بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

طراحی و شبیه‌سازی حسگر زیست محیطی ممز با تشخیص نوری

مهدیه خرسندی‌فرد، یاشار غلامی مهرآبادی و کیان جعفری*

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی برق، k_jafari@sbu.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک حسگر Bio-MEMS برای تشخیص مولکول‌های زیستی طراحی شده است. این حسگر مبتنی بر تنش سطحی عمل می‌کند. هنگامی که نمونه در مجاورت حسگر قرار گیرد، مولکول‌های هدف که در نمونه وجود دارند توسط گیرنده‌ها جذب می‌شوند. جذب شدن این مولکول‌ها باعث تغییر شکل صفحه متحرک می‌شود. با اندازه‌گیری مقدار جابجایی، مقدار مولکول‌های هدف در نمونه مشخص می شود. اندازه‌گیری مقدار جابجایی با استفاده از یک رزوناتور حلقه‌ای نوری به صورت فیلتر تمام‌گذر انجام می‌شود. استفاده از ساختار نوری در تشخیص، باعث افزایش حساسیت در این حسگر شده است. مطابق شبیه سازی‌های انجام شده حساسیت نوری این حسگر ۰/۰۰۵ $\frac{1}{\mathrm{nm}}$ می‌باشد. مد ارتعاشی اول برای حسگر طراحی شده ۹۹KHz و پهنای باند آن ۵KHz می‌باشد.

کلید واژه- حسگر، رزوناتور حلقه‌ای نوری، سامانه‌های میکروالکترومکانیکی، موجبر.

Design and simulation of a Bio-MEMS sensor with optical detection

Mahdieh Khorsandifard, Yashar Gholami Mehrabadi and Kian Jafari

k_jafari@sbu.ac.ir, Shahid Beheshti University, Electrical engineering department

Abstract- In this paper, a Bio-MEMS sensor is designed to detect biomolecules. This sensor is based on surface tension. When the sample is adjacent to the sensor, the target molecules present in the sample are absorbed by the receptors. The absorption of these molecules causes the plate to move. The amount of target molecules in a sample is determined by measuring the amount of displacement. The amount of displacement is measured using an optical ring resonator as all pass filter. The use of optical structure in detection has increased the sensitivity of this sensor. According to simulations, the optical sensitivity of this sensor is ۰/۰۰۵ $\frac{1}{nm}$. The first resonance mode for the sensor is ۹۹ KHz and its bandwidth is ۵ KHz.

Keywords: micro electromechanical systems, optical ring resonator sensor, waveguide.

* نویسنده مسئول

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

مقدمه

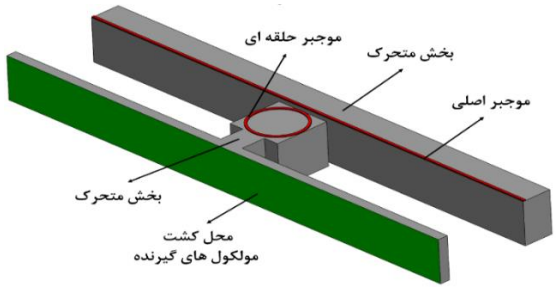
فناوری MEMS[1] در دهه‌های اخیر پیشرفت بسیاری داشته است. در این راستا زمینه Bio-MEMS نیز با تمرکز بر کاربردهای بیولوژیکی و شیمیایی پدید آمده است[۱]. حسگرهای Bio-MEMS بخش عمده ای از ادوات Bio-MEMS را تشکیل می‌دهند. در طول دهه‌های گذشته حسگرهای بسیار زیادی برای تشخیص یون‌ها، مولکول‌های کوچک، پروتئین‌ها، DNAها، سلول‌ها و بسیاری موارد دیگر توسعه پیدا کرده است[۲]. حسگرهای Bio-MEMS عموما از سنجش‌های الکتریکی یا نوری استفاده می‌کنند. در کاربردهایی که تغییرات ورودی کم می‌باشد و حساسیت بالاتری لازم باشد، از روش‌های نوری استفاده می‌شود.

گروه وسیعی از حسگرهای Bio-MEMS حسگرهای مبتنی بر تنش سطحی می‌باشند. این حسگرها دارای یک صفحه متحرک می‌باشند. با جذب مولکول‌های مورد نظر در نمونه، این صفحه متحرک جابجا می‌شود. با اندازه‌گیری جابجایی صفحه متحرک مقدار مولکول‌های جذب شده در نمونه اندازه‌گیری می‌شود[۳, ۴].

