بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی و ساخت سنسور فشار فیبر نوری مبتنی بر فابری پرو دیافراگمی

اعظم لایقی، محسن جمشیدی سرشت، حسام الدین خاشعی، حمید لطیفی

تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده – در این مقاله سنسور فشار فیبر نوری بر اساس تداخل سنج فابری پرو ارائه شده است. طراحی و ساخت سنسور بر پایه تکنیک ساختار میکرو الکترو مکانیکی (*MEMS*) است. آنالیز دیافراگم پلیمری به صورت تحلیلی انجام شده است. سنسور فشار پاسخ تقریبا خطی به فشار اعمالی در محدوده ۰ تا ۱۵*Kpa* در دمای آزمایشگاه نشان می دهد. برای سنسورهایی با ضخامت دیافراگم ۱/۱ *mm* و ۳/۱ *mm* به ترتیب حساسیت های ۶۴۴- *nm/Kpa* و ۴۱۷- *nm/Kpa* بدست آمده است که کمترین حد آشکارسازی به ترتیب ۴×۱۰^{-۳} *Pa* و ۶×۱۰^{-۳} *Pa* می باشد. همچنین مدول یانگ و فرکانس تشدید این دیافراگم بر اساس نتایج تجربی محاسبه شده است. ساخت آسان، اندازه کوچک، و پاسخ خطی این سنسور آن را برای بسیاری از کاربردهای صنعتی مناسب می سازد.

کلید واژه- دیافراگم ، حسگر فشار، فیبر نوری، فابری پرو.

Design and fabrication a fiber-optic pressure sensor based on diaphragm Fabry-Perot

Azam Layeghi, Mohsen Jamshidi seresht, hesamodin khashee, Hamid Latifi

Laser & Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran, Iran

Abstract- This paper presents the fiber pressure sensor based on Fabry-Perote interferometry. The design and fabrication of the sensor are based on MEMS technique. The polymer diaphragm analysis was done theoretically. The pressure sensor response is approximately linear in the range from ۰ to ۱۵ Kpa at room temperature. For sensor with ۱,۱mm and ۳,۱ mm diaphragm thickness, the sensitivities are -۶۴۴ nm/Kpa and -۴۱۷ nm/Kpa with limit of detection of ۴×۱۰^{-۳} Pa and ۶×۱۰^{-۳}Pa, respectively. Also, the young's modulus and resonance frequency of diaphragm was calculated according to experimental results. The simple fabrication, small size, and linear response make the sensor suitable for many industrial applications.

Keywords: Diaphragm, Fabry-Perot, Fiber optic, Pressure sensor.

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

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

۱- مقدمه

سنسورهای فشار در صنایع اتومبیل سازی، هوا- فضا، بهداشت و درمان کاربردهای فراوانی دارند. به طورمثال در موتورجت اندازه گیری فشار داخل کمپرسور، به آشکارسازی و کنترل خروش و چرخش گاز و بهبود عملکرد و بازدهی آن کمک می کند. تلاش های زیادی برای ساخت این سنسورهای کوچک هم به شکل الکتریکی و هم به شکل مدارهای مجتمع نوری صورت پذیرفته است. درمقایسه با سنسورهای الکتریکی که معمولا بر اساس آشکارسازی مقاومت پیزوالکتریک و خازنی می باشند، سنسورهای فیبر نوری دارای مزایای تفکیک پذیری بالا، حساسیت بالا و ایمن در برابر تداخل های الکترومغناطیس می باشند. در میان سنسورهای فشار فیبر نوری از تداخل سنج فابری پرو بسیار استفاده شده است.

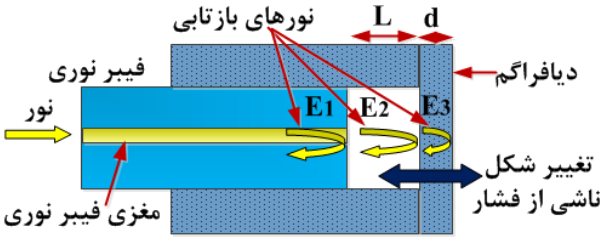
سنسورهای فیبر نوری مبتنی برتداخل سنج فابری پرو با دیافراگم های سیلیکونی و پلیمری گزارش شده اند [۱-۲]. در این مقاله، از دیافراگم پلیمری برای ساخت سنسور اندازه گیرنده فشار در حالت دینامیکی بهره گرفته شده است. طراحی به روش تحلیلی برای بهینه کردن سنسور برای فرکانس دینامیکی و حساسیت انجام شده است. با وابسته بودن مدول یانگ پلیمر به طریقه ساخت و ابعاد آن، مدول یانگ و فرکانس تشدید دیافراگم محاسبه شده است. از مزیت های این سنسور به ساخت آسان و حساسیت بالای آن در مقابل دیافراگم های سیلیکونی می توان اشاره کرد.

