بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

ضخامت سنجی لایه های شفاف بر پایه روش مقطع نگاری همدوس نوری توسط منبع نور با طول همدوسی کم

فاطمه گرگان نژاد، آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

دانشگاه شهید بهشتی – پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده –روش مقطع نگاری همدوس نوری (*OCT*) در محدوده زمانی به عنوان یک روش غیرتماسی و غیر مخرب برای ضخامت سنجی مواد مختلف شفاف بکار گرفته می شود. این روش به دلیل استفاده از تداخل سنجی توسط یک منبع نور با پهنای باند وسیع و طول همدوسی کم، دارای قدرت تفکیک محوری بالا و دقت کافی می باشد. در این مقاله به طور تجربی نشان خواهیم داد که روش مقطع نگاری همدوس نوری می تواند به عنوان یک روش دقیق جهت اندازه گیری ضخامت لایه های شفاف میکرونی نظیرکریستال دوشکستی لیتیوم نیوبات ($LiNbo_3$) و پلیمر پلی استیرن سولفونات اسید *(PSSA)*، مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه- مقطع نگاری همدوس نوری ، منبع نور پهن باند، طول همدوسی، ضخامت سنجی.

Thickness measurement of transparent layers based on optical coherence tomography method by low coherence light source

Fatemeh Gorgan nejad , Atoosa Sadat Arabanian , Reza Massudi

Shahid Beheshty University – laser & plasma research institute

Time-Domain Optical coherence tomography is utilized as a non-contact and non-invasive method for thickness measurement. because of using broadband and low coherence light source, this method has high accuracy and axial resolution. In this paper, we will experimentally illustrate that technique of Optical coherence tomography can be used as an accurate way to measure micron thickness of transparent layer i.g. birefringent crystal of lithium niobate and polymer of PSSA.

Keywords: optical coherence tomography, broadband light source, coherence length, thickness measurement.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

کاربرد تکنیک های نوری در زمینه های تشخیصی، تصویربرداری و اندازه گیری، پیشینه تاریخی گسترده ای دارد. در این میان تکنیک های تداخل سنجی با به کارگیری ویژگی های همدوسی نور، یکی از روش های اندازه گیری با عملکرد ساده و دقت بالا می باشند. یکی از روش های تصویربرداری بر پایه تداخل سنجی توسط منبع با طول همدوسی کم، مقطع نگاری همدوس نوری (OCT) است که قابلیت اندازه گیری ضخامت و ضریب شکست لایه های مختلف مواد بیولوژیکی و غیر بیولوژیکی را با قدرت تفکیک فضائی میکرونی دارا می‌باشد. نخستین بار مایکلسون در سال ۱۸۹۳ نشان داد که از نور سفید می‌توان برای تخمین ارتفاع اتانول های پله ای استفاده کرد[۱]. روش OCT بر پایه تداخل سنج مایکلسون توسط منبع نور با طول همدوسی کم بوده که در آن، یک باریکه گسیل شده از منبع نور با طول همدوسی بسیار کم، توسط یک شکافنده پرتو به دو باریکه با شدت برابر تقسیم شده و وارد دو بازو می‌گردد. در نهایت نور بازتابی از دو بازو در اختلاف راهی در محدوده طول همدوسی منبع نور با هم تداخل کرده و طرح فراتژی حاصل می‌شود. این تکنیک برای نقشه برداری از سطوح و مقطع نگاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نقشه برداری با اندازه گیری مقدار جابه جایی فرانژها، می‌توان پروفایل سطوح را تا مرتبه نانومتری بدست آورد[۲] و در مقطع نگاری با پیدا کردن قله شدت می‌توان مکان سطوح بازتابنده و در نتیجه ضخامت لایه ها را بدست آورد[۳]. کاربرد OCT در ضخامت سنجی نمونه های غیربیولوژیکی نظیر پلیمر، سرامیک، لایه های رنگ، کاغذ، عناصر ریز مکانیکی و نمونه های بیولوژیکی نظیر لایه های چشم، پوست و ... اهمیت فراوان دارد، لذا در این مقاله قابلیت ضخامت سنجی این تکنیک در اندازه گیری لایه های شفاف میکرونی نشان داده خواهد شد. برای این منظور، ابتدا فیزیک OCT بر پایه تداخل سنجی با طول همدوسی کم، بیان شده و معادلات ریاضی آن آورده می‌شود، سپس در بخش تجربی ضخامت دو لایه از مواد شفاف نظیر کریستال لیتیوم نیوبات و پلیمر PSSA با استفاده از این روش اندازه گیری می‌شود و نتایج حاصل از ثبت سیگنالها جهت اندازه گیری ضخامت مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲- تئوری و معادلات ریاضی

