

INSTRUMENTASI DAN TEKNIK ELLIPSOMETRI

Oleh
Drs. Henok Siagian, M.Si

A. Pendahuluan

Ellipsometri adalah suatu cara optis untuk menelaah dan mengamati berbagai peristiwa pada suatu daerah antarmuka dua zat antara. Cara ini didasarkan pada pemanfaatan perubahan pengutuban sinar yang terjadi bila seberkas sinar dipantulkan, ditransmisikan, dihamburkan oleh sebuah antarmuka atau suatu lapisan tipis (film).

Ellipsometer sering digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan tipis dielektrik yang terletak di atas substrat dengan daya serap (absorpsi) nya tinggi. Juga dapat digunakan untuk menentukan parameter-parameter optis bahan, seperti : indeks bias n , koefisien pemadaman k , koefisien serapan α , skin depth, waktu relaksasi τ , konduktivitas logam σ dll. Pengukuran ketebalan dengan teknik ellipsometri ini mempunyai orde yang lebih kecil (beberapa angstrom) dibandingkan dengan teknik interferometri.

Berikut ini akan dijelaskan Pemantulan dan Pembiasan Gelombang Prinsip Ellipsometri, Sistem Peralatan, Pengukuran Besaran Fisik, serta Aplikasinya.

B. Pemantulan dan Pembiasan Gelombang

Untuk medium isotropis, berlaku hukum-hukum elektromagnetik sebagai berikut:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad \nabla \cdot E = 4\pi \zeta \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \nabla \cdot H = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

$$\nabla \times H = \frac{4\pi c E}{c} + \frac{\partial D}{\partial t} \dots\dots\dots (4)$$

Dari persamaan-persamaan di atas, bisa diturunkan bentuk persamaan gelombang elektromagnetik yang merambat dalam medium yang tidak mengandung muatan bebas yakni:

bebas, yakni :

$$\frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla^2 \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} + \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \nabla^2 \mathbf{H} \quad (6)$$

Untuk medium non konduktif ($\sigma=0$), persamaan (5) dan (6) menjadi

$$\frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \nabla^2 \mathbf{E} \quad (7)$$

$$\frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = \nabla^2 \mathbf{H} \quad (8)$$

Pada frekuensi optik ($\mu = 1$), kecepatan rambat gelombang dari persamaan di atas adalah $C/\sqrt{\epsilon}$ (dari definisi indeks bias $n = \sqrt{\epsilon}$). Pemantulan dan pembiasan merupakan gejala yang terjadi pada permukaan atau bidang batas dari dua medium yang berbeda, dengan demikian perumusannya merupakan perumusan soal syarat batas. Bila seberkas cahaya dijatuhkan pada bidang batas dua medium yang berbeda, maka sebagian cahaya akan dipantulkan dan sebagian lagi akan dibiaskan (seperti gambar 1).

Berdasarkan sifat optik bahan, sudut bias gelombang cahaya ditentukan oleh indeks bias bahan tersebut. Snellius merumuskannya sebagai berikut:

dengan n_1 dan n_2 menyatakan indeks bias medium 1 dan medium 2; i dan r menyatakan sudut datang dan sudut bias yang diukur terhadap garis normal bidang batas.



Gambar Geometri, Pemantulan dan Pembiasan

Bila cahaya datang dari udara menuju medium konduktif, maka $n_1 = 1$ dan n_2 dinyatakan dengan indeks bias kompleks bahan, yaitu:

$$N = n(1 + jk) \dots \dots \dots (10)$$

Dengan : N indeks bias kompleks bahan, n indeks bias riil, dan k koefisien pemadaman (extinction). Pemantulan dari gelombang elektromagnetik pada permukaan dielektrik bergantung pada keadaan vektor medan listrik gelombang tersebut, yaitu komponen gelombang sejajar (p) dan komponen gelombang tegak lurus (s) terhadap bidang datang. Dengan membandingkan amplitudo kompleks vektor medan listrik gelombang pantul (E_r) dengan amplitudo kompleks vektor medan listrik gelombang datang (E_i), akan diperoleh koefisien pemantulan (koefisien Fresnel) yaitu :

$$\frac{E_{r,p}}{E_{i,p}} = \frac{n_2 \cos i - n_1 \cos r}{n_2 \cos i + n_1 \cos r} = r_p$$

$$\frac{E_{r,s}}{E_{i,s}} = \frac{n_1 \cos i - n_2 \cos r}{n_1 \cos i + n_2 \cos r} = r_s \dots \dots \dots (11)$$

