بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تأثیر ضخامت بر مشخصات اپتیکی پرمالوی

نرگس انصاری[۱*]، ایمان خادمی[۲]، محمدمهدی طهرانچی[۲و۳]

[۱] گروه فیزیک دانشگاه الزهرا، ونک، تهران
[۲] پژوهشکده لیزر و پلاسما ، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
[۳] دانشکده فیزیک ، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده – بیضی‌سنجی طیفی به عنوان روشی اُپتیکی برای اندازه‌گیری ضریب شکست و ضریب خاموشی مورد استفاده قرار گرفته است. در بازه‌ی طول موجی ۲۰۰nm تا ۹۰۰nm برای نمونه‌ی پرمالوی، $Ni_{80}Fe_{20}$، با ضخامت‌های ۱۰nm و ۲۰۰nm ضریب شکست و ضریب خاموشی با مدل پاشندگی کلاسیک برازش شده و اثر ضخامت بر روی این داده‌ها بررسی شده است.

کلید واژه- بیضی‌سنجی، پرمالوی، ضخامت ، مدل پاشندگی کلاسیک.

Effect of Thickness on Optical properties of Permalloy

N. Ansari[1], I. Khademi[2] and M. M. Tehranchi[2,3]

[1] Department of Physics, Alzahra University, Tehran

[2] Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran

[3] Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract- Spectral ellipsometry is presented as an optical technique for measurement of refractive index and extinction coefficient. Spectral ellipsometry between 200 nm and 900 nm of optical wavelength is measured for 10nm and 200nm of permalloy layers, $Ni_{80}Fe_{20}$. Based on classical dispersion the obtained data are analyzed and is fitted for the measured wavelengths and so the effect of thickness on extinction coefficient is explored.

Keywords: classical dispersion model, ellipsometry, permalloy, thickness.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

کوچک کردن حجم قطعات الکترونیکی در رایانه‌ها و دیگر ابزارهای الکترونیکی بسیار حائز اهمیت است به طوریکه در سال‌های اخیر شاهد کاهش ضخامت قطعات تا مرتبه‌ی نانومتر بوده‌ایم. با توجه به ارتباط نزدیک لایه‌های مغناطیسی با ابزارهای الکترونیکی به سبب استفاده در تولید پردازنده، ابزارهای ذخیره اطلاعات و غیره، سعی در کاهش ضخامت این لایه‌ها شده است. با کاهش ضخامت لایه‌های مغناطیسی می‌توان ابزارهای کوچکتری تولید کرد که مهمترین دستاورد آنها کاهش اتلاف انرژی است. ویژگی لایه‌های مغناطیسی بسیار وابسته به ضخامت است تا جایی که با تغییر ضخامت یک لایه می‌توان مقدار دسترسی به مگنتوتنگش[1] [۱] و یا ویژگی‌های مگنتواُپتیکی آن مانند چرخش کر[2] و چرخش فارادی[3] را دستخوش تغییر قرار داد. در نتیجه باید اثرات تغییر ضخامت را بر ویژگی‌های لایه‌ی مغناطیسی دانست. در این گزارش اثر ضخامت بر ثابت‌های اُپتیکی پرمالوی $Ni_{80}Fe_{20}$ که در لایه‌های مغناطیسی با کاربرد مگنتوتنگشی و مگنتو اُپتیکی بسیار پرکاربرد است بررسی شده است. برای این هدف از روش بیضی‌سنجی طیفی [۲و۳] که روشی غیرمخرب است، استفاده شده‌است.

۲- تئوری

۲-۱- بیضی‌سنجی

بیضی‌سنجی، روشی اُپتیکی بر پایه‌ی اندازه‌گیری تغییر قطبش نور بازتاب شده از نمونه است. با استفاده از این روش، پارامترهای ψ و Δ که به ترتیب نسبت دامنه و اختلاف فاز دو مؤلفه‌ی عمودی (S)[4] و مماسی (P)[5] نور نسبت به صفحه‌ی تابش می‌باشند، اندازه‌گیری می‌شوند و با رابطه‌ی

$$\rho \equiv \tan(\psi) exp(-i\Delta) \equiv \frac{r_p}{r_s}, \qquad (۱)$$

داده می‌شود [۴] که r_p و r_s به ترتیب ضرایب فرنل برای موج P و S است.

