بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ 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

ساخت و درجه‌بندی میکروسکوپ مقطع‌نگار همدوس نوری طیفی در ناحیه طیف‌مرئی

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

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

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

چکیده – مقطع‌نگاری همدوس نوری، یک روش تصویربرداری غیرمخرب است که در زمینه‌ی پزشکی و صنعت کاربردهای بسیاری دارد. چشمه‌های نوری که اغلب در مقطع‌نگاری همدوس نوری استفاده می‌شوند، دیودهای نوری پرتوان (SLD) هستند که این چشمه‌های نوری نیم‌همدوس زمانی هستند، در نتیجه تفکیک‌پذیری محوری سیستم‌های مقطع‌نگاری نوری متداول، تنها ۱۰-۲۰ میکرومتر است. در این مقاله نتایج ساخت و درجه‌بندی میکروسکوپ مقطع‌نگار همدوس نوری طیفی در ناحیه مرئی ارائه شده است. رابطه افزایش عمق داده‌برداری با کاهش حساسیت سیگنال ثبت شده نیز در این مقاله تحت بررسی قرار گرفته شده است که تطابق خوبی را با مقادیر نظری نشان می‌دهد. برای کالیبره‌کردن میکروسکوپ مقطع‌نگار همدوس نوری طراحی شده، لامل به عنوان نمونه تحت بررسی قرار گرفته شده‌است که ضخامت حاصل شده از مقطع‌نگار همدوس نوری با ضخامت به‌دست آمده از ریزسنج تطابق خوبی داشته است. استفاده از لامپ هالوژن در این چیدمان در مقایسه با چشمه‌های نوری متداول در مقطع‌نگاری همدوس نوری، به دلیل طول همدوسی کمتر (۱٫۶ میکرومتر)، موجب افزایش تفکیک‌پذیری محوری در تصاویر ثبت شده می‌شود.

کلید واژه- مقطع‌نگاری همدوس نوری- چشمه‌گرمایی- فضای طیفی

Fabrication and Calibration a Spectral-Domain Optical Coherence Tomography in visible range

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 (OCT), as a noninvasive imaging technique, has been widely applied in medical and industrial fields. The light source commonly used in OCT -Super luminescent diodes (SLD) - are partially temporally coherent light source, which usually exhibits typically the resolution of 10-20 μm. In this article, fabrication and calibration a visible spectral-domain OCT has presented. We show a good theory-experiment agreement for OCT signals as a function of depths. In order to Calibration the OCT, we investigated the thickness of cover slip which result show a good agreement with the outcome result of a digital micrometer. Because of low temporal coherence length of halogen lamp (1.6 μm) the axial resolution of the acquired images increased

.

Keywords: Optical Coherence Tomography, Thermal light source, Spectral-Domain

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

مقطع‌نگاری همدوس نوری (OCT)، یک روش نوین تصویربرداری است که قابلیت تصویربرداری سه‌بعدی، غیرمخرب و با سرعت بالا از نمونه‌های زیستی و غیرزیستی، با تفکیک‌پذیری بالا را دارا است. [۱-۲].

سیستم‌های تصویربرداری OCT معمولا دارای بازه نمونه برداری عمقی چند میلی‌متر و تفکیک‌پذیری محوری از مرتبه میکرومتر است. از این‌رو، OCT از نظر تفکیک‌پذیری محوری و عمق داده‌برداری، مابین دو روش فراصوت و میکروسکوپی هم‌کانون قرار می‌گیرد [۲].

