بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

فشارسنج اپتیکی با آشکارسازی هم‌کانون

علی قربانی ، محمد نوری ، میلاد سالاری نسب، داریوش عبداله‌پور

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان ، بلوار پروفسور ثبوتی ، زنجان

چکیده – در این مقاله یک روش جدید فشار سنجی اپتیکی مبتنی بر شدت، با آشکار سازی هم‌کانون معرفی می شود. باریکه لیزر بوسیله یک عدسی شیئی روی قسمتی از یک دیافراگم منعطف بازتابی، کانونی شده و با تغییر شکل دیافراگم در اثر تغییر فشار، شدت نور عبوری از روزنه‌ایی مناسب که در صفحه هم‌کانون قرار گرفته است، ثبت می‌شود و با روندی مشخص به اندازه‌گیری فشار تبدیل می شود. نتایج سنجش فشار در محدوده ۹۸/۸۵ kPa تا ۱۰۳/۶ kPa گزارش شده و روند اندازه‌گیری تشریح شده است. از مزیت‌های این روش، علاوه بر ساده بودن چیدمان و تحلیل داده‌ها، می‌توان به تنظیم‌پذیری حساسیت و محدوده قابل اندازه‌گیری فشار، با انتخاب مناسب عدسی شیئی و جنس دیافراگم اشاره کرد.

کلید واژه- فشارسنج اپتیکی، سنجش مبتنی بر شدت، آشکارسازی هم‌کانون

Optical Pressure Sensor with Confocal Detection

Ali Ghorbani, Mohamad Nouri, Milad Salari Nasab, Daryoush Abdollahpour*

Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Prof. Sobouti Blvd., Zanjan

*dabdollahpour@iasbs.ac.ir

Abstract- In this paper, a new method for intensity-based optical pressure sensing with confocal detection scheme is introduced. A continuous laser beam is focused on a reflective flexible diaphragm by a microscope objective. Upon a deformation of the diaphragm due to a pressure change, the transmitted light intensity from a pinhole placed in the confocal plane, is recorded and converted to the pressure measurements by a certain procedure. Results of the pressure measurement in the range of 98.65 kPa to 103.6 kPa are reported and the procedure of the measurement is explained. In addition to simplicity of the apparatus and interpretation of the recorded signals, the method can be readily modified to operate with a required sensitivity in a desired pressure range. This can be achieved by utilizing a different microscope objective and diaphragm material.

Keywords: Optical pressure sensor, Intensity-based detection, confocal detection

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

مقدمه

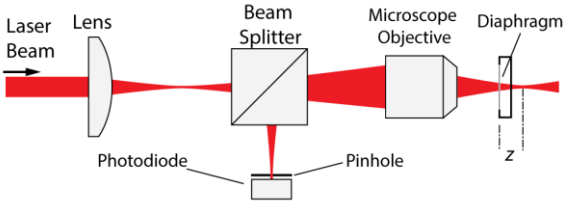
فشارسنج‌ها بر اساس کارکردشان انواع گوناگونی دارند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به فشارسنج‌های مکانیکی، خازنی، مغناطیسی، پتانسیومتری، پیزوالکتریکی و اپتیکی اشاره کرد [۱]. بجز فشارسنج‌های مکانیکی، در بقیه فشارسنج‌ها اندازه‌گیری نهایی به اندازه‌گیری سیگنال الکترونیکی ناشی از تغییرات فشار استوار است؛ با این تفاوت که در بسیاری از فشارسنج‌ها اندازه‌گیری سیگنال الکترونیکی باید در محل تغییرات فشار انجام شود. بنابراین، سنجش فشار در فضاهایی با میدان‌های الکترومغناطیسی قوی، مختل شده و همراه با خطا خواهد بود. از طرفی، در کاربردهای خاصی نظیر اندازه‌گیری فشار گازهای اشتعال‌پذیر، اندازه‌گیری در-محل مخاطره‌آمیز خواهد بود. با این حال، در دسته خاصی از فشارسنج‌های اپتیکی با انتقال و تبدیل سیگنال نوری به الکترونیکی در فاصله‌ایی دور از محل، این محدودیت‌ها قابل رفع است [۲].