Dengan substitusi pers. (9) ke pers. (11) akan diperoleh :

$$r_p = \frac{\tan(\delta - \theta)}{\tan(\delta + \theta)} ; \text{ dan } r_s = \frac{\sin(\delta - \theta)}{\sin(\delta + \theta)} \dots \dots \dots (12)$$

r_p : amplitudo koefisien untuk polarisasi sejajar dan r_s : amplitudo koefisien untuk polarisasi tegak lurus. Hubungan amplitudo dan fase antara kedua komponen sejajar dan komponen tegak lurus berubah akibat pemantulan dan pembiasan. Berarti polarisasi cahaya terpantul dan polarisasi cahaya terbias tidak sama dengan polarisasi cahaya datang.

Untuk melihat pengaruh pantulan terhadap amplitudo dan fase pada vektor medan listrik secara terpisah, maka koefisien Fresnel kompleks akan dituliskan dalam bentuk :

$$r_p = |r_p| e^{j\delta_p} ; \text{ dan } r_s = |r_s| e^{j\delta_s} \dots \dots \dots (13)$$

$|r_p|$ dan $|r_s|$ adalah harga mutlak perbandingan amplitudo getaran vektor listrik cahaya terpantul dan vektor listrik cahaya datang terhadap bidang datang masing-masing untuk komponen sejajar dan tegak lurus. δ_p dan δ_s menyatakan pergeseran fase masing-masing komponen akibat pantulan. Perbandingan koefisien Fresnel komponen sejajar dengan komponen tegak lurus terhadap bidang datang dinyatakan sebagai berikut :

$$r_p \cdot \frac{1}{r_s} = \tan \theta e^{j\delta} \dots \dots \dots (14)$$

dari pers. (13) dan (14) dapat dituliskan bahwa:

$$\tan \Psi = \left| \frac{r_p}{r_s} \right| \quad \text{dan} \quad \Delta = \delta_p - \delta_s \quad (15)$$

Besaran Ψ dan Δ dikenal dengan parameter Ellipsometer yang dapat diukur dengan ellipsometer dan besarnya sangat bergantung pada indeks bias bahan pemantul. Pada suatu harga sudut datang tertentu, indeks bias kompleks bahan pemantul dapat dihitung melalui pengukuran Ψ dan Δ . Dari pers. (12), (14), dan (15) serta hukum Snellius,

$$\sin i = N \sin r \quad \dots \dots \dots (16)$$

akan diperoleh :

$$n^2(1 - K^2) = \sin^2 i \left[1 + \frac{\tan^2 \Psi (\cos^2 2\Psi - \sin^2 2\Psi \sin^2 \Delta)}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \right] \quad (17)$$

dan

$$2n^2 K = \frac{\sin^2 i \tan^2 \Psi \sin 4\Psi \sin \Delta}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \quad (18)$$

Pers. (17) dan (18) dapat digunakan untuk sudut datang sembarang dan panjang gelombang sembarang pula.

C. Prinsip Ellipsometri

Pengukuran Ellipsometer didasarkan pada perubahan polarisasi cahaya dari bidang polarisasi pada permukaan pemantul. Perubahan polarisasi yang dimaksud adalah keadaan polarisasi berupa ellips. Cahaya yang datang pada sampel biasanya dibuat terpolarisasi eliptik dan keadaan polarisasi berubah dari keadaan semula setelah meninggalkan sampel, atau cahaya mengenai sampel dengan keadaan polarisasi linier dan setelah meninggalkan sampel keadaan polarisasinya berubah, biasanya berupa ellips dengan karakteristik tertentu. Perubahan inilah yang diamati dengan metoda Ellipsometri.