پارامترهای بیضی‌سنجی از شدت نور بازتابی در روش تحلیلگر[6] چرخان، در چیدمان {قطبشگر[7]، نمونه، تحلیلگر چرخنده}[8] با رابطه‌ی

$$I = |E_{fp}|^2 + |E_{fs}|^2 = I_1(1 + \alpha \times cos 2A + \gamma \times sin 2A), \qquad (۲)$$

استخراج می‌شود که α و β برابر با

$$\alpha = \frac{\cos(2P) - cos(2\psi)}{1 - \cos(2p) cos(2\psi)}, \qquad (۳)$$

$$\gamma = \frac{\sin(2\psi)\cos(\Delta)\sin(2P)}{1 - \cos(2p) cos(2\psi)}, \qquad (۴)$$

است. شدت نور بازتابی، مجذور میدان الکتریکی آشکارشونده، با ماتریس جونز به میدان الکتریکی اولیه، عنصرهای اُپتیکی چیدمان و خواص اُپتیکی نمونه به صورت

$$E_f = PSA_R E_i \qquad (۵)$$

$$\begin{pmatrix} E_{fp} \\ E_{fs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos^2\theta_A & cos\theta_A sin\theta_A \\ cos\theta_A sin\theta_A & sin^2\theta_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos^2\theta_P & cos\theta_P sin\theta_P \\ cos\theta_P sin\theta_P & sin^2\theta_P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{pmatrix}$$

مربوط است. که θ_P، θ_A به ترتیب زاویه‌ی قطبشگر و تحلیلگر نسبت به صفحه‌ی تابش و E_f، E_i به ترتیب میدان آشکار شده و میدان اولیه می‌باشد.

ساختار لایه نازک، از محیط پیرامون، فیلم و زیر لایه تشکیل می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است. برای این نوع ساختار نسبت نور بازتابی کل را می‌توان به صورت حاصل‌جمع بازتاب‌های متوالی از مرز مشترک لایه‌ها بدست آورد[2] که نتیجه‌ی آن رابطه‌ی

[1] Magnetoresistance
[2] Kerr Rotation
[3] Faraday Rotation
[4] Senkrecht (perpendicular)
[5] Parallel
[6] Analyzer
[7] Polarizer
[8] PSA_R

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

$$r_{s,p} = \frac{r_{01}^{s,p} + r_{12}^{s,p} e^{-j2\beta}}{1 + r_{01}^{s,p} r_{12}^{s,p} e^{-j2\beta}}, \quad (۶)$$

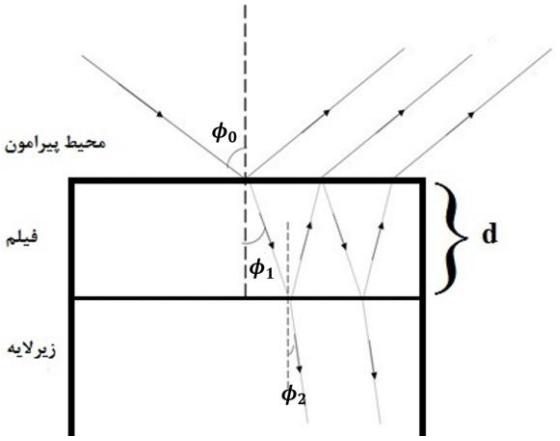
با مقادیر

$$\beta = 2\pi\left(\frac{d}{\lambda}\right) N_1 \cos(\phi_1), \quad (۷)$$

$$r_{ij}^{s} = \frac{N_i \cos\phi_i - N_j \cos\phi_j}{N_i \cos\phi_i + N_j \cos\phi_j}, \quad (۸)$$

$$r_{ij}^{p} = \frac{N_j \cos\phi_i - N_i \cos\phi_j}{N_j \cos\phi_i + N_i \cos\phi_j}, \quad (۹)$$

می‌باشد که r_{ij} ضریب فرنل مرز مشترک لایه ی i و j ، β اختلاف فاز ناشی از اختلاف راه ، N_i ضریب شکست لایه‌ی i ام و ϕ_i زاویه‌ی انتشار نور در لایه‌ی iام است.



شکل ۱: مدل اپتیکی برای نمونه‌ی لایه نازک.