فشارسنج‌های نوری بر مبنای اندازه‌گیری تغییرات ویژگی‌های باریکه نوری نظیر قطبش، فاز، شدت و طیف، در عبور، انتقال یا بازتاب باریکه نوری از یک المان اپتیکی در اثر تغییر فشار، پایه‌ریزی شده‌اند. فشارسنج‌های مبتنی بر تغییرات طیفی و شدت عموماً در چیدمان‌های تداخل‌سنجی طراحی شده‌اند [۳-۵]. این دسته از فشارسنج‌ها از شرایط محیطی دیگری نظیر دما نیز به صورت قابل توجهی تاثیر می‌پذیرند [۶]. علاوه بر این، سیستم‌های مبتنی بر اندازه‌گیری شدت غیرتداخلی نیز گزارش شده‌اند [۶-۷].

در این مقاله روش جدیدی برای فشارسنجی اپتیکی مبتنی بر شدت گزارش می‌شود که علاوه بر کم هزینه بودن، تمامی مزایای روش‌های اپتیکی را دارا بوده و حساسیت و محدوده کاری آن با تغییرات ساده‌ایی در چیدمان اپتیکی قابل تنظیم است. روش حاضر بر مبنای آشکارسازی هم‌کانون نور بازتابی از سطح یک دیافراگم استوار است. آشکارسازی هم-کانون در آرایش‌های مختلف میکروسکوپی هم‌کانون مورد استفاده قرار می‌گیرد و مزیت آن در آشکارسازی سیگنال-های گسیلی (بازتابی) از محل کانون و جلوگیری از آشکارسازی نور گسیلی (بازتابی) از نقاط یا صفحات غیرکانونی است. این مزیت عمده، امکان لایه‌بندی نوری نمونه و تصویربرداری سه-بعدی (با قابلیت تفکیک عمق) را فراهم می‌کند [۸].

نحوه‌ی کارکرد فشارسنج

طرحی از چیدمان فشارسنج در شکل ۱ نشان داده است. باریکه لیزر پیوسته ($\lambda = 632/8$ nm)، بعد از کانونی شدن توسط یک عدسی کروی با فاصله کانونی ۲۵ mm و عبور از یک باریکه‌شکن، بوسیله یک عدسی شیئی کانونی می‌شود. برای بدست آوردن کوچکترین اندازه لکه در صفحه کانونی عدسی شیئی، فاصله عدسی شیئی و عدسی به صورتی انتخاب شده است که باریکه لیزر بعد از عبور از عدسی تمام دهانه عدسی شیئی را پوشش دهد. دیافراگمی انعطاف‌پذیر، با پوششی آینه‌ایی، در نزدیکی صفحه کانونی عدسی شیئی قرار گرفته و نور بازتابی از آن بعد از عبور از عدسی شیئی، و بازتاب از باریکه‌شکن به آشکارساز فوتودیودی می‌رسد. برای آشکارسازی هم‌کانون، روزنه‌ایی با گشودگی مناسب در صفحه هم‌کانون کانون اصلی شیئی قرار گرفت.



شکل ۱: طرحی از چیدمان آشکارسازی هم‌کانون؛ Z : جابه‌جایی دیافراگم نسبت به صفحه‌ی کانون.

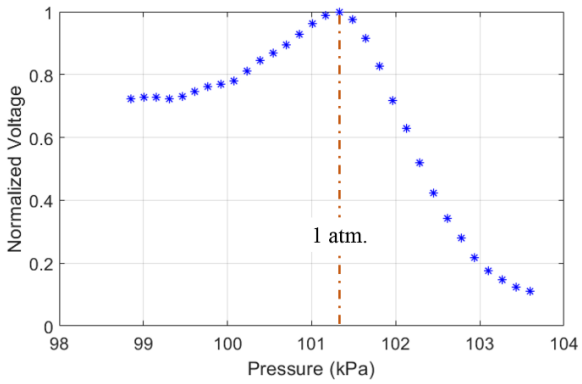
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

به این ترتیب، با جابجایی دیافراگم از صفحه کانون، اندازه لکه بازتابی روی روزنه بزرگ‌تر شده و شدت نور رسیده به فوتودیود، کاهش می‌یابد. بیشترین تراز سیگنال (بر حسب ولت) هنگامی بدست آمد که دیافراگم درست در صفحه کانونی شیئی قرار می‌گرفت. با تحلیل انتشار باریکه گاوسی در این سیستم، سیگنال آشکارسازی شده توسط فوتودیود بعد از روزنه، به صورت زیر بدست می‌آید