در یک سیستم ضخامت سنجی توسط روش مقطع نگاری همدوس نوری بر پایه تداخل سنج مایکلسون، منبع نوری با طول همدوسی کم (منبع نور پهن باند) نظیر لامپ، SLD و یا لیزرهای فمتوثانیه جهت نوردهی به نمونه بکار برده می‌شود. بطوریکه در یک بازوی تداخل سنج (بازوی مرجع)، آینه و در بازوی دیگر (بازوی نمونه)، یک نمونه چند لایه قرار می‌گیرد (شکل۱). اگر میدان الکترومغناطیسی بازتابی از بازوی مرجع را با $E_{ref}(t)=a_r\exp(i\omega t)$ و میدان الکترومغناطیسی بازتابی از لایه های نمونه را با نشان داده و $E_{sample}(t)=\sum_n E_{sample}(t+\tau_n)=\sum_n a_n\exp(i\omega_n t)$ τ را اختلاف زمانی برخورد نور از لایه های مختلف با بازوی مرجع در نظر بگیریم، میدان حاصل، به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$E(t)=E_{ref}(t)+\sum_n E_{sample}(t+\tau_n) \qquad (۱)$$

در عمل شدت نور اندازه گیری شده برابر خواهد بود با: (۲)

$$I=\left\langle E^*(t)E(t)\right\rangle \Rightarrow$$

$$I(\tau)=I_0(a_r^2+\sum_n a_n^2+2\sum_{m\neq n} a_n a_m \,\mathrm{Re}(\gamma(\tau_{nm}))$$

که

$$+2\sum_n a_n a_r \,\mathrm{Re}(\gamma(\tau_n)))$$

در معادله فوق I_0، شدت نور اولیه ای است که وارد تداخل سنج می‌شود، دو جمله اول، به ترتیب تعیین کننده بازتاب از آینه مرجع و لایه های نمونه، جمله سوم نشان دهنده تداخل بین پرتوهای بازتابی از لایه های مختلف نمونه و جمله آخر بیانگر تداخل بین پرتوهای بازتابی از لایه ها و آینه مرجع بوده و در واقع اطلاعات تداخلی قابل استفاده در این جمله قرار می‌گیرد و باید به نوعی از جملات دیگر متمایز و آشکارسازی شود. معادله فوق را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$I(\tau)=const+2I_0\sum_n a_r a_n|\gamma(\tau_n)|\cos(\omega\tau_n) \qquad (۳)$$

که در آن $\gamma(\tau)$ برابر می‌باشد با:

$$\gamma(\tau)=\frac{\left\langle E^*(t)E(t+\tau)\right\rangle}{\sqrt{I_0^{ref}I_0^{sample}}}=|\gamma(\tau)|\exp(-i\omega\tau) \qquad (۴)$$

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

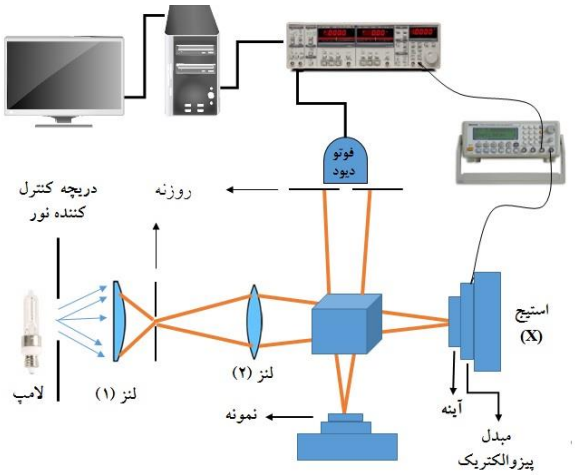
در واقع، تابع $\gamma(\tau_n)$، تابع همدوسی نرمالیزه و اندازه آن ($|\gamma(\tau_n)|$) تعیین کننده درجه همدوسی منبع نور می‌باشد و از عکس تبدیل فوریه چگالی طیفی توان ، $S(\omega)$، بدست می‌آید، بنابراین، پارامترهایی نظیر پروفایل عرضی، پهنای طیفی و طول موج مرکزی منبع نور در شکل و اندازه آن موثر می‌باشد.

$$\gamma(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}S(\omega)\exp(-i\omega\tau)d\omega \qquad (۵)$$