۲- تئوری عملکرد حسگر

در سنسور تداخلی فابری پرو خارجی نور از طریق فیبر نوری تک مد فرستاده می شود و سه بازتاب تولید می شود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است یک بازتاب از انتهای فیبر (E_1)، و سطوح داخلی (E_2) و خارجی دیافراگم (E_3) به وجود می آید. شدت بازتابی کل به صورت زیر نوشته می شود که A_1، A_2 و A_3 دامنه های میدان E_1، E_2 و E_3 هستند.

$$I(\lambda)=\left|E_1+E_2+E_3\right|^2 \qquad (۱)$$

$$=\left|A_1+A_2\exp(-\frac{j4\pi L}{\lambda}+\mathrm{j}\pi)+A_3\exp(-\frac{j4\pi(L+nd)}{\lambda})\right|$$



شکل ۱: تداخل سنج فابری پرو دیافراگمی.

L طول کاواک و d ضخامت دیافراگم، n ضریب شکست ناحیه دیافراگم و λ طول موج است. E_3 می تواند E_2 را تقویت و یا حذف نماید. این امر بستگی به ضخامت دیافراگم دارد. بنابراین کل طیف با پوش کندی تغییر می کند. اگر ضخامت دیافراگم در شرط زیر صدق نماید:

$$2nd=N\lambda+\frac{\lambda}{2},N=0,1,2,... \qquad (۲)$$

E_2و E_3 طبق رابطه (۳) دارای اختلاف فاز می باشند.

$$\frac{4\pi nd}{\lambda}+\pi=(2\,\mathrm{N}+2)\pi,\mathrm{N}=0,1,2,... \qquad (۳)$$

و بنابراین به صورت سازنده تداخل می کنند. با استفاده از معادلات (۲) و (۳) می توان ضخامت های بهینه دیافراگم را بدست آورد. برای مثال اگر λ=۱/۵۵ μm و n=۱/۴ باشد آنگاه ضخامت بهینه d_{opt} به ازای N=۵ برابر با ۳/۰۴۴ mm بدست می آید.

هنگامیکه فشار محیط تغییر نماید، دیافراگم و طول کاواک L طبق معادله (۴) تغییر می نماید [۳]

$$\Delta L=\frac{3(1-\nu^2)R^4}{16Ed^3}\Delta P \qquad (۴).$$

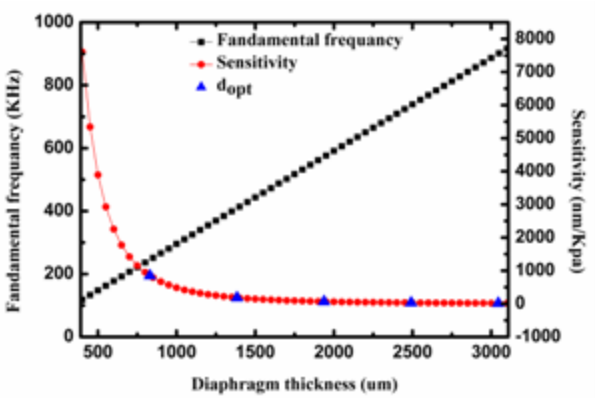
$$\triangleq S_p\Delta P$$

ν و E به ترتیب نسبت پواسون و مدول یانگ دیافراگم هستند. R شعاع دیافراگم، d ضخامت دیافراگم، Δp تغییر فشار محیط و S_p حساسیت سنسور فشار است. برای دیافراگمی با مواد و ابعاد معین، S_p ثابت است و منجر می شود تا Δp به طور خطی به ΔL وابسته باشد.

این پاسخ سنسور به تغییرات استاتیک یا کند تغییر است. همچنین در کاربردهای دینامیکی یا تغییرات با فرکانس بالا نیز می توان از این سنسور بهره گرفت. فرکانس طبیعی مد اصلی برای سنسور دیافراگمی با فرمول زیر تعیین می شود[۳]:

$$f_n=\frac{10.21h}{2\pi R^2}\left[\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}\right]^{1/2} \qquad (۵)$$