چینش آزمایشگاهی متداول مورد استفاده در OCT، تداخل‌سنج مایکلسون است که می‌توان با استفاده از دو چینش: فضای زمان و فضای فوریه، بررسی نمونه را انجام داد. در چینش فضای زمان، با حرکت آینه مرجع، داده‌برداری عمقی یک نقطه از نمونه انجام می‌شود و اطلاعات به‌دست آمده توسط آشکارساز ثبت می‌شود. در چینش فضای فوریه، بدون جابه‌جا کردن آینه مرجع و تنها با یک مرتبه داده‌برداری، تمام اطلاعات عمقی یک نقطه از نمونه توسط آشکارساز ثبت می‌شود. برای انجام تصویربرداری سه‌بعدی، باید نمونه در صفحه نوردهی حرکت داده شود تا اطلاعات عمقی تمام نقاط سطح نمونه ثبت شود [۱-۴].

در این مقاله، نتایج ساخت و درجه‌بندی یک میکروسکوپ مقطع‌نگار همدوس نوری طیفی ارائه شده است. با استفاده از این چینش، ضخامت‌سنجی یک لامل به منظور بررسی دقت OCT ساخته شده ارائه شده است. همچنین رابطه افزایش عمق داده‌برداری با کاهش دامنه اطلاعات به‌دست آمده بررسی شده‌است.

۲- مبانی نظری مقطع‌نگاری نوری در فضای‌طیفی

اگر یک محیط تقریبا ناهمگن توسط یک باریکه گوسی تحت تابش قرار گیرد، در این صورت کمره باریکه گوسی را می‌توان با تقریب، به صورت یک موج تخت در نظر گرفت، در این صورت نمونه توسط موج تخت زیر تحت تابش قرار گرفته است [۱-۳]:

$$V^{(i)} = A^{(i)} \exp(ik^{(i)} r - i\omega t) . \qquad (۱)$$

در معادله (۱)، $k^{(i)}$ عدد موج نور فرودی و $A^{(i)}$ دامنه موج فرودی است. با استفاده از تابع‌گرین $G_H(r,r')$، موج پراکنده شده به‌صورت جواب تقریبی معادله Helmholtz، به‌صورت:

$$V_{(s)} = V^{(i)} + \frac{1}{4\pi}\int_{vol(r')} G_H(r,r') d^3 r' \times \int_{vol(r')} F_s(r',k) V^{'(i)} d^3 r' \qquad (۲)$$

خواهد بود، که $V_{(s)}$ موج پراکنده شده است. انتگرال‌گیری بر روی حجمی از نمونه، که تحت تابش قرار گرفته است انجام می‌شود. دامنه نسبی موج‌های پراکنده شده توسط پتانسیل پراکندگی $F_s(r,k)$ مشخص می‌شود:

$$\mathrm{F_s}(r,k) = k^2[m^2(r,k) - 1] . \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، m ضریب شکست مختلط نمونه است. پرتو پراکنده شده از حجم همدوسی در داخل نمونه، در فاصله d که بسیار بیشتر از طول همدوسی چشمه‌ی نور مورد استفاده است ثبت می‌شود. در این صورت با استفاده از تقریب میدان دور برای دامنه موج پراکنده شده داریم:

$$A^{(s)} = \frac{A^{(i)}}{4\pi d}\int_{V'} F_s(r') \exp(-iK.r') dr'^3 \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، $K = k^{(s)} - k^{(i)}$، برآیند بردار موج فرودی و موج پراکنده شده است. این رابطه، شکل ساده شده نظریه مقطع‌نگاری با روش پراکندگی است که به‌صورت پتانسیل پراکندگی نمونه از طریق اعمال تبدیل فوریه معکوس از موج‌های پراکنده شده قابل محاسبه است. شدت موج پراکنده‌شده در فضای طیفی، $I_S(\tau)$ در رابطه (۵) نمایش داده شده است [۲]:

$$I_{(S)}(\tau) = I_0[\sum_i (|R_R|^2 + |R_i|^2) + 2\sum_{i,j,i\neq k} R_i R_j^* \Gamma[\tau \mp (\tau_i - \tau_j)] + 2\sum_i R_R^* R_i \Gamma[\tau \mp (\tau_i - \tau_R)]]. \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، R_R ضریب مختلط بازتاب از بازوی مرجع، R_i و R_j ضرایب بازتاب مختلط از لایه‌های مختلف نمونه، I_0 شدت موج فرودی و $\Gamma(\tau)$ تابع همدوسی چشمه نور به‌صورت تابعی از تاخیر زمانی (τ) است. در رابطه (۵)، جمله اول مقداری ثابت است که شامل موج‌های پراکنده شده در $\tau = 0$