Cahaya terpolarisasi eliptik adalah hasil superposisi dua komponen cahaya terpolarisasi yang mempunyai amplitudo sama tetapi berbeda fase, dengan $\delta = \pm 0,5 \pi ; (m = 0, 1, 2, \dots)$. Keadaan polarisasi eliptik dapat dinyatakan dengan meninjau penjalaran berkas cahaya terpolarisasi eliptik dalam arah sumbu - z yang digambarkan sebagai hasil dari dua gerak harmonis sederhana yang dibuat sepanjang

sumbu-x dan sumbu-y dengan frekuensi sama, amplitudo a_1 dan a_2 , sudut fase δ_1 dan δ_2 . Berikut ini merupakan persamaan untuk polarisasi eliptik,

$$\left[\frac{E_x}{a_1} \right]^2 + \left[\frac{E_y}{a_2} \right]^2 - 2 \left[\frac{E_x E_y}{a_1 a_2} \right] \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (19)$$

dengan $\delta = \delta_2 - \delta_1$.

D. Sistem Peralatan

Prinsip Dasar Kerja Alat (Ellipsometer Nof)



Gambar 2. Bagan Ellipsometer Nof

Berikan sejajar cahaya monokromatik tak terpolarisasi (biasanya dari sumber Laser) diubah menjadi terpolarisasi linier oleh polarisator. Umumnya polarisator yang digunakan adalah prisma Glan-Thomson yakni dua lemping Calcite yang direkatkan. Bila cahaya tak terpolarisasi dijatuhkan pada polarisator, maka refleksi internal total akan menyebabkan hanya cahaya terpolarisasi linier yang keluar / diteruskan oleh polarisator tersebut.

Kompensator berfungsi mengubah cahaya terpolarisasi linier menjadi terpolarisasi eliptik. Kompensator terbuat dari bahan yang memiliki sumbu optik cepat dan lambat tegak lurus terhadap arah transmisi. Komponen cahaya datang terpolarisasi yang vektor medan listriknya paralel terhadap sumbu lambat, biasanya akan diperlambat relatif terhadap komponen yang paralel terhadap sumbu cepat, ketika cahaya menembus kompensator. Bila perlambatan relatif adalah $0,5\pi$, kompensator itu disebut "pelambat seperempat gelombang" atau "keping seperempat gelombang".

Kompensator yang sering digunakan dalam ellipsometer adalah keping $\frac{1}{4}$ gelombang linier yang terbuat dari Quartz (kuarsa). Beberapa jenis kompensator biasa digunakan :

- Kompensator dengan orientasi tetap dan fase berubah, contoh : kompensator Soleil Babinet.
- Kompensator dengan fase tetap dan orientasi berubah, contoh : Kompensator Senarmot.
- Kompensator dengan orientasi dan fase tetap.
- Kompensator dengan orientasi dan fase berubah.

Sudut - sudut P dan C dari polarisator dan kompensator dapat diatur sehingga keadaan polarisasi mempunyai range dari linier ke sirkuler.

Dalam ellipsometri nol ingin diperoleh suatu nol (minimum) pada detektor, yaitu dengan memilih P dan C yang memberikan cahaya terpolarisasi elliptik, dimana jika cahaya direfleksikan sampel akan menjadi terpolarisasi linier dan selanjutnya menuju analisator. Cahaya terpolarisasi linier dilewatkan melalui analisator, lalu analisator itu diputar sebesar sudut A agar diperoleh output yang minimum pada detektor cahaya. Operator mengatur - atur sudut polarisator dan analisator untuk mendapatkan tnyai minimum pada detektor.