در این مقاله یک حسگر Bio-MEMS مبتنی بر تنش سطحی برای تشخیص مولکول‌های زیستی پیشنهاد شده است. این حسگر با توجه به مولکول‌های جذب‌کننده‌ای که بر روی سطح متحرک آن کشت داده می‌شود، می‌تواند برای تشخیص مولکول‌های زیستی متفاوت مانند قند خون، DNA، باکتری و... مورد استفاده قرار گیرد. حسگر پیشنهادی برای تشخیص جابجایی بخش متحرک از روش نوری بهره می‌برد. در این روش از یک رزوناتور حلقه‌ای نوری بهره گرفته شده است. با استفاده از روش بیان شده جابجایی‌های بسیار کوچک در بازه‌ی نانومتری نیز قابل اندازه‌گیری می‌باشد که باعث بهبود حساسیت و همچنین دقت بالای این حسگر می‌شود.

معرفی حسگر Bio-MEMS پیشنهادی

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این حسگر دارای دو بخش است. یک بخش که قسمت متحرک حسگر محسوب می‌شود و یک موجبر حلقه‌ای در این بخش قرار دارد و یک بخش ثابت که موجبر صاف بر روی آن قرار گرفته است. بخش متحرک حسگر دارای یک صفحه می‌باشد که از دو انتها ثابت است. بر روی سطح بیرونی این حسگر مولکول‌های گیرنده کشت داده می‌شود. این گیرنده‌ها به مولکول‌های خاصی واکنش نشان می‌دهند و آن‌ها را جذب می‌کنند. جذب این مولکول‌ها باعث تغییر در تنش سطحی این سطح می‌شود. سطح دیگر این صفحه دارای تنش سطحی ثابت است. لذا دو سطح این صفحه با یکدیگر اختلاف تنش سطحی پیدا می‌کنند. در نتیجه این اختلاف منجر به تغییر شکل صفحه می‌شود که مکان موجبر حلقه‌ای را مطابق شکل ۲ تغییر می‌دهد. به همین علت این صفحه را صفحه متحرک در نظر می‌گیریم. با اندازه‌گیری میزان جابجایی موجبر حلقه‌ای، میزان جابجایی صفحه متحرک و در نتیجه مقدار مولکول‌های جذب شده توسط مولکول‌های گیرنده مشخص می‌شود، که این کار با استفاده از رزوناتور حلقه‌ای نوری انجام می‌شود. ابعاد حسگر پیشنهادی در جدول ۱ نشان داده شده است.

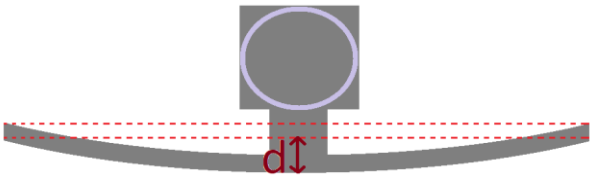


شکل ۱: حسگر Bio-MEMS پیشنهادی.

[1] Micro ElectroMechanical Systems

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]



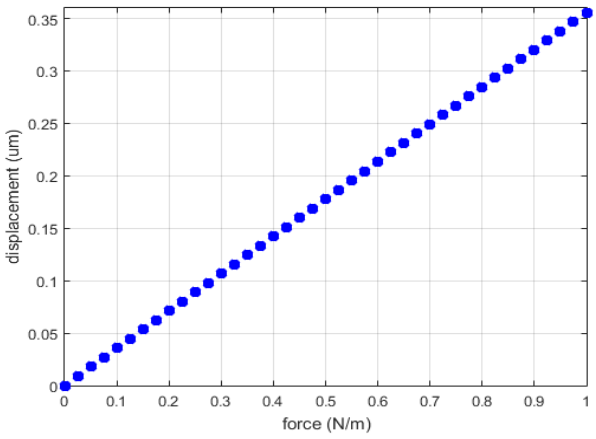
شکل ۲: نحوه تغییر شکل صفحه متحرک.

جدول ۱: ابعاد حسگر پیشنهادی.

طول صفحه متحرک	۱۰۰μm
عرض صفحه متحرک	۲μm
شعاع داخلی موجبر حلقه‌ای	۴/۹μm
شعاع خارجی موجبر حلقه‌ای	۵/۳μm
عرض موجبر اصلی	۰/۴μm
ضخامت موجبرها	۰/۲۲μm
ضخامت بخش SU8	۱۰μm
فاصله اولیه موجبر اصلی و حلقه‌ای	۰/۳۵μm

