

Analisis Sifat Optik Lapisan Tipis ZnO di atas Substrat SiO₂ dan Si dengan Menggunakan Spektroskopi Elipsometri

Muhammad Abiyyu Kenichi Purbayanto^{1,a)}, Gesti Rahmah¹⁾, Eka Nurfani¹⁾,
Yudi Darma^{1,b)}

¹Laboratorium Semikonduktor dan Devais Kuantum
Kelompok Keilmuan Fisika Material Elektronik
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

a) muhammad_abiyyu@students.itb.ac.id

b) yudi@fi.itb.ac.id (corresponding author)

Abstrak

Paper ini membahas analisis sifat optik dari lapisan tipis ZnO di atas SiO₂ dan Si yang ditumbuhkan dengan teknik DC-unbalanced magnetron sputtering. Sifat optik ZnO dikarakterisasi dengan menggunakan spektroskopi elipsometri (SE) pada rentang energi 1,2-6,5 eV. SE mengukur perubahan polarisasi cahaya yang direpresentasikan sebagai rasio amplitudo dan beda fasa saat sebelum dan sesudah menumbuk lapisan tipis ZnO. Data SE dianalisis dan dimodelkan lebih lanjut dengan menggunakan fungsi Tauc-Lorentz dan Gaussian untuk memperoleh informasi fisis dari sampel yang diukur. Model optik yang digunakan adalah kekasaran/ZnO/SiO₂/Si dan kekasaran/ZnO/Si. Kekasaran permukaan disertakan sebagai kompensasi dari ketidakhomogenan permukaan lapisan tipis. Nilai konstanta optik seperti indeks bias kompleks, celah pita energi, dan ketebalan lapisan tipis diperoleh melalui inversi persamaan Fresnel. Nilai indeks bias yang terukur pada ~2,25 eV adalah 2,03 dan 1,94, sedangkan lebar celah pita energi yang dihitung dengan persamaan Tauc adalah ~3,266 eV dan 3,269 eV, untuk substrat SiO₂ dan Si secara berturut-turut. Selain itu, ketebalan lapisan tipis yang diperoleh adalah ~50 nm. Studi ini menunjukkan pentingnya ZnO sebagai material dengan celah pita energi yang lebar untuk aplikasi perangkat optoelektronika seperti laser, dioda, dan detektor ultraviolet.

Kata-kata kunci: celah pita energi, indeks bias, lapisan tipis ZnO, spektroskopi elipsometri

PENDAHULUAN

Zinc Oxide (ZnO) merupakan material yang memiliki beragam aplikasi diantaranya adalah spintronik [1], sensor [2], fotovoltaik [3], dan optoelektronik [4]. ZnO memiliki celah pita langsung dengan lebar sebesar ~3.37 eV, sehingga memiliki transparansi pada daerah spektrum cahaya tampak dan daerah dekat ultraviolet. Kelebihan utama dari ZnO adalah memiliki energi ikat eksiton yang tinggi yaitu sekitar 60 meV, sehingga memungkinkan terjadinya rekombinasi eksiton pada temperatur ruang [5].

Lebih jauh lagi, lapisan tipis ZnO telah berhasil ditumbuhkan di atas berbagai substrat, diantaranya adalah substrat GaAs [6], Si [7], Pt [8] Quartz [8], dan SiO₂ [9]. Sementara metode yang dapat digunakan untuk penumbuhan ZnO adalah spray sederhana [10], SILAR [11], sputtering [12], dan pulsed laser deposition (PLD) [10-13]. Diantara berbagai teknik penumbuhan lapisan tipis ZnO, metode sputtering memiliki kelebihan yaitu sifat lapisan tipis dapat dikontrol dan dimodifikasi dengan mengubah parameter penumbuhan seperti temperatur substrat, waktu deposisi, tekanan chamber, dan tegangan yang digunakan [14]. Bagaimanapun, sifat optik dari lapisan tipis ZnO ini sangat bergantung juga pada substrat atau lingkungan elektronik yang

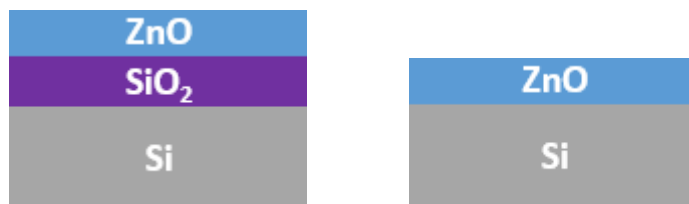
digunakannya. Penelitian kami sebelumnya telah mempelajari sifat optik ZnO ditumbuhkan pada substrat logam (Pt) dan isolator (*Quartz*) [8]. Perbedaan keadaan eksiton pada kedua substrat tersebut dapat diamati secara jelas dikarenakan pasangan elektron-hole pada ZnO yang ditumbuhkan di atas Pt mengalami gangguan akibat interaksi antara plasmon dan eksiton [8].