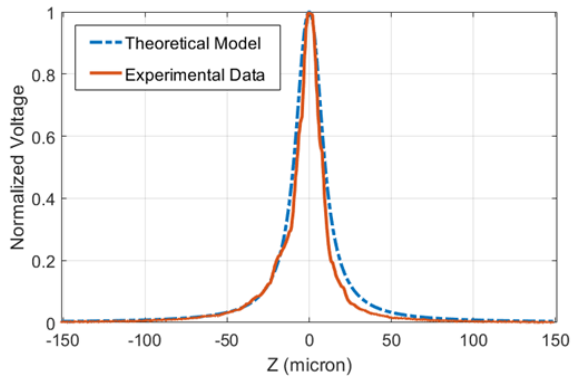
$$S(z)=S_0\left[1-\exp\left(-2R^2\Big/\left(M^2 w_0^2\eta\right)\left(1+\left(z/M\,z_0\eta\right)^2\right)\right)\right], \quad (1)$$

که در آن، w_0 پهنای کمر باریکه در کانون اصلی، $z_0=\pi w_0^2/\lambda$ طول ریلی باریکه، M بزرگ‌نمایی عدسی شیئی، z جابجایی دیافراگم نسبت به صفحه کانون، R شعاع گشودگی روزنه، S_0 بیشینه سیگنال و $\eta=1+(z/z_0)^2$ هستند. در چیدمان این فشار سنج، $w_0=1\,\mu\text{m}$، $R=15\,\mu\text{m}$ و $M=10$ انتخاب شده‌اند.



شکل ۲: نمودار ولتاژ اندازه‌گیری شده (بهنجار) بوسیله فوتودیود بر حسب فشار درون محفظه.

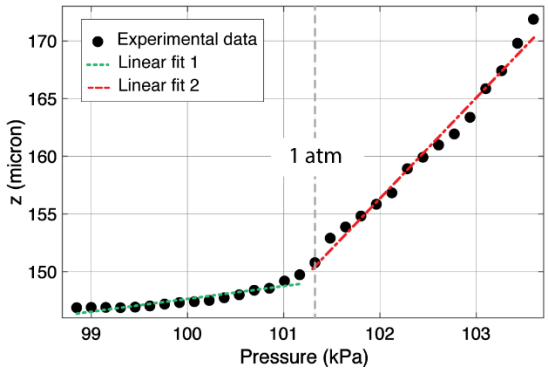
دیافراگم مورد استفاده در این فشارسنج از لایه‌نشانی آلومینیوم بر روی یک لامل مستطیلی با طول ۲۵ mm، عرض ۲۵ mm و ضخامت ۱۲۰ µm تهیه شد که به وسیله‌ی چسب غیرکشسان، از طرف ضلع‌های مستطیل به یک قطعه فلزی با گشودگی دایروی به قطر ۱۵ mm، چسبانده شد. در طرف دیگر قطعه فلزی، روزنه‌ایی به قطر ۱ mm ایجاد شده و از طریق یک کانال هوای پلاستیکی به میکروپمپ متصل شده و از عدم نشت هوا از این محفظه در فشارهای کمتر و بیشتر از یک اتمسفر اطمینان حاصل شد. محفظه طوری در چیدمان قرار گرفت که سطح بازتابنده دیافراگم، در فشار اتمسفر، درست در کانون اصلی عدسی شیئی قرار گرفته و بیشترین دامنه سیگنال توسط فوتودیود ثبت شود. با افزایش و کاهش فشار، به ترتیب تحدب و تقعری در دیافراگم ایجاد می‌شد با این تفاوت که انتظار می‌رفت به دلیل نحوه چسباندن دیافراگم، یک اندازه مشخص افزایش یا کاهش فشار باعث تحدب و تقعر یکسان نشده و تقارن تغییر سیگنال به ازای افزایش یا کاهش فشار از بین برود. سپس، با تغییر فشار درون محفظه، در محدوده ۹۸/۸۵ kPa تا ۱۰۳/۶ kPa سیگنال دریافتی از فوتودیود در فشارهای مختلف با خطایی کمتر از ۵٪ اندازه‌گیری شد (شکل ۲). در گام بعد، به منظور نگاشت ولتاژ ثبت شده به جابجایی دیافراگم، فشار درون محفظه در یک اتمسفر ثابت نگه داشته شده و کل محفظه بوسیله یک جابجاگر موتوری در جهت انتشار باریکه، با سرعت ثابت در محدوده ۳۰۰ میکرونی در طرفین کانون، حرکت داده شده و به صورت همزمان خروجی فوتودیود ثبت و به نمودار ولتاژ بر حسب جابجایی تبدیل شد (شکل ۳). همانطور که ملاحظه می‌شود انطباق خوبی بین داده‌های ثبت شده با مدل رابطه (۱) وجود دارد.



شکل ۳: نمودار ولتاژ فوتودیود بر حسب فاصله دیافراگم از محل کانون اصلی شیئی، خط پر: داده‌های تجربی؛ نقطه-خط: مدل تحلیلی بر اساس رابطه (۱).

