اندازه‌گیری ضریب‌شکست گروه و ضخامت نمونه به صورت هم‌زمان با استفاده از مقطع‌نگار همدوس نوری طیفی

پوریا امیدی[۱] ، آرشام حمیدی[۱]، احسان احدی اخلاقی[۱و۲]

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱

[۲] مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱

چکیده – مقطع‌نگار همدوس نوری روشی نوین، غیرمخرب و با سرعت داده‌برداری بالا در تصویربرداری است که با بهره‌گیری از روش تداخل‌سنجی همدوس جزئی، لایه‌های مختلف نمونه را شناسایی می‌کند. در این مقاله با استفاده از چینش مقطع‌نگار همدوس نوری طیفی با چشمه‌ی نور مرئی که دارای تفکیک‌پذیری محوری ۱ میکرومتر است، روشی برای اندازه‌گیری ضریب‌شکست گروه لایه‌های نازک چندلایه‌ای ارائه شده است. این روش می‌تواند به‌طور هم‌زمان ضریب‌شکست گروه و ضخامت لایه‌های نازک را تعیین کند. با استفاده از این روش، ضریب‌شکست لایه‌ی نازک تا دو رقم اعشار و ضخامت لایه‌ی نازک با دقت یک میکرومتر قابل تعیین است.

کلید واژه- تداخل‌سنجی همدوس جزئی، ضریب‌شکست، مقطع‌نگاری همدوس نوری طیفی، ضخامت سنجی.

Simultaneous thickness and group index measurement with Spectral Domain Optical Coherence Tomography

Pooria Omidi[1], Arsham Hamidi[1], Ehsan Ahadi Akhlaghi[1, 2]

[1] Department Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran.

[2] Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran.

Abstract- Optical Coherence Tomography is a new, non-destructive method based on low coherence interferometry that can identify different layers of a sample with high speed. In this article, we present a method based on spectral domain optical coherence tomography with visible light source that can measure group refractive index and thickness of multilayer samples simultaneously with 1 micrometer axial resolution. The results obtained uncertainties in the second decimal place for index value and thickness accurate to within 1 micrometer.

Keywords: Low Coherence Interferometry, Refractive Index, Spectral Domain Optical Coherence Tomography, Thickness Measurement.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

مقطع‌نگاری همدوس نوری OCT، روشی نوین در تصویربرداری است که قابلیت تصویربرداری سه‌بعدی، غیرمخرب و با سرعت بالا از نمونه‌های زیستی و غیرزیستی، با تفکیک‌پذیری محوری و عرضی بالا را دارا است. چینش آزمایشگاهی متداول در OCT، تداخل‌سنج مایکلسون است که می‌توان با استفاده از دو چینش فضای زمان و فضای طیفی، بررسی نمونه را انجام داد. در چینش فضای زمان، با حرکت آینه‌ی مرجع، داده‌برداری عمقی یک نقطه از نمونه انجام می‌شود و اطلاعات به‌دست آمده توسط آشکارساز ثبت می‌شود. در چینش فضای طیفی، بدون جابه‌جاکردن آینه‌ی مرجع و تنها با یک مرتبه داده‌برداری، تمام اطلاعات عمقی یک نقطه از نمونه توسط آشکارساز ثبت می‌شود [۱]. در مقطع‌نگاری همدوس نوری، مکان لایه‌های مختلف در نمونه بر حسب اختلاف راه نوری بین بازوی مرجع و لایه‌های مختلف نمونه قابل دست‌یابی است. چالش مهم در مقطع‌نگاری همدوس نوری، اندازه‌گیری ضریب‌شکست لایه‌های مختلف نمونه به‌منظور دست‌یابی به ضخامت هندسی لایه‌ها و شناسایی بافت‌های بیمار از بافت‌های سالم در کاربردهای پزشکی است. یکی از انواع روش‌ها در اندازه‌گیری ضریب‌شکست، روش میکروسکوپی همکانون است که با استفاده از اندازه‌گیری تاخیر فازی به‌وجود آمده در نمونه، می‌تواند ضریب‌شکست و ضخامت نمونه‌های نوری مختلف را اندازه‌گیری کند [۲].