Pada penelitian ini dipelajari sifat optik dari lapisan tipis ZnO yang ditumbuhkan dengan metode *DC-Unbalanced Magnetron Sputtering*. Lapisan tipis dideposisikan pada lingkungan elektronik yang berbeda, yaitu semikonduktor (Si) dan isolator (SiO₂). Sifat optik dari lapisan tipis ZnO dikarakterisasi menggunakan spektroskopi elipsometri.

METODE

Preparasi dan Penumbuhan Sampel

Bubuk ZnO (99,9%) dihaluskan dan dicetak menjadi pelet. Pelet dipanaskan pada tungku (*furnace*) dengan suhu 1000 °C selama 10 jam untuk memperoleh target *sputtering* dengan kualitas tinggi. Selain itu, substrat Si (100) tipe *p* dipersiapkan dan dibersihkan terlebih dahulu dengan metode RCA. Substrat SiO₂ diperoleh dengan cara melakukan proses oksidasi kering pada Si dengan suhu 1000 °C selama 5 menit untuk memperoleh lapisan SiO₂ di atas Si yang seragam. Proses deposisi lapisan tipis ZnO dilakukan dengan metode *DC-unbalanced magnetron sputtering* pada suhu ruang. Parameter pada penumbuhan ini diantaranya adalah tekanan chamber sebesar 3.10⁻² mbarr, gas inert (Ar) dimasukkan pada *chamber* dengan laju 100 sccm, beda potensial yang digunakan sebesar 480 V, dan arus yang digunakan sebesar 25mA.



Gambar 1. Struktur lapisan tipis ZnO yang ditumbuhkan di atas SiO₂ (kiri) dan Si (kanan). Lapisan SiO₂ di atas Si ditumbuhkan dengan metode oksidasi kering.

Karakterisasi Sifat Optik

Spektroskopi elipsometri digunakan untuk mengkarakterisasi sifat optik lapisan tipis ZnO di atas substrat Si dan SiO₂. Pengukuran dengan spektroskopi elipsometri memiliki beberapa kelebihan diantaranya adalah tidak merusak sampel, tidak membutuhkan referensi sampel, memiliki sensitivitas yang tinggi untuk lapisan tipis, dan juga proses karakterisasinya yang mudah. Karakterisasi lapisan tipis ZnO dilakukan pada sudut 50°, 60°, dan 70°. Spektroskopi ini mengukur perubahan keadaan polarisasi dari cahaya ketika memantul pada suatu permukaan material [15]. Keluaran dari pengukuran elipsometri merupakan rasio amplitudo (Ψ) dan beda fasa (Δ) antara gelombang *s* dan *p* yang disebabkan interaksi gelombang datang dengan material [11]. Persamaan dasar elipsometri dapat dituliskan seperti berikut

$$\frac{R_p}{R_s} = \tan \Psi(e^{i\Delta}), \tag{1}$$

dimana R_p dan R_s merupakan koefisien pemantulan Fresnel untuk keadaan polarisasi paralel (*p*) dan seri (*s*).

Pemodelan Fungsi Dielektrik

Pada analisis data spektroskopi elipsometri, suatu model diperlukan untuk dapat menganalisis hasil pengukuran. Model fungsi dielektrik yang digunakan pada penelitian ini adalah model Tauc-Lorentz dan Gaussian. Model Tauc-Lorentz dikembangkan oleh Jellison dan Modine, secara umum digunakan untuk material amorf serta material oksida [16]. Pita penyerapan untuk bagian imajiner dari fungsi dielektrik dituliskan seperti berikut:

$$\epsilon_{2,TL} = \left[\frac{A_{TL} E_{n,TL} B_{TL} (E - E_g)^2}{E \left((E^2 - E_{n,TL}^2)^2 + B_{TL}^2 E^2 \right)} \right], \quad E > E_g \quad (2)$$