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



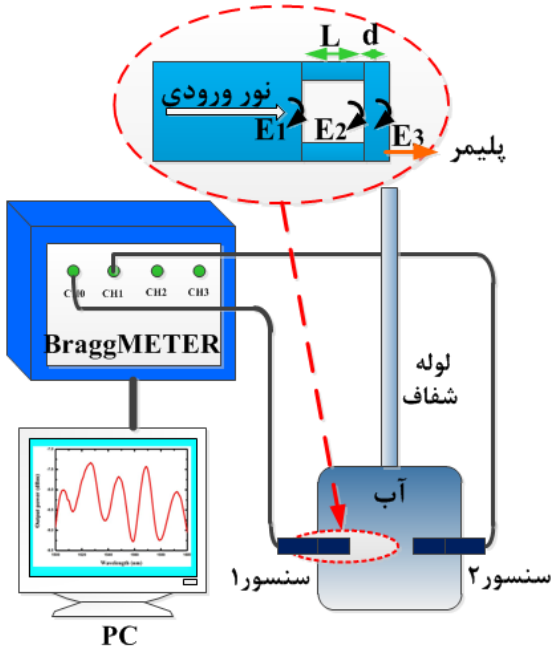
شکل ۲: حساسیت ، فرکانس تشدید و ضخامت بهینه دیافراگم بر حسب ضخامت دیافراگم.

شکل ۲ حساسیت و فرکانس تشدید را برای ضخامت های متفاوت دیافراگم طبق معادلات (۴)و (۵) نشان می دهد. در این مدل سازی نتایج برای پلیمری با مدول یانگ و ضریب پواسون به ترتیب ۷۵۰ Kpa و ۰/۴۵ در نظرگرفته شده است. شکل ۲ تغییر S_p بر حسب d را برای R برابر ۱/۲۵ mm نشان می دهد. هنگامیکه d کاهش می یابد، Sp به سرعت به چند nm/Kpa افزایش می یابد.

۳- نتایج تجربی

برای ارزیابی سنسور فشار مبتنی بر دیافراگم، از چیدمان نشان داده شده در شکل ۳ استفاده شده است. در این ساختار سنسورها در زیر ستونی از آب، در یک انتهای یک لوله پلاستیکی قرار داده شده اند. سنسورها به یک تحلیلگر طیف نوری متصل شده اند. با تغییر دادن ارتفاع آب در ستون لوله فشار طبق رابطه ρgh تغییر می نماید و این تغییر فشار با رزلوشن ۲/۵ pm ثبت شده است.

شکل ۴ طیف بزرگنمایی شده سنسور را تحت فشارهای گوناگون در مقیاس لگاریتمی نشان می دهد. با افزایش فشار طول کاواک L کاهش می یابد، بنابراین طیف دارای جابه جایی به سمت طول موج های کوچکتر دارد. به طور معکوس با محاسبه L می توان فشار را وامدوله کرد. اگر مکان یک دره با طول موج λ_ν تعیین شود، طول کاواک



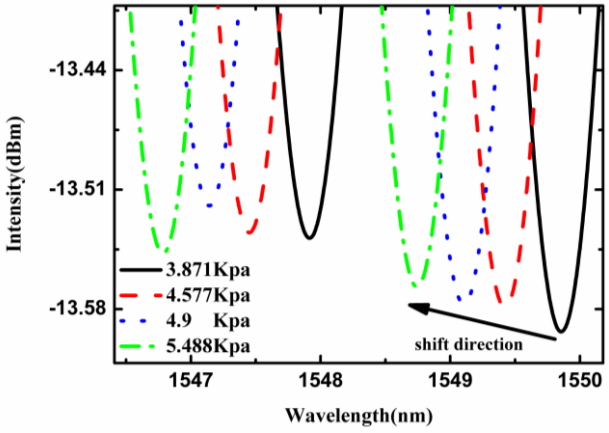
شکل ۳:شماتیک چیدمان آزمایش فشار و عملکرد حسگر.

می تواند توسط رابطه زیر محاسبه شود

$$\frac{4\pi L_{calc}}{\lambda_\nu}+\pi=2N\pi \Rightarrow L_{calc}=\frac{(2N-1)}{4}\lambda_\nu \qquad (۶)$$

N مرتبه تداخل است. با تعیین اولیه N از طیف L_{calc} متناسب با λ_ν بدست می آید.