پس می‌توان نتیجه گرفت که پهنای باند بیشتر، منجر به طول همدوسی ($l_c \propto \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$) کمتر و قدرت تفکیک محوری ($\Delta z=\frac{l_c}{2}$) بالاتر می‌گردد. جهت دستیابی به اطلاعات عمقی و اندازه گیری ضخامت نمونه، لازم است جمله مربوط به تداخل بین پرتو بازتابی از لایه های مختلف و پرتو مرجع (جمله تداخل متقابل) بازسازی شود. به این منظور آینه مرجع اسکن می‌شود و در هر مکانی که اختلاف راه بازوی مرجع و سطوح در طول همدوسی منبع نور قرار گیرد، سیگنالی ثبت می‌گردد که بیشینه آن مربوط به اختلاف راه صفر بوده و مکان دقیق سطوح را نشان می‌دهد. به منظور جداسازی این جمله و حذف جملات دیگر در رابطه (۲) از تکنیک آشکارسازی هترودین استفاده می‌کنیم. در این تکنیک یک فرکانس مرجع، معروف به فرکانس حامل به سیستم معرفی و عمل مدولاسیون انجام می‌گیرد. در مرحله بعد با اعمال فیلتر میان گذر بر روی سیگنال الکترونیکی بدست آمده از آشکارساز در محدوده فرکانس حامل، عمل دمدولاسیون صورت می‌گیرد و در نهایت پروفایل شدت بر حسب عمق نمونه در رایانه نمایش داده می‌شود. عمل مدولاسیون و دمدولاسیون فوق به کمک تقویت کننده قفل-شونده و مبدل پیزوالکتریک که توسط مولد سیگنال همزمان سازی شده اند انجام می‌گیرد.

۳-چیدمان آزمایش

اندازه گیری ضخامت مواد مختلف توسط چیدمان تجربی نشان داده شده در شکل (۱) انجام شده است. در این چیدمان از یک لامپ هالوژن-تنگستن با طول موج مرکزی ۵۹۰ و پهنای طیفی گسترده ۲۵۰ نانومتر و طول همدوسی ۲ میکرون که منجر به تفکیک محوری ۱ میکرونی می شود، استفاده شده است. نور خروجی از لامپ ابتدا جهت افزایش همدوسی فضائی توسط لنز (۱) بر روی روزنه تصویر شده و سپس توسط لنز (۲) بر روی آینه و نمونه مورد اندازه‌گیری کانونی می‌شود.



شکل(۱): چیدمان تداخل سنجی با طوب همدوسی کم

به منظور ایجاد تاخیر زمانی (اختلاف راه)، آینه بر روی یک دستگاه حرکتی که توسط نرم افزار کنترل می‌شود قرار گرفته و اسکن در عمق نمونه انجام می‌شود. با اتصال آینه متحرک به یک مبدل پیزوالکتریک که از یک مولد سیگنال تغذیه می‌شود، سیگنال حامل تولید و عمل مدولاسیون انجام می‌شود. در اینجا فرکانس اعمالی به مبدل پیزوالکتریک، ۱ کیلوهرتز انتخاب شده و به عنوان مرجع به تقویت کننده قفل_شونده اعمال می‌شود تا فقط به فرکانس‌هایی در همین محدوده پاسخ داده و اطلاعات مربوط به آنها را اندازه گیری کند. کلیه اعمال کنترلی و هماهنگی دستگاه ها و ثبت و پردازش سیگنال توسط کد نوشته شده در برنامه LabVIEW انجام می‌گیرد.

۴- نتایج تجربی

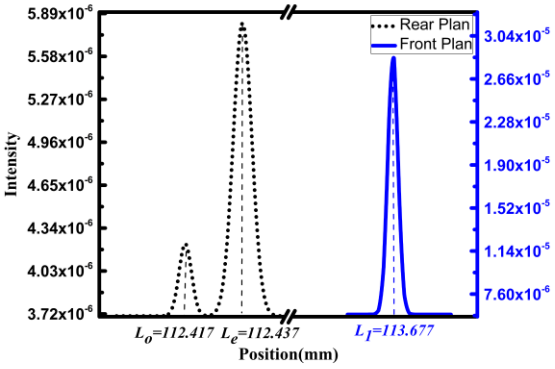
۴-۱- اندازه گیری ضخامت لایه کریستال لیتیوم نیوبات:

به منظور محاسبه خطای دستگاه، یک لایه استاندارد کریستال لیتیوم نیوبات (X-Cut) به ضخامت ۵۰۰ میکرون و با ضرایب شکست فاز عادی و غیر عادی $n_{O(ph)}=2.2994$ و $n_{e(ph)}=2.2133$ را به عنوان نمونه در تداخل سنج قرار می‌دهیم. با در نظر گرفتن وابستگی ضریب شکست به فرکانس و اعمال ضرایب پاشندگی $-0.34099(\mu m)^{-1}$ برای