$$\epsilon_{2,TL}(E) = 0, \quad E < E_g, \quad (3)$$

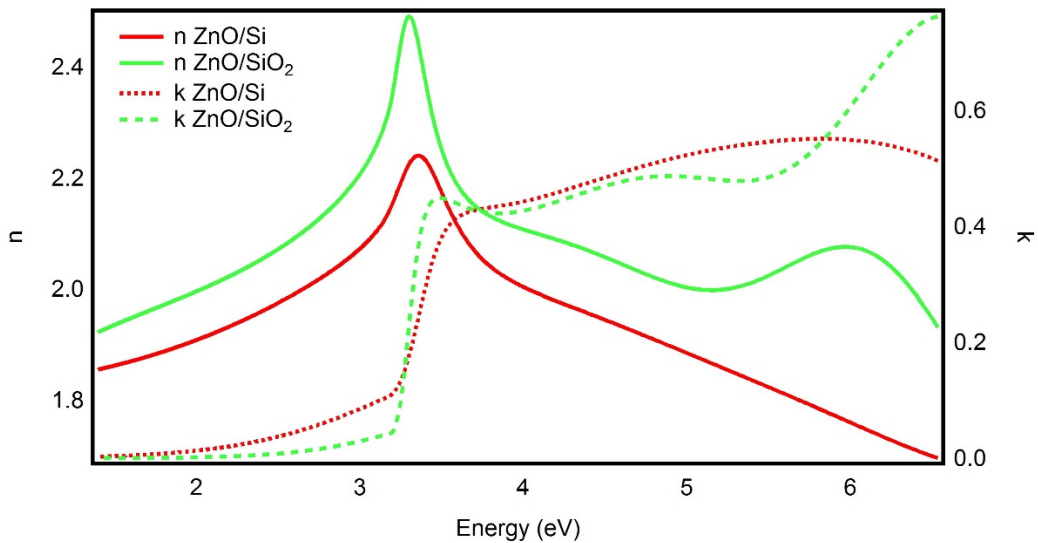
dimana A_{TL} , $E_{n,TL}$, dan B_{TL} menyatakan amplitudo, posisi, dan pelebaran dari osilator Tauc-Lorentz. Sementara untuk bagian real fungsi dielektrik diperoleh dengan menggunakan persamaan Kramers-Kronig. Osilator Gaussian memiliki bentuk garis Gaussian untuk spektrum imajiner dari fungsi dielektriknya yang dituliskan seperti berikut

$$\epsilon_{2,G}(E) = A_G e^{-\left(\frac{E-E_{n,G}}{\sigma}\right)^2} - A_G e^{-\left(\frac{E+E_{n,G}}{\sigma}\right)^2}. \quad (4)$$

A_G , $E_{n,G}$, dan B_G merupakan parameter pada osilator Gaussian yang menggambarkan posisi, amplitudo, dan pelebaran osilator.

Model optik yang digunakan pada penelitian ini adalah kekasaran/ZnO/SiO₂/Si dan kekasaran/ZnO/Si. Konstruksi model dilakukan, di mana terkandung parameter fisis seperti sudut keadaan polarisasi. Suatu model juga harus mengandung parameter fisis yang tidak diketahui, seperti ketebalan lapisan dan konstanta optik. Selanjutnya, variasi nilai dilakukan untuk parameter fisis yang tidak diketahui dan data yang dihitung hingga nilai tersebut dekat (*fit*) dengan data yang terukur pada eksperimen. Hasil *fitting* ini dijadikan perbaikan pada model, dan dilakukan iterasi untuk meningkatkan tingkat akurasi. Dari proses *fitting* dapat diperoleh konstanta optik seperti fungsi dielektrik kompleks, indeks bias kompleks, ketebalan lapisan tipis, dan kekasaran permukaan material.

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 2. Nilai indeks bias (n) dan koefisien peluruhan (k) untuk lapisan tipis ZnO di atas substrat Si dan SiO₂.

Gambar 2 menjelaskan nilai indeks bias kompleks untuk lapisan tipis ZnO di atas substrat Si dan SiO₂. Nilai indeks bias kompleks (n dan k) didapatkan melalui pemodelan data spektroskopi elipsometri. Nilai n mewakili indeks bias bahan dan k mewakili *extinction coefficient* yang menggambarkan penyerapan pada material dan energi yang hilang dikarenakan proses hamburan. Pada daerah cahaya tampak sekitar 2,25 eV diperoleh nilai indeks bias ZnO di atas substrat SiO₂ sebesar 2,03, sementara di atas substrat Si sebesar 1,94. Puncak spektrum k pada daerah ~3,4 eV menunjukkan transisi dari pita O-2*p* ke pita Zn-4*s* sedangkan puncak spektrum n pada daerah ~3,3 eV menunjukkan keadaan eksiton pada material ZnO. Nilai ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya [17,18]

