5). Secara umum berdasar gambar 4.1 pula, jumlah perubahan frinji N mengalami peningkatan seiring bertambahnya besar sinus sudut datang ϕ sinar laser He-Ne pada kaca preparat. Terdapat peningkatan jumlah perubahan frinji N secara signifikan untuk $\sin \phi > 0,085$ pada kaca preparat. Peningkatan jumlah perubahan frinji N yang makin besar pada sinus sudut-sudut datang tersebut menunjukkan beda lintasan optis Δd , yang dialami oleh sinar laser He-Ne yang menuju dan dari cermin-geser saat melalui kaca preparat yang diputar sebesar ϕ , semakin lebih besar. Akibat terjadi peningkatan beda lintasan optis Δd , peningkatan beda fase $\Delta \delta$ antara kedua sinar laser.

Plot kurva garis dalam gambar 4.2, yang mewakili hubungan antara jumlah perubahan frinji N_{teori} dengan sinus sudut datang ϕ , didapat dengan cara mensubstitusikan nilai tebal kaca preparat t pada bahan-transparan-uji berupa kaca preparat berlapis ZnO (10^{-3} m), panjang gelombang laser He-Ne λ yang digunakan

($0,633 \times 10^{-6}$ m), indeks bias kaca preparat n_1 referensi, 1,470 [4], indeks bias ZnO n_2 referensi (1,922, [10]), tebal x lapisan ZnO pada kaca preparat berlapis ZnO ($5,4 \times 10^{-5}$

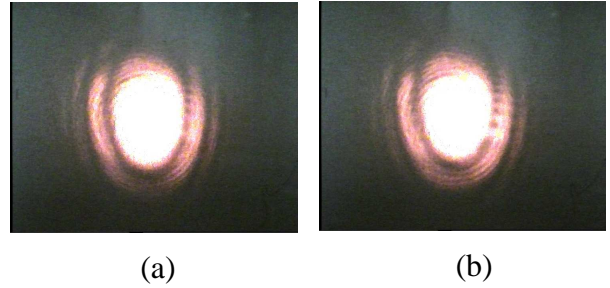


Gambar 4.2 Grafik hubungan jumlah perubahan frinji N terhadap sinus sudut datang ϕ pada kaca preparat berlapis ZnO. Plot (—) menyatakan hasil perhitungan dari teori menggunakan persamaan (2.7) sedangkan plot (\blacksquare) menyatakan data eksperimen

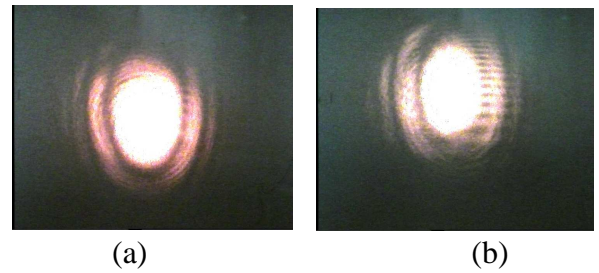
m [4], ke dalam persamaan (2.7). Seperti halnya pada kaca preparat, jumlah perubahan frinji N mengalami peningkatan seiring bertambahnya besar sinus sudut datang ϕ sinar laser He-Ne pada kaca preparat berlapis ZnO. Jumlah perubahan frinji N , akibat kaca preparat berlapis ZnO diputar sebesar ϕ , mengalami peningkatan secara signifikan untuk $\sin \phi > 0,065$. Hanya saja, jumlah perubahan frinji N pada kaca preparat berlapis ZnO lebih besar bila dibandingkan dengan jumlah perubahan frinji N pada kaca preparat,

seperti yang diperlihatkan dalam gambar 4.2. Peningkatan jumlah perubahan frinji N pada kaca preparat berlapis ZnO lebih besar daripada peningkatan jumlah perubahan frinji N pada kaca preparat karena sinar laser He-Ne, yang menuju dan dari cermin-geser, melalui kaca preparat dan lapisan tipis ZnO yang diputar sebesar ϕ . Masing-masing bahan transparan tersebut memiliki indeks bias, berturut-turut, sebesar 1,470 [4] dan 1,922 [10]. Akibatnya, terdapat penambahan beda lintasan optis Δd dan peningkatan beda fase $\Delta\delta$ yang lebih besar antara kedua sinar laser He-Ne yang saling berinterferensi pada layar.

Timbulnya transisi frinji sebesar N pada layar tersebut (gambar 3.1), akibat suatu bahan transparan diputar sebesar $\phi = 1^\circ, 2, \dots, 10^\circ$ (dari 0° hingga ϕ) sehingga sudut datang sinar laser He-Ne dari *beam splitter* yang jatuh pada kedua bahan-transparan-uji berharga ϕ , mengindikasikan adanya perubahan beda fase $\Delta\delta$ antara kedua sinar laser He-Ne yang saling berinterferensi pada layar tersebut karena $N \propto \Delta d(\sin \phi) \propto \Delta\delta$. Perubahan $\Delta\delta$ tersebut mengalami peningkatan positif (bertambah besar) bila terdapat pemanjangan beda lintasan optis Δd [6].