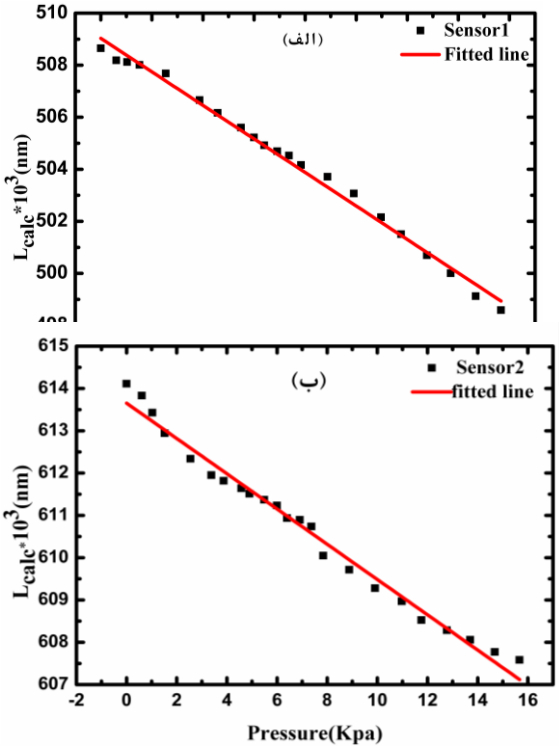
شکل ۵ نتایج تجربی حاصل از تغییرات طول کاواک را برای دو ضخامت دیافراگم نشان می دهد. حساسیت سنسور ۱ با



دیافراگم ۱/۱ mm برابر ۶۴۴- nm/Kpa بدست آورده شده است. حساسیت سنسور ۲ با ضخامت دیافراگم ۳/۱ mm برابر ۴۱۷- nm/Kpa بدست آمده است.

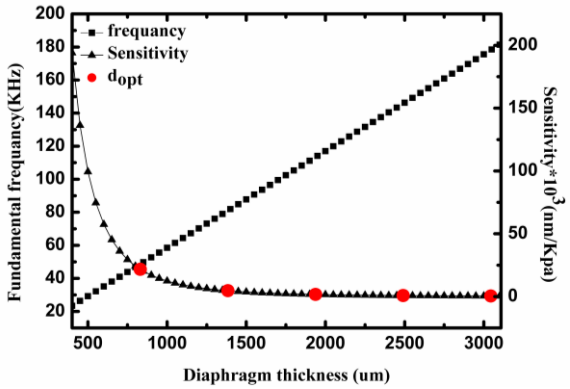
شکل ۴: طیف بازتابی حسگر برای چندین فشار مربوط به سنسور ۲.

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



شکل ۵: تغییرات طول کاواک برای دو دیافراگم الف)ضخامت ۱/۱mm ب) ضخامت ۳/۱ mm .

مدوله یانگ در پلیمر علاوه بر طریقه ساخت به ابعاد آن نیز بستگی دارد[۴]. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می شود، با در دست داشتن حساسیت سنسور می توان مدوله یانگ و سپس فرکانس تشدید حسگر را طبق معادلات (۴) و (۵) بدست آورد. برای سنسور ۲ مدول یانگ و فرکانس به ترتیب ۲۹/۳۹ Kpa و ۱۷۸ KHz محاسبه شده است.



بر اساس حساسیت بدست آمده از سنسور۲.

۴- نتیجه‌گیری

دراین مقاله به طراحی و ساخت سنسور فیبر نوری بر اساس تداخل سنج فابری پرو دیافراگمی پرداخته شده است. با ساخت سنسورهایی که ضخامت های دیافراگم آنها ۱/۱ mm و ۳/۱ mm است به ترتیب به حساسیت های ۶۴۴ nm/Kpa و ۴۱۷ nm/Kpa- و با کمترین حدهای آشکارسازی 4×10^{-3} Pa و 6×10^{-3} Pa دست یافتیم. از آنجا که مدول یانگ پلیمر به طریقه ساخت و ابعاد آن بستگی دارد، با در دست داشتن حساسیت سنسور به طریقه تجربی ، مدول یانگ و فرکانس تشدید سنسور ۲ به ترتیب ۲۹/۳۹ Kpa و ۱۷۸ KHz محاسبه شد.

مراجع

[۱] E. Cibula and D. Đonlagic, "Miniature fiber-optic pressure sensor with a polymer diaphragm," **Appl. Opt.**, vol. ٤٤, no. ١٤, pp. ٢٧٣٦_٤٤, ٢٠٠٥.

[۲] 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. ١٨, no. ٩, pp. ٣٢٢_٣٣٠, ٢٠١٠.

[۳] M. Di Giiovanni, *Flat and corrugated diaphragm design handbook*.New Yourk:M. Dekker,١٩٨٢.,

[٤] - M. S. Cheri, H. Latif, J. Sadeghi, M. Salehi, H. Shahraki, and H. Hajghassem, "*Real-time measurement of flow rate in microfluidi devices using a cantilever-based opto fluidic sensor*," **R. Soc. Chem.**, vol. 3, pp. 431–438, 2014.

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