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

است. جمله دوم، تداخل بین موج‌های پراکنده‌شده از لایه های مختلف است. جمله سوم، تداخل موج‌های پراکنده شده از لایه‌های مختلف با موج مرجع بازتاب شده از آینه مرجع است. تفکیک‌پذیری محوری مقطع‌نگار همدوس با رابطه (۶) قابل محاسبه است:

$$\Delta z = \frac{2\ln 2}{\pi}\frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}. \quad (۶)$$

رابطه (۶)، λ_0 طول موج مرکزی چشمه نور و $\Delta\lambda$ پهنای طیفی چشمه نوری مورد استفاده است. تفکیک‌پذیری عرضی، مشابه با میکروسکوپ هم‌کانون با رابطه (۷) قابل محاسبه است [۱]:

$$\Delta x = \frac{4\lambda_0}{\pi}\frac{f_{obj}}{d}. \quad (۷)$$

رابطه (۷)، f_{obj} فاصله کانونی عدسی و d پهنای باریکه است. در روش فوریه طیفی، بیشترین عمقی از نمونه که می‌توان اطلاعات را از آن دریافت کرد به توان تفکیک طیف‌سنج و طول موج مرکزی چشمه‌نوری وابسته است. شدت ثبت شده در طیف‌سنج یک مقدار حقیقی است که در این صورت تبدیل فوریه آن به‌صورت متقارن هرمیتی است. به‌دلیل وجود تصویر قرینه، تنها نصف پیکسل‌ها N، دارای اطلاعات مفید هستند [۳]. در این صورت بیشترین عمق داده‌برداری از نمونه توسط رابطه (۸) قابل بیان است:

$$l_{\max} = \frac{\ln 2}{2\pi}\frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}N \quad (۸)$$

در OCT، به‌دلیل محدود بودن پهنای پیکسل‌های آشکارساز در طیف‌سنج، اطلاعات به‌دست آمده در فضای فوریه، به صورت کانولوشن تابع rect (متناظر با شکل مربعی هر پیکسل) با شدت تداخلی است.

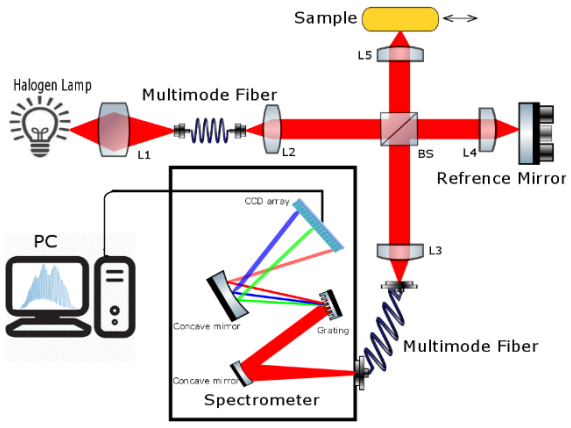
$$R(z) = \frac{\sin^2(\pi z d/2d)}{(\pi z/2d)^2}\exp\left[-\left(\frac{\pi\omega z}{d}\right)^2\frac{1}{8\ln 2}\right] \quad (۹)$$

با توجه به نظریه کانولوشن، دامنه اطلاعات به‌دست آمده در فضای مکان در یک تابع sinc (متناظر با تبدیل فوریه تابع rect) ضرب شده است. رابطه (۹)، دامنه اطلاعات به‌دست آمده را به‌عنوان تابعی از عمق بیان می‌کند. در این رابطه ω نسبت قدرت تفکیک طیفی طیف‌سنج به فاصله نمونه‌برداری طیف‌سنج و d بیشترین عمق داده‌برداری است[۲].