E. Pengukuran Besaran Fisis.

Perbandingan koefisien refleksi Fresnel (f) yang dirumuskan pers. (14) dapat diukur dan pengukurannya tidak perlu dengan mengukur intensitas absolut dan fase, karena p perbandingan intensitas dan perbedaan fase relatif. Sudut-sudut Ψ ($0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$) dan Δ ($0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$) didefinisikan sebagai $\Psi = \arctan(r_p/r_s)$ dan $\Delta = \delta_{rp} - \delta_{rs}$ perubahan fase. Sudut positif diukur berlawanan arah dengan arah perputaran jarum jam dari bidang datang dan sudut polarisator diatur ke nol bila bidang transmisi sejajar dengan bidang datang.

Ada 32 kombinasi dari P,C, dan A yang bisa menghasilkan pasangan Ψ dan Δ . Karena setiap sudut polarisator, kompensator, dan analisator yang beranjak 180° adalah sama secara optik, maka kombinasi P, C, dan A yang memberikan pasangan Ψ dan Δ berkurang menjadi 16 jika semua sudut dibatasi kurang dari 180° . Ke 16 pasang persamaan linier yang berkaitan dengan Ψ dan Δ pada P dan A saat nol (di detektor) adalah :

$$\Psi : \Delta, 180^\circ - \Delta$$

$\Delta : 2P - 90^\circ, 2P - 270^\circ, (2m - 1) 90^\circ \pm 2P$, dengan $m = 1, 2, 3$, atau 4. Ke 16 pasangan persamaan itu bisa dikurangi menjadi dua pasangan dengan membatasi kompensator hanya satu sudut, misalnya 45° dan range P dan A menjadi dua zona, didefinisikan sebagai :

$$m=1 : +45^\circ \leq P_1 \leq 135^\circ ; 0^\circ \leq A_1 \leq 90^\circ ; C = 45^\circ$$

$$m=2 : +135^\circ \leq P_1 \leq 45^\circ ; 90^\circ \leq A_1 \leq 0^\circ ; C = 45^\circ$$

P dan A ditentukan dalam tiap dua zona ini hubungannya dengan ψ dan Δ adalah :

$$\psi_1 = \psi_2 ; \Delta_1 = 270^\circ - P_1$$

$$\psi_1 = \psi_2 ; \Delta_1 = 90^\circ - 2P_1$$

Walaupun pengukuran bisa dilakukan sama validnya dalam kedua zona, pengaruh ketidak sempurnaan kompensator bisa dieliminasi dengan melakukan pengukuran dalam kedua zona lalu mengambil hasil rata-ratanya.

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} = \frac{\Lambda_1 - \Lambda_2}{2} \\ \Delta &= \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = 180^\circ - (P_1 + P_2) \end{aligned} \quad (20)$$

Kemudian harga sudut rata-rata di atas digunakan untuk menghitung parameter-parameter optis dari sampel dengan mensubstitusi ke pers. (17) dan pers. (18)

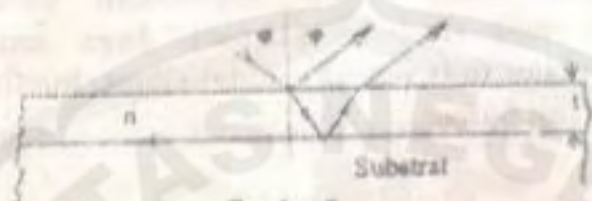
F. Aplikasi

Penerapan utama teknik Ellipsometri adalah pada pengukuran tebal dan indeks bias lapisan tipis yang tidak menyerap cahaya yang berada di atas substrat semikonduktor. Pada prinsipnya tidak ada batasan ketebalan lapisan yang akan di ukur, namun untuk lapisan yang sangat tipis, perlu diperlukan :

- Model lapisan dianggap mempunyai sifat optis yang homogen dan bidang batas yang rata.
- Persamaan Ellipsometri didasarkan pada persamaan Maxwell yang Umum tidak berlaku untuk lapisan yang tebalnya hanya beberapa atomik.

Masalah yang berbeda akan muncul untuk lapisan yang tebal, interpretasi akan menjadi lebih sulit karena panjang lintasan optis.