در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری ضریب‌شکست به صورت همزمان با داده‌برداری در مقطع‌نگاری همدوس نوری مانند روش دَوران نمونه، روش‌های محاسباتی ارائه شده است [۳]. یکی دیگر از روش‌های ارائه شده، استفاده از تداخل‌سنج مسیر مشترک است که قابلیت اندازه‌گیری همزمان ضخامت و ضریب‌شکست لایه‌های نازک شفاف را دارا است [۴].

در این مقاله روشی با استفاده از چینش متداول OCT برای اندازه‌گیری همزمان ضخامت و ضریب‌شکست گروه لایه‌های نازک چندلایه‌ای ارائه شده است که بدون نیاز به تغییر چیدمان OCT و تنها با وارد کردن بخشی از نمونه در مسیر یکی از بازوهای تداخل‌سنج، توانایی اندازه‌گیری ضریب‌شکست گروه نمونه را تا دقت دو رقم اعشار و ضخامت نمونه را با دقت ۱ میکرومتر دارا است.

۲- مبانی نظری

فرض کنیم یک نمونه توسط موج تخت مانند رابطه‌ی (۱) تحت تابش قرار می‌گیرد [۵]،

$$V_i = A_i\, exp(ik_i r - i\omega t), \qquad (۱)$$

که k_i عدد موج نور فرودی و A_i دامنه‌ی موج فرودی است. با استفاده از تابع گرین (Green function)، $G_H(r,r')$ موج پراکنده شده جواب تقریبی معادله هلمهولتز به صورت:

$$V_s = V_i + \frac{1}{4\pi}\int_{Volr'} G_H(r,r')d^3r \times \int_{Volr'} F_s(r',k)V'_i d^3r, \qquad (۲)$$

خواهد بود که V_s موج پراکنده شده از نمونه است [۶]. انتگرال‌گیری به روی حجمی از نمونه که تحت تابش قرار گرفته است (Vol_r) انجام می‌شود. در صورت استفاده از تقریب میدان دور برای دامنه موج پراکنده شده داریم:

$$A_{(s)} = \frac{A_{(i)}}{4\pi d}\int_{Vol(r)} F_s(r')\exp(-iK.r')\,d^3r'. \qquad (۳)$$

$K=k_{(s)}-k_{(i)}$ تفاضل بردار موج فرودی و پراکنده شده و $F_s(r,k)$ تابع پتانسیل پراکندگی، که برابر$k^2(m^2-1)$ است[۵]. m ضریب‌شکست مختلط نمونه تعریف می‌شود. رابطه‌ی (۳) شکل ساده شده نظریه مقطع‌نگاری با روش پراکندگی است. پتانسیل پراکندگی نمونه از طریق اعمال تبدیل فوریه معکوس بر امواج پراکنده شده قابل محاسبه است. شدت موج پراکنده شده در فضای طیفی (I_S) در رابطه‌ی (۴) نمایش داده شده است [۶] :

$$I_{(S)} = I_0[\sum_i (|R_R|^2 + |R_i|^2) + 2\sum_{i,j,i\neq j} R_j R_i^* \Gamma[\tau \pm (\tau_i - \tau_j)] + 2\sum_i R_R^* R_i \Gamma[\tau \pm (\tau_i - \tau_R)]]. \qquad (۴)$$

R_R ضریب بازتاب از بازوی مرجع، R_i و R_j ضرایب بازتاب از لایه‌های مختلف نمونه، I_0 شدت موج فرودی و Γ تابع همدوسی چشمه‌ی نور، که تابعی از تاخیر زمانی τ است.

