





# اندازه گیری ضریب شکست گروه و **ضخامت** نمونه به صورت همزمان با استفاده از مقطعنگار همدوس نوری طیفی

پوریا امیدی<sup>۱</sup>، آرشام حمیدی<sup>۱</sup>، احسان احدی اخلاقی<sup>۲۹۱</sup>

۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۶۶۷۳۱–۴۵۱۳۷

۲ مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۶۶۷۳۱–۴۵۱۳۷

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.

كليد واژه - تداخل سنجى همدوس جزئى، ضريب شكست، مقطعنكارى همدوس نورى طيفى، ضخامت سنجى.

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

Pooria Omidi<sup>1</sup>, Arsham Hamidi<sup>1</sup>, Ehsan Ahadi Akhlaghi<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Department Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran.

<sup>2</sup> 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 <u>WWW.0pSi.ir</u>قابل دسترسی باشد

#### 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 می توان 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 می شود و اطلاعات به دست آمده توسط آشکار ساز ثبت می شود. در چینش فضای طیفی، بدون جابه جاکردن آینه ی مرجع و تنها با یک مرتبه دادهبرداری، تمام اطلاعات عمقی یک نقطه از نمونه توسط آشکارساز ثبت می شود [۱]. در مقطعنگاری همدوس نوری، مکان لایههای مختلف در نمونه بر حسب اختلاف راه نوری بین بازوی مرجع و لایه های مختلف نمونه قابل دستیابی است. چالش مهم در مقطعنگاری همدوس نوری، اندازهگیری ضريب شكست لايه هاى مختلف نمونه بهمنظور دست-یابی به ضخامت هندسی لایهها و شناسایی بافتهای بیمار از بافتهای سالم در کاربردهای پزشکی است. یکی از انواع روشها در اندازهگیری ضریب شکست، روش میکروسکویی همکانون است که با استفاده از انداز مگیری تاخیر فازی به وجود آمده در نمونه، میتواند ضریب شکست و ضخامت نمونه های نوری مختلف را انداز مگیری کند [۲].

در سالهای اخیر تلاشهای بسیاری برای اندازه گیری ضریب شکست به صورت همزمان با داده برداری در مقطعنگاری همدوس نوری مانند روش دوران نمونه، روشهای محاسباتی ارائه شده است [۳]. یکی دیگر از است که قابلیت انداز مگیری همزمان ضخامت و ضریب شکست لایه های نازک شفاف را دارا است [۴]. اندازه گیری همزمان ضخامت و ندر این مقاله روشی با استفاده از چینش متداول OCT برای اندازه گیری همزمان ضخامت و ضریب شکست گروه لایه های نازک چندلایه ای ارائه شده است که بدون نیاز به تغییر چیدمان TOT و تنها با وارد کردن بخشی از نمونه در مسیر یکی از بازوهای تداخل سنج، توانایی اندازه گیری ضریب شکست گروه نمونه را تا دقت دو رقم اعشار و ضریب شکست میکرومتر دارا است.

### ۲- مبانی نظری

فرض کنیم یک نمونه توسط موج تخت مانند رابطهی (۱) تحت تابش قرار می گیرد [۵]،  $V_i = A_i \exp(ik_ir - i\omega t),$  (۱)  $\Delta^{k}_i$  عدد موج نور فرودی و  $A_i$  دامنه ی موج فرودی است.  $K_i$  عدد موج نور فرودی و  $A_i$  دامنه ی موج فرودی است. با استفاده از تابع گرین (Green function)، ( $G_{H}(r,r')$  موج  $V_s = V_i + \frac{1}{4\pi} \int_{Volr'} G_H(r,r') d^3r$ 

$$\times \int_{Volr'} F_s(r',k) V'_i d^3r, \qquad (r)$$

خواهد بود که *V<sub>s</sub>* موج پراکنده شده از نمونه است [۶]. انتگرال گیری به روی حجمی از نمونه که تحت تابش قرار گرفته است (*Volr*) انجام می شود. در صورت استفاده از تقریب میدان دور برای دامنه موج پراکنده شده داریم:

 $A_{(s)} = \frac{A_{(i)}}{4\pi d} \int_{Vol(r)} F_{s}(r') \exp(-iK.r') d^{3}r'. (\ref{T})$   $A_{(s)} = \frac{A_{(i)}}{4\pi d} \int_{Vol(r)} F_{s}(r') \exp(-iK.r') d^{3}r'. (\ref{T})$   $K = k_{(s)} k_{(i)}$   $K = k_{(i)} k_{(i)$ 

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

 $R_{R}$  ضریب بازتاب از بازوی مرجع،  $R_{i}$  و  $R_{j}$  ضرایب بازتاب از لایه های مختلف نمونه،  $I_{0}$  شدت موج فرودی و  $\Gamma$  تابع همدوسی چشمهی نور، که تابعی از تاخیر زمانی  $\tau$  است.

شکل ۱۰ 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 باریکه شکن هدایت می شوند.

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

$$I(\lambda) = 2RI_0(\lambda)[2 - \cos\delta(\lambda)], \qquad (a)$$

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

تعریف می شود. b ضخامت نمونه e R ضریب بازتاب هریک از سطوح نمونه است. پرتو (۲) به دلیل عبور ازنمونه، راه نوری بر ابر nd بیشتر از پرتو (۱) طی کرده است. در نتیجه، اختلاف راه نوری پرتو (۱) با پرتو (۲) برابر است با تفاضل ضریب شکست نمونه و ضریب شکست هوا در ضخامت نمونه که بر ابر است با b(n-1). در اینجا ضریب شکست 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 می آید. شکل ۲ نحوه پویش نمونه در باریکه نور و نمایش اطلاعات متناظر OCT را نمایش می دهد. 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 می دهد. شکل ۲، (ب) نمونه تا کمتر از نیمه وارد باریکه نوری شده است. دادههای OCT سه قله در مکان های مختلف را نمایش میدهند. قلمی اول نشاندهندهی بخشی از باریکه که از نمونه عبور نکرده است (جملهی اول در رابطهی (۴)) و قلمی دوم نشان دهنده بخشی از باریکه که یک بار از نمونه عبور کرده است ر ا نمایش میدهد (جملهی سوم در ر ابطه (۴)). قله سوم نیز تداخل میان سطوح مختلف نمونه و جمله خودهمبستگی لامل را نمایش میدهد (جملهی دوم در ر ابطه (۴)). اختلاف میان مکان قله اول و دوم بر ابر -n) 1)d و مكان قله سوم بر ابر 2nd است. شكل ٢، (ج) نمونه در بیش از نیمی از مسیر باریکه نوری قرار گرفته است. قله ی اول نمایانگر بخشی از باریکه است که یک بار در مسیر حرکت خود از نمونه عبور کرده است و قله ی 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 بهتر تیب 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 ۲٫۵ میلیمتر است، به صورت موازی به دو شیئی میکروسکوپ مشابه در دو بازوی مرجع و نمونه تابیده میشود. پس از بازگشت باریکهها از برهم نهی شده و توسط یک فیبر مالتی مد به طیفسنج هدایت میشوند. و اطلاعات ثبت شده به رایانه منتقل میگردد [<sup>۷</sup>].



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، ضریب شکست 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 لایمی سلفون، در نصف مسیر عبور باریکه باشد. شکل ۵، نمودار شدت بر حسب اختلاف راه نوری بهدست آمده برای این حالت را نمایش می دهد. با انجام محاسبات، ضریب شکست گروه برابر ۱٬۵۹ و ضخامت نمونه بررسی شده برابر ۱۰٬۳۸μ بهدست آمده است. انداز مگیری های انجام شده با روش تداخل سنجی نور سفید با استفاده از شیئی میرائو، این مقادیر را ۹۱µ۳ سفید با استفاده از شیئی میرائو، این مقادیر را ۹۱µ۳

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

- 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، أرشام، احدی اخلاقی، احسان، ساخت و درجهبندی

میکروسکوپ مقطعنگار همدوس نوریدر فضای طیفی در محدوده نوری مرئی"، کنفراس اپتیک و فوتونیک ایران، ۱۳۹۵