برای تحلیل اطلاعات به‌دست آمده، ابتدا به‌منظور حذف جمله ثابت در معادله (۵)، شدت باریکه مرجع و نمونه را ثبت می‌کنیم. سپس، شدت‌های ثبت‌شده را از شدت تداخلی طیف‌سنج، تفریق می‌کنیم. با تبدیل طول‌موج به عدد موج و استفاده از روش درون‌یابی، شدت تداخلی برحسب عدد موج به‌دست خواهد آمد که با اعمال تبدیل فوریه، اطلاعات عمقی نمونه به‌دست خواهد آمد [۴-۶].

۳- نتایج تجربی

در شکل ۱، چینش مورد استفاده برای OCT نمایش داده شده است. چشمه نوری مورد استفاده لامپ هالوژن ۱۲ولت، ۱۰۰ وات است که دارای طول همدوسی ۱٫۶ میکرومتر است. باریکه‌ی نوری که توسط فیبر مالتی‌مد به تداخل‌سنج مایکلسون هدایت شده، توسط عدسی L2 به‌صورت موازی به دو شیئی میکروسکوپ مشابه در دو بازوی مرجع و نمونه تابیده خواهد شد.

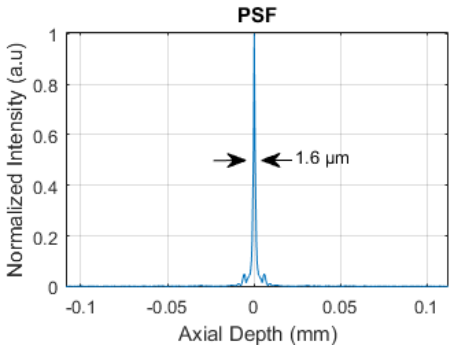


شکل ۱: چینش مورد استفاده در SD-OCT

در OCT، تابع پهن‌شدگی نقطه‌ای محوری برابر با پهنای مکانی نصف بیشینه تابع خودهمبستگی است. قضیه وینر-کینشاین، بیان می‌کند که چگالی طیفی و تابع خودهمبستگی یک زوج فوریه تشکیل می‌دهند، با توجه به این قضیه، با اعمال تبدیل فوریه بر چگالی طیفی چشمه نوری، تفکیک‌پذیری محوری به‌دست آمده به صورت تجربی، در شکل ۲ نمایش داده شده است.

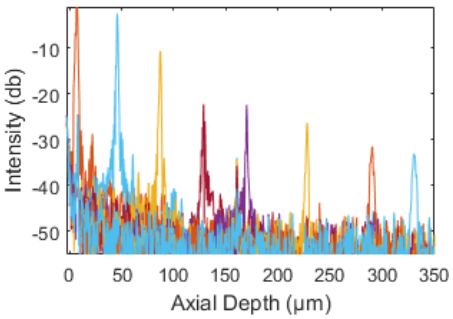
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



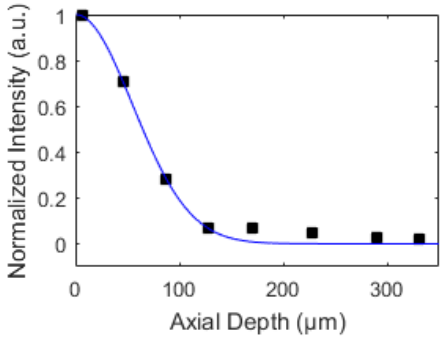
شکل ۲: تابع پهن‌شدگی نقطه‌ای مقطع‌نگار همدوس نوری طیفی.

شکل ۳، شدت‌های لگاریتمی ثبت شده از جابه‌جایی بازوی نمونه در عمق داده‌برداری را بر حسب مکان، نشان می‌دهد. در شکل۳، اثر افزایش عمق داده‌برداری بر کاهش حساسیت سیگنال OCT قابل مشاهده است.