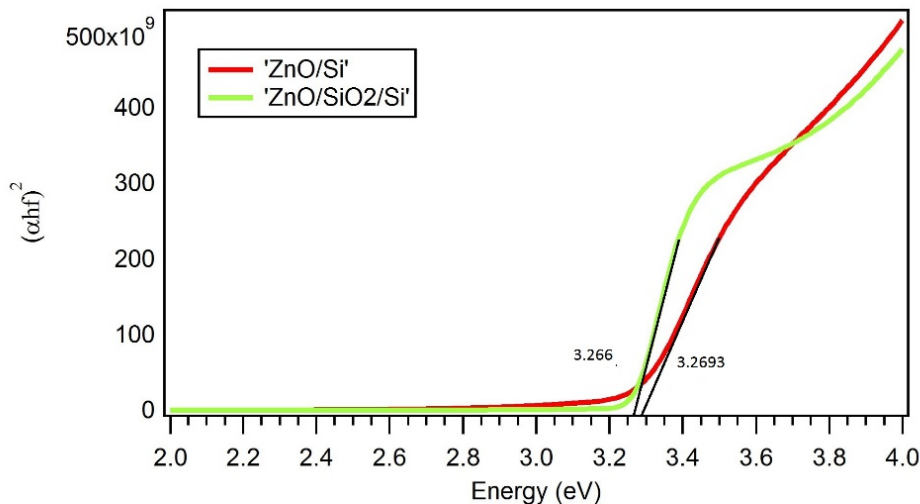
Nilai k pada rentang energi 1,2-3,3 eV untuk lapisan tipis ZnO yang ditumbuhkan di atas substrat Si lebih tinggi dibandingkan substrat SiO₂. Hal ini dikarenakan energi foton yang ditembakkan melebihi nilai energi celah pita Si (1,1 eV), sehingga terjadi penyerapan energi yang menyebabkan eksitasi elektron dari pita valensi

menuju pita konduksi. Sementara pada substrat SiO₂, foton cenderung diteruskan dikarenakan energi foton yang ditembakkan lebih kecil daripada nilai energi celah pita SiO₂ (transparan), oleh sebab itu penyerapan energi yang terjadi lebih kecil.

Metode yang sering digunakan untuk menghitung celah pita dari hasil pengukuran optik adalah Tauc plot, dengan cara melakukan *plot* $(\alpha hf)^{1/r}$ terhadap energi (hf) lalu mengekstrapolasi secara linear sampai $y=0$ [19]. Gambar 3 menjelaskan pencarian celah pita untuk material ZnO di atas substrat Si dan SiO₂. Persamaan Tauc plot yang digunakan adalah sebagai berikut

$$\alpha hf = k(hf - E_g)^{\frac{1}{r}}, \tag{5}$$

dengan nilai r untuk material ZnO adalah $\frac{1}{2}$, karena transisi pita langsung yang diizinkan. Didapatkan nilai celah pita untuk lapisan tipis ZnO di atas substrat SiO₂ dan Si adalah sebesar 3,266 eV dan 3,269 eV. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi perubahan celah pita yang sangat kecil akibat penambahan lapisan SiO₂.



Gambar 3. Metode Tauc untuk menentukan celah pita material ZnO di atas Si dan SiO₂.

KESIMPULAN

Puncak nilai n dan k pada daerah celah pita ZnO yang ditumbuhkan di atas substrat SiO₂ meningkat secara signifikan dibandingkan dengan ZnO di atas Si. Hal ini menunjukkan bahwa rapat keadaan eksiton ZnO di atas SiO₂ lebih tinggi. Nilai celah pita yang diperoleh untuk kedua sampel adalah ~3,266 eV dan 3,269 eV untuk ZnO di atas SiO₂ dan Si. Hasil penelitian ini mampu menjelaskan bahwa perubahan lingkungan elektronik dapat mengubah keadaan elektronik lapisan tipis ZnO, yang mana hal ini sangat penting untuk aplikasi perangkat optoelektronik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada anggota QSD Lab yang memberikan masukan dan arahnya dalam penelitian ini, serta Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi (PUPT) 2017:009/SP2H/LT/DRPM/IV/2017 yang telah mendanai penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada National University of Singapore yang turut membantu melakukan karakterisasi spektroskopi elipsometri.