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]



شکل ۴: نمودار جابجایی دیافراگم بر حسب فشار

در نهایت، با ترکیب داده‌های شکل ۲ و شکل ۳ نمودار جابجایی (تغییر انحناء) دیافراگم بر حسب فشار اعمالی بوسیله میکروپمپ استخراج شد (شکل ۴). عدم تقارن، در اطراف فشار اتمسفری، ناشی از یکسان نبودن عمق تحدب و تقعر دیافراگم به ازای تغییر فشار یکسان است. با این حال، برای هر کدام از محدوده‌های کاهش و افزایش فشار، با دقت خوبی می‌توان دو خط با شیب‌های متفاوت برازش کرده و در سنجش در هر کدام از این نواحی به ترتیب از برازش خطی ۱ و ۲، با شیب‌های ۱/۱ µm/kPa و ۸/۷ µm/kPa، بهره برد. باید توجه داشت که شیب این خطوط با حساسیت اندازه‌گیری در هر کدام از نواحی برابر است. از طرفی، محدوده و حساسیت اندازه‌گیری در این روش، به ترتیب با انتخاب مناسب بزرگ‌نمایی شیئی و جنس دیافراگم قابل تنظیم هستند، علیرغم اینکه با تغییر هر کدام کالیبراسیون مجدد لازم خواهد بود. به عنوان مثال با انتخاب دیافراگمی ضخیم‌تر و عدسی شیئی با بزرگنمایی بیشتر می‌توان گستره اندازه‌گیری را، به تغییر فشارهای قابل توجه، گسترش داد.

علاوه بر این، با کوپل کردن نور عبوری از روزنه به یک فیبر نوری می‌توان تبدیل سیگنال نوری به الکترونیکی را به فواصلی دور از محل تغییر فشار منتقل کرده و در کاربردهای شامل میدان‌های الکترومغناطیسی قوی یا گازهای اشتعال‌پذیر از آن بهره جست.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک فشارسنج اپتیکی جدید بر اساس آشکارسازی هم‌کانون معرفی شده و نتایج اندازه‌گیری تغییرات فشار در محدوده ۹۸/۸۵ kPa تا ۱۰۳/۶ kPa گزارش شده است. این حسگر مبتنی بر اندازه‌گیری تغییرات شدت با آشکارسازی هم‌کانون، ساختار نسبتاً ساده و کم هزینه‌ایی داشته و تحلیل نتایج آن از سایر روش‌های فشارسنجی اپتیکی ساده‌تر است. با تغییر عدسی شیئی و جنس دیافراگم، محدوده کاری و حساسیت قابل تنظیم بوده و حتی با استفاده از دیافراگمی مناسب می‌توان از این ابزار به عنوان میکروفون نوری نیز استفاده کرد. علاوه بر این، با کوپل کردن نور عبوری از روزنه به یک فیبر نوری، می‌توان ثبت داده‌ها را به فواصل دور انتقال داد.

مرجع‌ها

[1] D. Tandeske, Pressure Sensors: Selection and Applications, CRC Press, 1990.

[2] A. Layeghi, M. Jamshidi, and H. Latifi, “Design and fabrication a fiber-optic pressure sensor based on diaphragm”, Icop 2015, pp. 4–7, 2015.

[3] W. Wang, N. Wu, Y. Tian, C. Niezrecki, and X. Wang, “Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm”, Opt. Express, Vol. 18, No. 9, pp. 9006-9014, 2010.

[4] C. Wagner, J. Frankenberger, and P. P. Deimel, “Optical pressure sensor based on a Mach-Zehnder interferometer integrated with a lateral a-Si:H p-i-n photodiode”, IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 5, No. 10, pp. 1257–1259, 1993.

[5] E. Cibula, D. Đ. Đonlagic´, “Miniature fiber-optic pressure sensor with a polymer diaphragm”, Appl. Opt., Vol. 44, No. 14, pp. 2736–2744, 2005.

[6] J. N. Fields, C. K. Asawa, O. G. Ramer, and M. K. Barnoski, “Fiber optic pressure sensor”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 67, No. 3, pp. 816–818, 1980.

[7] C. Li, R. Cheng, Y. Zhao, M. Hao, P. Chen, and X. Fan, “Optical micro-electro-mechanical-system pressure sensor based on light intensity modulation”, Micro Nano Lett., Vol. 10, No. 10, pp. 491–495, 2015.

[8] S. W. Paddock, *Confocal Microscopy: Methods and Protocols*, New Jersey: Humana Press, 1999

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]