F.1. Mengukur Tebal Lapisan



Gambar 3.

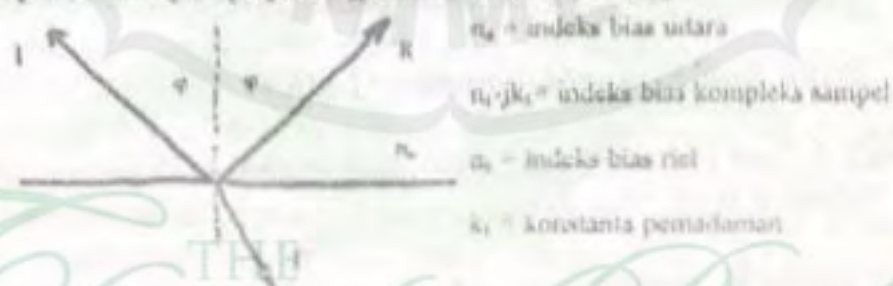
Pada gambar di atas, terlibat dua cahaya refleksi berinterferensi satu sama lain, mulai dari sefase sampai berlawanan fase. Konsekwensinya adalah sifat siklus pengukuran ketebalan, dengan ψ dan Δ merupakan fungsi siklus dari ketebalan lapisan. Untuk sefap siklus penuh ketebalan lapisan dihitung dengan :

$$t = \frac{\lambda}{2} (n^2 - \sin^2 \varphi)^{-\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Contoh : Pada $\varphi = 70^\circ$, ketebalan siklus SiO₂ dengan $n_1 = 1,465$ pada $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ adalah 2815 \AA . Jika tebal lapisan SiO₂ adalah 500 \AA memberikan sudut ellipsometrik tertentu, maka sudut yang sama akan diperoleh untuk lapisan SiO₂ setebal $(500 + 2815) \text{ \AA}$, $(500 + 5630) \text{ \AA}$ dst. Sehingga untuk lapisan yang lebih tebal dari pada ketebalan siklusnya, kita harus mengetahui ketebalan lapisan di antara satu ketebalan siklusnya.

F.2. Menentukan Indeks Bias Lapisan

Untuk menentukan indeks bias lapisan tipis, misalkan cahaya dijatuhkan pada sampel (seperti gambar dibawah ini)



n_s = indeks bias udara

$n_s + jk_s$ = indeks bias kompleks sampel

n_s = indeks bias riil

k_s = konstanta peredaman

Gambar 4

Dengan menggunakan persamaan Fresnel, bisa diperoleh :

$$R_p = \frac{n_s^2 \cos^2 \varphi - (n_s + jk_s)^2}{n_s^2 \cos^2 \varphi + (n_s + jk_s)^2} \quad (22)$$

p dicari dengan persamaan (14). Indeks bias kompleks bahan dapat ditentukan bila n_s diketahui dan p diukur pada sudut datang φ tertentu.

G. Penutup

Teknik Ellipsometri dapat digunakan untuk menentukan ketebalan lapisan tipis (orde Angstrom). Juga untuk menentukan konstanta optik lapisan tipis seperti: indeks bias, koefisien pemadaman dengan tidak merusak bahan.

DAFTAR PUSTAKA

A.C.Hall, 1963. *Journal of the Optimal Society of America*, Vol. 53, No.7, 801-803.

Azzam, R.M.A and Bashara, N.M., 1987. *Ellipsometry and Polarized Light*. North Holland, Amsterdam.

Born, M. and E. Wolf, 1959, *Principles of Optics*, Pergamon Press, New York.

D.A.Holmes and D.L.Feucht, 1967. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 57, No. 4, 446 – 472.

D.K.Burge and H.E.Bernett, 1964. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 54, No. 12, 1428-1433.

..... *Instruction Manual Ellipsometer L115A..*

Pedrotti, L.F. and Pedrotti, L.S., 1993. *Introduction to Opticals*, 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey.

Schroder, Dieter, K., 1990. *Semiconductor and Device Characterization*, John Wiley, Singapore.