شکل ۱، نحوه قرارگیری نمونه شفاف نوری در بازوی نمونه را نمایش می‌دهد. نمونه به‌نحوی در مسیر عبور باریکه قرار می‌گیرد که نصف باریکه از داخل آن عبور کند. پرتو (۱) قسمتی از باریکه است که از کنار نمونه عبور کرده و در مسیر خود از نمونه عبور نمی‌کند و پرتو (۲) در مسیر خود یک بار از نمونه عبور می‌کند. پرتوهای (۳) و (۴) از سطوح نمونه بازتاب شده و به سمت باریکه‌شکن هدایت می‌شوند.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

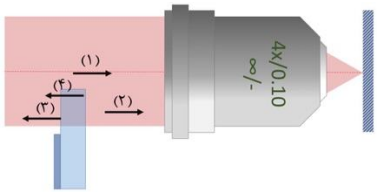
شدت تداخلی پرتوهای (۳) و (۴) که از نمونه بازتاب شده‌اند برابر است با [۴]:

$$I(\lambda) = 2RI_0(\lambda)[2 - \cos\delta(\lambda)], \quad (۵)$$

که،

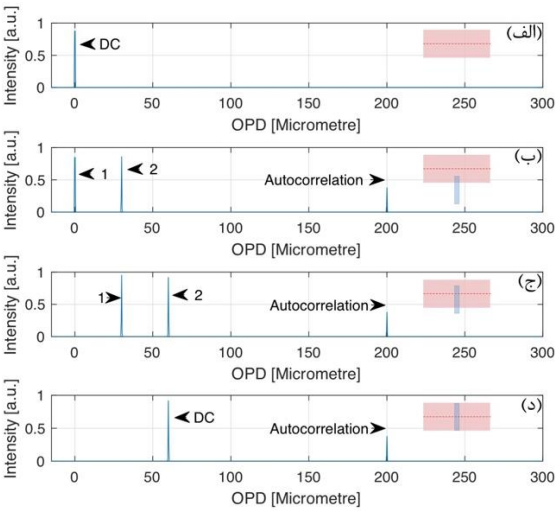
$$\delta(\lambda) = 2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)nd, \quad (۶)$$

تعریف می‌شود. d ضخامت نمونه و R ضریب بازتاب هریک از سطوح نمونه است. پرتو (۲) به دلیل عبور ازنمونه، راه نوری برابر nd بیشتر از پرتو (۱) طی کرده است. در نتیجه، اختلاف راه نوری پرتو (۱) با پرتو (۲) برابر است با تفاضل ضریب‌شکست نمونه و ضریب‌شکست هوا در ضخامت نمونه که برابر است با $(n\text{-}1)d$. در اینجا ضریب‌شکست هوا ۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: نحوه قرارگیری نمونه مورد بررسی در مسیر باریکه.

با پویش نمونه به صورت عمود بر مسیر عبور باریکه، حالت‌های مختلفی پس از تحلیل نتایج طیف‌سنج به وجود می‌آید. شکل ۲ نحوه پویش نمونه در باریکه نور و نمایش اطلاعات متناظر OCT را نمایش می‌دهد. در شکل ۲، (الف) نمونه وارد باریکه نوری نشده است و نتیجه یک قله در نقطه صفر که مقدار اختلاف راه نوری بازوی مرجع و نمونه است را نمایش می‌دهد. شکل ۲، (ب) نمونه تا کمتر از نیمه وارد باریکه نوری شده است. داده‌های OCT سه قله در مکان‌های مختلف را نمایش می‌دهند. قله‌ی اول نشان‌دهنده‌ی بخشی از باریکه که از نمونه عبور نکرده است (جمله‌ی اول در رابطه‌ی (۴)) و قله‌ی دوم نشان دهنده بخشی از باریکه که یک بار از نمونه عبور کرده است را نمایش می‌دهد (جمله‌ی سوم در رابطه (۴)). قله سوم نیز تداخل میان سطوح مختلف نمونه و جمله خودهمبستگی لامل را نمایش می‌دهد (جمله‌ی دوم در رابطه (۴)). اختلاف میان مکان قله اول و دوم برابر $(n\text{-}1)d$ و مکان قله سوم برابر $2nd$ است. شکل ۲، (ج) نمونه در بیش از نیمی از مسیر باریکه نوری قرار گرفته است. قله‌ی اول نمایانگر بخشی از باریکه است که یک بار در مسیر حرکت خود از نمونه عبور کرده است و قله‌ی دوم بخشی از باریکه که در مسیر رفت یک بار و در مسیر برگشت از آینه بار دیگر از نمونه عبور کرده است. قله‌ی سوم تداخل میان لایه‌های نمونه را نمایش می‌دهد. در شکل ۲ (د)، نمونه کاملا در مسیر باریکه قرار گرفته است. دو قله به‌ترتیب میزان اختلاف راه نوری میان دو بازوی تداخل‌سنج و میزان اختلاف راه نوری میان دو لایه از نمونه را نمایش می‌دهند.