REFERENSI

1. M.Opel. et al, *Zinc Oxide- From Dilute Magnetic Doping to Spin Transport*, Physica Status Solidi (b), **251** (2014) 1700-1709
2. Swati. S. Kulkarni, M.D.Shirsat, *Optical and Structural Properties of Zinc Oxide Nanoparticles*, International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS), **2** (2015) 14-18

3. R.Pietruszka, et al, *New Efficient Solar Cell Structures Based on Zinc Oxide Nanorods*, Elsevier Solar Energy Materials and Solar Cells, **143** (2015) 99-104
4. A.B. Djuriscic, A.M.C. Ng, X.Y. Chen, *ZnO Nanostructures for Optoelectronic: Material Properties And Device Application*. Elsevier Progress in Quantum Electronics, **34** (2010) 191-259
5. S.O. Kasap, T.C. Collins, *Zinc Oxide Materials for Electronic and Optoelectronic Device Application*, John Willey & Sons (2011)
6. C.G Ching, et al, *Structural Properties of Zinc Oxide Thin Films Deposited on Various Substrates*, Sains Malaysiana, **43** (2014) 923-927
7. E. Nurfani, N. Zuhairah, R. Kurniawan, S.Muhammady, I.M. Sutjahja, T. Winata, Y. Darma, *Influence of Ti Doping on The Performance of a ZnO-Based Photodetector*, Mater. Res. Express, **4** (2017) 024001
8. Y. Darma, C.D Satrya, R.Marlina, R. Kurniawan, T.S. Heng, J. Ding, A.Rusydi, *Plasmon-Exciton Interaction and Screening of Exciton in ZnO-Based Thin Film on Bulk Pt As Analyzed by Spectroscopic Ellipsometry*, Japanese Journal of Applied Physics, **56** (2017) 01AD06
9. A. M. Ali, A.A. Ismail, R. Najmy, A. Al-Hajry, *Preparation and Characterization of ZnO-SiO₂ Thin Films as Highly Efficient Photocatalyst*. Journal of Photochemistry and Photobiology, **275** (2014) 37-46
10. F. Paraguay D, W. Estrada L, D.R. Acosta N, E.Andrade, M. Miki-Yoshida, *Growth, Structure and Optical Characterization of High Quality ZnO Thin Films Obtained by Spray Pyrolysis*, Elsevier Thin Solid Films, **350** (1999) 192-202
11. A. Raidou, F. Benmalek, T.Sall, M. Aggour, A. Qachaou, L. Laanab, M. Fahoume, *Characterization of ZnO Thin Films Grown by SILAR Method*, Open Access Library Journal, **1** (2014) e588
12. R.Kurniawan, F. Willy, E.Nurfani, S. Muhammady, I. Sutjahja, T. Winata, Y. Darma, *Illumination Effects on the Ferroelectric Properties of Zinc Oxide Films Grown by DC-Unbalanced Magnetron Sputtering*, Mater. Res. Express, **4** (2017) 024003
13. E. Sub, S.H.S. Kang, J.S. Kang, J.H. Kim, S.Y. Lee, *Effect of The Variation of Film Thickness on the Structural and Optical Properties of ZnO Thin Film Deposited on Sapphire Substrate Using PLD*, Appl. Surf. Sci, **186** (2002) 474
14. A. Ismail, M.J. Abdullah, *The Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Prepared at Different RF Sputtering Power*. Journal of King Saud University, **25** (2013) 209-215
15. D. Goncalves, E.A. Irene, *Fundamental and Application of Spectroscopic Ellipsometry*. Quim Nova, **25** (2012) 794-800
16. J. Budai, I. Hanyecz, E. Szilagy, Z. Toth. *Ellipsometric Study of SixC Films:Analysis of Tauc-Lorentz and Gaussian Oscillator Models*. Elsevier Thin Solid Films, **519** (2011) 2985-2988
17. Y. Darma, C.D. Satrya, R. Marlina, R. Kurniawan, T.S. Heng, J. Ding and A. Rusydi, *Plasmon-Exciton Interaction and Screening of Exciton in ZnO-Based Thin Film on Bulk Pt as Analyzed by Spectroscopic Ellipsometry*, Jpn. J. Appl. Phys, **56** (2016) 01AD06
18. Y. Darma, R. Marlina, T.S. Heng, J. Ding and A. Rusydi, *Strong Modification of Excitons and Optical Conductivity for Different Dielectric Environments in ZnO Films*, IEEE Photon. J, **8** (2016) 7479449
19. J. Tauc, *Amorphous and liquid semiconductor*, Plenum Press, London (2014)