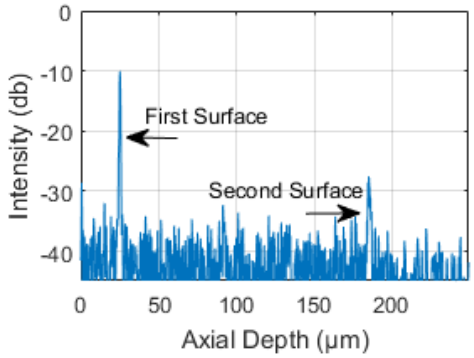
شکل ۳: کاهش حساسیت سیگنال OCT با افزایش عمق داده‌برداری.

با قرار دادن عمق داده‌برداری ۳۵۰ میکرومتر و ω برابر با ۳٫۲ در رابطه (۹)، تطابق این رابطه با مقادیر تجربی بررسی شده است. شکل ۴، برازش تابع به‌دست آمده از رابطه (۹) بر بیشینه‌ی شدت قله‌ها در شکل۳ را نشان می‌دهد. شکل۴، تطابق خوبی بین مقادیر تجربی و نظری را نشان می‌دهد.



شکل ۴: اثر افزایش عمق داده‌برداری برکاهش حساسیت سیگنال OCT.

به منظور کالیبره کردن OCT، یک لامل را به‌عنوان نمونه تحت بررسی قرار داده‌ایم که با اطلاع از ضریب شکست شیشه، ضخامت لامل مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵، قله‌های متناظر با دو سطح لامل را نمایش می‌دهد. با استفاده از OCT، ضخامت لامل ۱۶۱ میکرومتر به‌دست آمده است که با ضخامتی که از اندازه‌گیری با ریزسنج میکرونی به‌دست آمده (۱۶۰ میکرومتر)، تطابق خوبی دارد.



شکل ۵: درجه‌بندی مقطع‌نگار همدوس نوری با ضخامت‌سنجی لامل.

۴- نتیجه‌گیری

در این کار میکروسوپ مقطع‌نگار همدوس ساخته شد و با استفاده از لامپ هالوژن به‌عنوان چشمه‌نوری ناهمدوس در ناحیه طیف مرئی، تفکیک‌پذیری محوری آن برابر ۱٫۶ میکرومتر تعیین شد که تفکیک‌پذیری در این حالت، افزایش چشم‌گیری نسبت به نمونه‌های IR داشته است. همچنین اثر افزایش عمق داده‌برداری بر کاهش حساسیت سیگنال OCT، مورد بررسی قرار گرفت که نتایج، تطابق خوبی با مقدار نظری را نشان می‌دهد. در ادامه، دقت اندازه‌گیری عمقی با اندازه‌گیری ضخامت یک لامل مورد بررسی قرار گرفت، که مقادیر به‌دست آمده تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده با ریزسنج را نشان می‌دهد.

مراجع

[1] A. F. Fercher, W. Drexler, C. K. Hitzenberger, and T. Lasser "*Optical coherence tomography—principles and application*", IOP Publishing, 2003.

[2] W. Drexler, J. G. Fujimoto, "*Optical Coherence Tomography Technology and Applications*", Springer reference, 2016.

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

[4] Z. Yaqoob, J. Wu, and C. Yang, "Spectral domain optical coherence tomography: a better OCT imaging", Bio Techniques, 2005.

[5] A.F.Fercher, C. K. Hitzenberger, M. Sticker, E. Moreno-Barriuso, R. Leitgeb, W. Drexler, H. Sattmann, "A thermal source technique for optical coherence tomography", ELSEVIER Optics Communications, page 57-64, 2000.

[6] Yu-Wei Qin, Hong Zhao, Zhong-Qin Zhuang, "High resolution spectral-domain optical coherence tomography using thermal light source", Springer science, 2011.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]