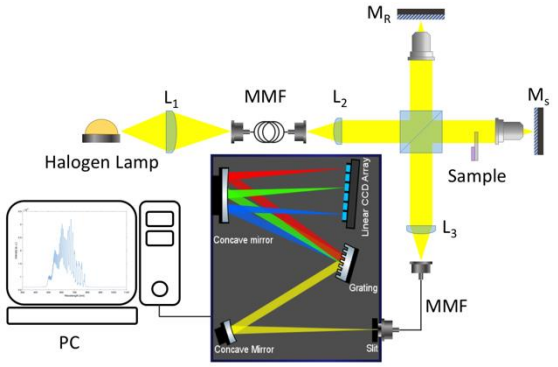
شکل ۲: حالت‌های مختلف تحلیل نتایج OCT با پویش نمونه عمود بر مسیر عبور باریکه. (الف) باریکه از نمونه عبور نمی‌کند. (ب) کمتر از نیمی از باریکه از نمونه عبور می‌کند. (ج) بیشتر از نیمی از باریکه از نمونه عبور می‌کند (د) باریکه به صورت کامل از نمونه عبور می‌کند. (زیرشکل‌ها، نحوه قرار گیری نمونه را در مسیر باریکه نمایش می‌دهند.)

۳- نتایج تجربی

در شکل ۳، چینش مورد استفاده برای OCT نمایش داده شده است. چشمه نوری مورد استفاده لامپ هالوژن ۱۲ولت و توان مصرفی ۱۰۰ وات است که دارای طول همدوسی ۱ میکرومتر است. باریکه‌ی نوری که توسط فیبر مالتی‌مد (MMF) به تداخل‌سنج مایکلسون هدایت شده، توسط عدسی L2 که دارای فاصله کانونی ۵٫۲ میلی‌متر است، به صورت موازی به دو شیئی میکروسکوپ مشابه در دو بازوی مرجع و نمونه تابیده می‌شود. پس از بازگشت باریکه‌ها از دو بازوی مرجع و نمونه، این دو باریکه توسط باریکه‌شکن برهم‌نهی شده و توسط یک فیبر مالتی مد به طیف‌سنج هدایت می‌شوند. و اطلاعات ثبت شده به رایانه منتقل می‌گردد [۷].

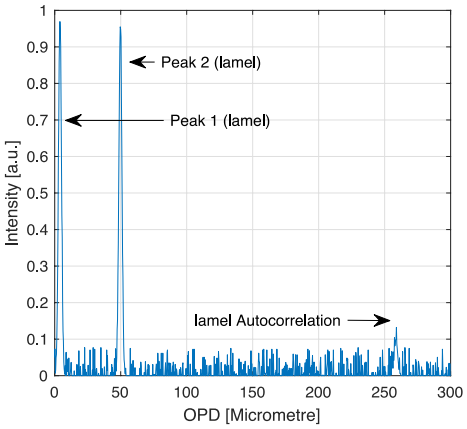
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]



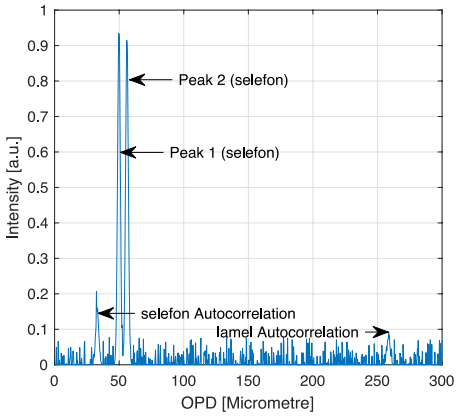
شکل ۳: طرحی از چیدمان مقطع‌نگار همدوس نوری طیفی.