Gambar 4.3 Sistem frinji untuk kaca preparat (a) pada $\phi = 0^\circ$ (b) pada $\phi = 6^\circ$



Gambar 4.4 Sistem frinji untuk kaca preparat berlapis ZnO (a) pada $\phi = 0^\circ$ (b) pada $\phi = 6^\circ$

Gambar 4.3 memperlihatkan bahwa untuk kaca preparat, cincin-cincin gelap dan terang dalam sistem frinji akhir, pada $\phi = 6^\circ$, kembali menempati daerah yang ditempati oleh cincin-cincin gelap dan terang dalam sistem frinji awal, pada $\phi = 0^\circ$. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah perubahan frinji N berkelipatan bilangan bulat, $N \pm \delta N = 6,0 \pm 0,5$, dan oleh karena itu, terdapat $\Delta\delta$ yang berkelipatan 2π . Seperti halnya gambar 4.3, tidak terdapat perbedaan antara sistem frinji awal, pada $\phi = 0^\circ$, dan akhir, pada $\phi = 6^\circ$ untuk kaca preparat berlapis ZnO seperti yang diperlihatkan dalam gambar 4.4. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah perubahan frinji N berkelipatan

bilangan bulat, $N \pm \delta N = 6,0 \pm 0,5$, dan oleh karena itu, juga terdapat $\Delta\delta$ yang berkelipatan 2π .

Tebal lapisan tipis ZnO pada kaca preparat hasil penelitian ini, $(6,0 \pm 1,8) \times 10^{-5}$ m, lebih besar daripada yang diperoleh Muhamad Adi; yaitu $5,4 \times 10^{-5}$ m [4]. Hubungan jumlah perubahan frinji N hasil eksperimen terhadap sinus sudut datang ϕ sinar laser He-Ne pada kaca preparat berlapis ZnO digunakan untuk menentukan tebal lapisan ZnO x pada kaca preparat. Persamaan (2.8) digunakan dalam penentuan tebal lapisan tipis ZnO x dengan mensubstitusikan indeks bias referensi ZnO n_2 (1,922, [10]), indeks bias referensi kaca preparat n_1 (1,470 [4]), tebal kaca preparat t (10^{-3} m), panjang gelombang laser He-Ne λ yang digunakan ($0,633 \times 10^{-6}$ m) dan jumlah perubahan frinji N (yang didapat dari percobaan) pada sinus sudut datang ϕ yang bersesuaian.

KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan maka didapat kesimpulan sebagai berikut :

1. Transisi frinji atau jumlah perubahan frinji mengalami peningkatan seiring penambahan beda lintasan optis pada bahan transparan dan hasil teoritis sesuai dengan hasil eksperimen.

2. Tebal lapisan tipis ZnO pada kaca preparat hasil penelitian ini adalah sebesar $(6,0 \pm 1,8) \times 10^{-5}$ m.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hummel, R.E., 1993, *Electronic Properties of Materials*, Springer-Verlag, New York
- [2] Larciprete, M.C., Passeri, D., Michelotti, F., Paoloni, S., Sibilica, C., Bertolotti, M., Belardini, A., Sarto, F., Somma, F., Lo Mastro, S., 2005, *Second Order Nonlinear Optical Properties of Zinc Oxide Films Deposited by Low Temperature Dual Ion Beam Sputtering*, Journal of Applied Physics, Nomor 97 : 23501
- [3] Eya, D.D.O, Ekpunobi, A.J., dan Okeke, C.E., 2005. *Structural and Optical Properties and Applications of Zinc Oxide Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition Technique*, The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 6, Nomor 1 : 16 – 22
- [4] Adi, M., 2006, *Studi Efek Magneto Optis Pada Lapisan Tipis (ZnO) Menggunakan Interferometer Michelson*, Skripsi S1, Universitas Diponegoro, Semarang

- [5] Hecht, E., 1987, *Optics*, 2nd ed, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass.
- [6] Pedrotti, F.L. dan Pedrotti, L.S.,1993, *Introduction to Optics*, 2nd ed, Prentice Hall, New Jersey
- [7] Halliday, R. dan Resnick, R., 1990, Fisika, Jilid 2, Edisi ke-3 (terjemahan), Erlangga, Jakarta
- [8] Morgan, J., 1953, *Introduction to Geometrical and Physical Optics*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York
- [9] Jenkins, F.A. dan White, H.E., 1976, *Fundamentals of Optics*, 4th ed, McGraw-Hill, Inc., New York
- [10] <http://www.mticrystal.com/II-IV.html>. 25 Agustus 2006