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

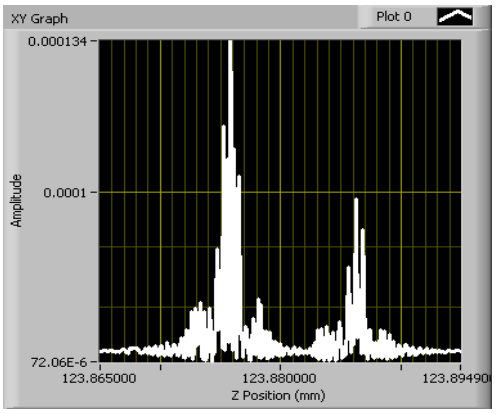
محور عادی و $-0.29125(\mu m)^{-1}$ برای محور غیرعادی و قراردادن این مقادیر در رابطه $n_G = n_{ph} - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$، به ضرایب شکست گروه عادی و غیرعادی $n_{o(gr)} = 2.4893$ و $n_{e(gr)} = 2.3755$ خواهیم رسید که با تقسیم ضخامت‌های اپتیکی بر این ضرایب شکست، ضخامت واقعی لایه بدست می‌آید. با اسکن آینه مرجع در طول ۳ میلی متر طبق شکل (۲)، یک بیشینه شدت از سطح جلوئی در مکان $L_1 = 113.677(mm)$ و با توجه به ماهیت دوشکستی بودن این کریستال دو بیشینه از سطح عقبی در مکانهای $L_O = 112.417(mm)$ و $L_e = 112.437(mm)$ مشاهده می‌شود. ضخامت اپتیکی اندازه گیری شده برابر با $\Delta L_O = L_1 - L_O = 1.260(mm)$ و $\Delta L_e = L_1 - L_e = 1.240(mm)$ می‌باشد که با توجه به رابطه $t = \Delta L / n_{gr}$ میانگین ضخامت لایه برابر با $0.512(mm)$ خواهد شد که خطایی در حدود ۰.۲٪ (قابل قبول برای سیستم های OCT) را دارد.



شکل (۲): سیگنال های اندازه گیری شده از سطوح جلوئی و عقبی لایه کریستال لیتیم نیوبات، به ضخامت ۵۰۰ میکرون

۴-۲-اندازه گیری ضخامت یک لایه نازک شفاف از پلیمر PSSA:

به منظور نشان دادن کارآئی روش فوق در اندازه گیری لایه های نازک، یک لایه پلیمر شفاف PSSA که به روش Spin coat لایه نشانی و با دستگاه ضخامت سنج Dektak(BRUKER) اندازه گیری شده، در بازوی نمونه قرار داده و آینه مرجع را اسکن می کنیم. سیگنالی مطابق شکل (۳) مشاهده می شود که بیشینه شدت از سطوح جلویی و عقبی به ترتیب در مکان های $123.876(mm)$ و $123.886(mm)$ واقع است.



شکل (۲): سیگنال های حاصل از سطوح جلوئی و عقبی پلیمر PSSA

ضخامت اپتیکی اندازه گیری شده برابر با $\Delta L = L_2 - L_1 = 10(\mu m)$ می‌باشد که با توجه به ضریب شکست $n = 1.37$، ضخامت ۷ میکرونی بدست می‌آید و با مقایسه با مقدار اندازه گیری شده توسط ضخامت سنج Dektak خطای 1.5٪ در اندازه گیری مشاهده می شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، قابلیت ضخامت سنجی تکنیک مقطع نگاری همدوس نوری بر پایه تداخل سنجی با طول همدوسی کم و آشکارسازی هترودین، به عنوان روشی دقیق و با تفکیک محوری بالا، نشان داده شده و سیگنال های شدت بر حسب مکان سطوح نمونه هایی شفاف، نظیر کریستال لیتیوم نیوبات و پلیمر PSSA به منظور اندازه گیری ضخامت ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

مراجع

[1] A. A. Michelson, ‘‘Light-Waves and their Application to Metrology’’ Nature, Volume 49, Issue 1255, pp.56-60,1893

[2] M. Ryabko,” Interferometer -based Technology for Optical Nanoscale Inspection”, Measurement science review, Vol 14, No.1, 2014

[3] David Huang, et al “Micron-Resolution Ranging ofCornea Anterior Chamber by Optical Reflectometry” Lasers in Surgery and Medicine , Vol 11, pp. 419-425, 1991

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]