یک لامل شیشه‌ای و یک لایه پلاستیک شفاف (سلفون) که به‌خوبی روی لامل چسبانده شده است را به عنوان نمونه مطابق شکل ۱ در مسیر نوری بازوی مرجع قرار می‌دهیم. شکل ۴ نتایج به‌دست آمده به صورت نمودار شدت بر حسب اختلاف راه نوری برای لاملی که در نیمی از مسیر باریکه قرار دارد، مطابق شکل است.



شکل ۴: نمودار شدت بر حسب اختلاف راه نوری برای حالتی که لامل در نیمی از عرض باریکه قرار دارد.

با انجام محاسبات، ضریب‌شکست گروه لامل برابر ۱٫۵۵ و ضخامت نمونه بررسی شده برابر ۸۱٫۶۴μm به‌دست آمد. سپس لامل را در عرض باریکه نور جابه‌جا کرده به‌نحوی که لامل درکل مسیر عبور باریکه و لایه‌ی سلفون، در نصف مسیر عبور باریکه باشد. شکل ۵، نمودار شدت بر حسب اختلاف راه نوری به‌دست آمده برای این حالت را نمایش می‌دهد. با انجام محاسبات، ضریب شکست گروه برابر ۱٫۵۹ و ضخامت نمونه بررسی شده برابر ۱۰٫۳۸μm به‌دست آمده است. اندازه‌گیری‌های انجام شده با روش تداخل‌سنجی نور سفید با استفاده از شیئی میرائو، این مقادیر را ۹۱μm ۸۰٫ برای ضخامت لامل و ۹٫۵۰μm برای ضخامت لایه سلفون گزارش داده است که مقادیر به‌دست آمده با روش OCT را در محدوده‌ی دقت ۱ میکرومتر را تایید می‌کند.



شکل ۵: نمودار شدت بر حسب اختلاف راه نوری برای حالتی که سلفون در نیمی از مسیر عبور باریکه قرار دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از چیدمان OCT و استفاده از لامپ هالوژن به عنوان منبع نوری، روشی نوین ارائه شده است که می‌تواند ضریب شکست گروه و ضخامت نمونه‌های چندلایه‌ای شفاف نوری را به‌دست آورد، به طوری که مقادیر به‌دست آمده توسط این روش تطابق خوبی با سایر روش‌ها مانند روش تداخل‌سنجی نور سفید با استفاده از شیئی میرائو دارد.

مراجع

[1] W. Drexler, J. G. Fujimoto, *Optical Coherence Tomography Technology and Applications*, Springer reference, 2016, page 3-65

[2] Curl, Claire L., Catherine J. Bellair, Trudi Harris, Brendan E. Allman, Peter J. Harris, Alastair G. Stewart, Ann Roberts, Keith A. Nugent, and Lea Delbridge, “Reflective index measurement in viable cells using quantitative phase-amplitude microscopy and confocal microscopy”, Cytometry, Vol. 65A, pp. 88-92, 2005

[3] Peter. H, David S. Mukai, Matthew Brenner, Zhongping Chen, “In vivo endoscopic optical coherence tomography by use of a rotational microelectromechanical system probe”, Opt. Lett., Vol. 29, No. 11, 2004.

[4] S. C. Zilio, "Simultaneous thickness and group index measurement with a single arm low-coherence interferometer", Optics Express, Vol. 22, No. 22, 2014.

[5] J. A. Izatt and M. A. Choma, *Theory of Optical Coherence Tomography*, Springer Berlin Heidelberg, 2003, page 47-72.

[6] W. Drexler, J. G. Fujimoto, *Optical Coherence Tomography Technology and Applications*, Springer reference, 2016, page 3-65

[7] حمیدی، آرشام، احدی اخلاقی، احسان، "ساخت و درجه‌بندی میکروسکوپ مقطع‌نگار همدوس نوریدر فضای طیفی در محدوده نوری مرئی"، کنفراس اپتیک و فوتونیک ایران، ۱۳۹۵.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]