۲-۲- مدل پاشندگی کلاسیک

با داشتن رابطه‌ی واحد برای ضریب شکست موهومی می‌توان مقادیر ضریب شکست و ضریب خاموشی را برای هر طول موج بدست آورد. به این منظور داده‌های تجربی که به صورت نقطه‌هایی گسسته می‌باشند با مدلی که خواص نمونه را ارضاء می‌کند برازش می‌شود. برای پرمالوی این مدل، مدل پاشندگی کلاسیکی[9] می‌باشد.مدل پاشندگی کلاسیکی ترکیبی از مدل درود[10] [۵] و مدل لورنتز[11] [۶] است. مدل درود توصیف کننده‌ی خواص اُپتیکی فلزات است اما در توصیف انرژی نوار ممنوعه[12] ناتوان است. مدل لورنتز برای عایق‌ها و نیم‌رساناها در ناحیه‌ی بالای انرژی نوار ممنوعه، مدل مناسبی است. ترکیب این دو مدل می‌تواند برای موادی که خواص نیم‌رسانایی و فلزی را به صورت همزمان دارند پاسخگو باشد. با توجه به اینکه چه مدلی برای ماده انتخاب شود، می‌توان ویژگی‌های خاصی را از رابطه استخراج کرد. به عنوان مثال با مدل درود می‌توان چگالی الکترون‌های آزاد را که با بسامد پلاسما[13] ارتباط دارد استخراج کرد.

با ترکیب مدل درود و مدل لورنتز و با اعمال نوسانات تا مرتبه‌ی دوم به رابطه‌ی

$$N(\omega) = n(\omega) + ik(\omega) = \sqrt{\varepsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega_t^2}{i\Gamma_0\omega - \omega^2 + \omega_t^2} + \frac{\omega_p^2}{i\Gamma_d\omega - \omega^2} + \frac{f_1\,\omega_{01}^2}{i\gamma_1\omega - \omega^2 + \omega_{01}^2}}, \quad (۱۰)$$

برای مدل کلاسیکی می‌رسیم که ε_∞ ثابت دی‌الکتریک در بسامد بالا، ϵ_s ثابت دی‌الکتریک در بسامد پایین، $(\epsilon_s - \varepsilon_\infty)$قدرت نوسان مرتبه‌ی اول لورنتز، ω_t فرکانس تشدید جذب، Γ_0 پهنای پیک جذب، ω_p بسامد پلاسما، Γ_dبسامد برخورد الکترون‌ها، f_1 قدرت نوسان مرتبه‌ی دوم لورتنز، ω_{01} بسامد تشدید نوسان مرتبه‌ی دوم لورنتز و γ_1 پهنای نوسان مرتبه‌ی دوم لورنتز می‌باشند.

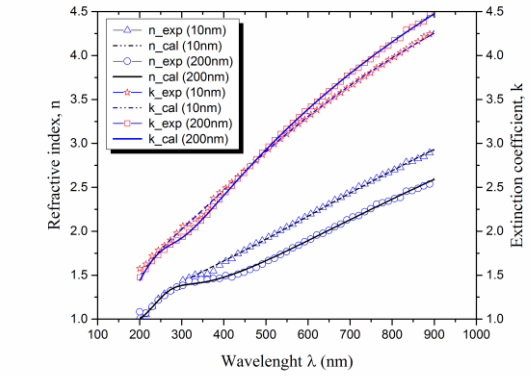
۳- آزمایش و نتایج

نمونه های مورد بررسی به روش کند و پاش[14] بر روی زیرلایه‌ی Si(100) تحت فشار گاز آرگون 5mTor، فشار زمینه 50nTor و با سرعت یک آنگستروم بر ثانیه رشد داده شده است. برای اندازه گیری شدت از دستگاه Sentech مدل SE800DUV استفاده شده است، بازه‌ی طول‌موجی از ۲۰۰ nm تا ۹۰۰ nm، با دقت ۰/۸ nmاست که برای هر طول‌موج شدت از زاویه ی ۰° تا ۱۸۰° با قدم های ۲/۲۵° و تحت زاویه‌ی فرود ۷۰° اندازه‌گیری شده است.

[9] Classical Dispersion Model
[10] Drude Dispersion Model
[11] Lorentz Dispersion Model
[12] Band Gap Energy (E_g)
[13] Plasma Frequency
[14] Sputtering

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

از شدت نور بازتابی و با استفاده از روابط ۲ تا ۴، پارامترهای بیضی‌سنجی را برای هر طول موج بدست آورده و با روابط ۶ تا ۹ ضریب شکست و ضریب خاموشی به روش نقطه به نقطه[15] استخراج می‌شود (دایره، مربع، مثلث و ستاره در شکل ۲).سپس داده‌های تجربی را با رابطه‌ی ۱۰ برازش کرده (خطوط در شکل ۲) که نتایج بدست آمده در جدول ۱ دسته‌بندی شده‌اند.



شکل ۲: داده‌های تجربی مربوط به ضریب شکست (دایره، مثلث) و ضریب خاموشی (ستاره، مربع) و داده‌های تحلیلی آن‌ها (خطوط) برای دو نمونه‌ی ۱۰nm (مثلث، ستاره) و ۲۰۰nm (دایره، مربع).

در جدول ۱ ضرایب ε_∞، ϵ_s، f_1 بدون بعد و ضرایب ω_t، ω_p، ω_{01}، Γ_0، Γ_d، γ_1 دارای بعد انرژی الکترون-ولت (ev) می‌باشند.

جدول ۱: ضرایب مدل پاشندگی کلاسیک برای نمونه‌ی ۱۰nm و ۲۰۰nm . (ضرایبی که با * مشخص شده‌اند دارای مفهوم فیزیکی نیستند اما با استفاده از این مقادیر برازش بهتری دیده می‌شود).

	نمونه‌ی ۱۰nm	نمونه‌ی ۲۰۰nm
ε_∞	۱	۱
ϵ_s	۳.۱۱۷۸۶۶	۱.۶۲۹۸۹۸
ω_t	۵.۰۴۱۵۶۴	۴.۷۷۹۹۸۵
$^*\Gamma_0$	-۶.۱۶۷۱۲	-۲.۵۰۴۵
ω_p	۹.۴۴۳۰۴۹	۷.۸۱۵۱۱
$^*\Gamma_d$	-۲.۴۵۱۴۶	-۱.۸۱۸۳۳
$^*f_1$	-۱۲.۱۹۰۶	-۲۰.۷۰۰۸
ω_{01}	۳.۱۵۰۷۹۸	۱۲.۶۲۶۸۶
γ_1	۱۹.۲۹۷۳۴	۲۶۶.۹۳۶۶

۴- نتیجه‌گیری

تفاوت ضریب شکست دو نمونه ۱۰nm و ۲۰۰nm در طول‌موج‌های پایین بسیار ناچیز است اما با افزایش طول موج این تفاوت محسوس‌تر می‌شود تا جایی که در طول موج ۹۰۰nm ضریب شکست نمونه‌ی ۱۰nm به مقدار ۰/۳۵ از ضریب شکست نمونه‌ی ۲۰۰nm بیشتر می‌شود. اما این رفتار برای ضریب خاموشی کمی متفاوت است، به طوری که در ناحیه ی فرابنفش ضریب خاموشی نمونه‌ی ۱۰nm بیشتر است اما در طول‌موج‌های بالاتر ضریب خاموشی نمونه ۲۰۰nm مقدار بیشتری را دارد.

با توجه به اینکه بسامد پلاسما با چگالی الکترون‌های آزاد ماده رابطه‌ی مستقیم دارد لذا همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است چگالی الکترون لایه نازک پرمالوی(نمونه‌ی ۱۰nm) بیشتر از نمونه‌ی توده‌ای (۲۰۰nm) از آن است.

مراجع

[1] Sahin, T., H. Kockar, and M. Alper, *Properties of electrodeposited CoFe/Cu multilayers: The effect of Cu layer thickness*. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 2014.

[2] Fujiwara, H., *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. 2007: John Wiley & Sons.

[3] Azzam, R.M. and N.M. Bashara, *Ellipsometry and polarized light*. 1987: North-Holland. sole distributors for the USA and Canada, Elsevier Science Publishing Co., Inc.

[4] Jenkins, T., *Multiple-angle-of-incidence ellipsometry*. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 1999. **32**(9): p. R45.

[5] Bade, W.L., *Drude- Model Calculation of Dispersion Forces. I. General Theory*. The Journal of Chemical Physics, 1957. **27**(6): p. 1280-1284.

[6] Oughstun, K. and N. Cartwright, *On the Lorentz-Lorenz formula and the Lorentz model of dielectric dispersion*. **Optics Express**, 2003. **11**(13): p. 1541-1546.

[15] Point-By-Point

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]