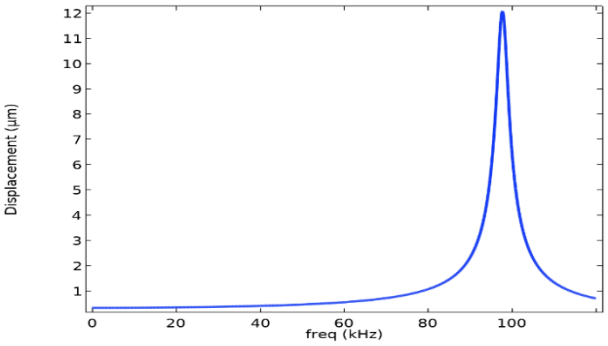
شبیه‌سازی مکانیکی

در این زیربخش مشخصات عملکردی مکانیکی حسگر پیشنهادی از جمله میزان جابجایی صفحه متحرک و پاسخ فرکانسی حسگر، شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌های مکانیکی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL انجام شده است. برای ایجاد اختلاف تنش سطحی مطابق [۵] از نیروی لبه‌ای استفاده می‌شود. مقدار این نیرو از ۰ تا ۱N/m تغییر داده می‌شود. نمودار جابجایی موجبر حلقه‌ای نسبت به تغییر نیروی اعمال شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار جابجایی نسبت به تغییرات تنش سطحی.

یکی از مشخصه‌های عملکردی مکانیکی مهم، مدهای ارتعاشی و پهنای باند حسگر می‌باشد. فرکانس چهار مد ارتعاشی اول به ترتیب برابر است با: ۹۷۷۸۰، ۲۰۵۹۴۵، ۲۶۶۸۴۰ و ۸۹۵۲۵۰ هرتز. نمودار پاسخ فرکانسی حسگر پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار در بازه ۵ کیلوهرتز عملکرد کاملا مناسبی دارد.



شکل ۴: پاسخ فرکانسی حسگر پیشنهادی.

شبیه‌سازی نوری

جنس موجبرها از سیلیکون با ضریب شکست ۳/۴۸۰۰ می‌باشد. ضریب شکست SU8 نیز برابر است با ۱/۵۵۵۲. این فیلتر از یک موجبر اصلی و یک موجبر حلقه‌ای تشکیل می‌شود. این دو موجبر هر دو به صورت تک مد می‌باشند. موجبرحلقه‌ای، می‌تواند نور را در طول موج‌های مشخصی به دام اندازد که به آن فرکانس رزونانس گفته می‌شود. فرکانس رزونانس از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_0 = \frac{2\pi n_{eff} R}{m} \qquad (۱)$$

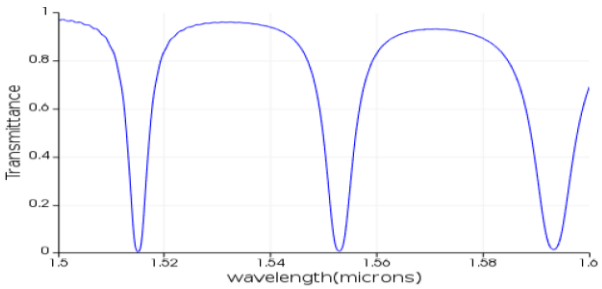
که در آن n_{eff}، ضریب شکست مؤثر، R شعاع موجبر حلقه‌ای است و m مد رزونانس می‌باشد. در این طول موج‌ها به صورت متناوب، نور در موجبر حلقه‌ای به دام می‌افتد. در نتیجه در طیف عبور پیک‌های منفی پریودیک ظاهر می‌شود. پاسخ عبور در این رزوناتور از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$T_{AP} = \frac{a^2 - 2ra\cos\varphi + r^2}{1 - 2ra\cos\varphi + (ra)^2} \qquad (۲)$$

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

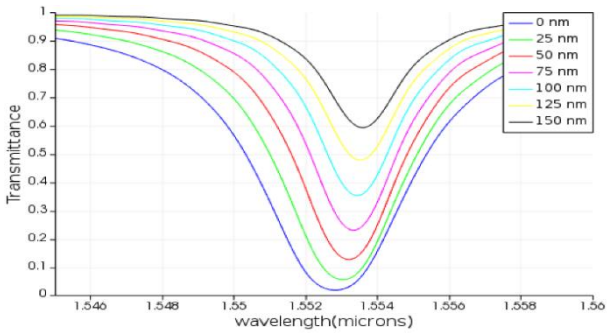
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

در این رابطه φ، شیفت فاز نور بعد از یک دور پیمودن موجبر حلقه‌ای، a، میزان کاهش نور بعد از یک دور و r، ضریب خودجفت‌شدگی کوپلر می‌باشند [۶]. نمودار طیف عبور موجبر اصلی در حالت اولیه در شکل ۵ نشان داده شده است. در طول موج رزونانس ۱۵۵۲/۷nm ضریب کیفیت فیلتر طراحی شده برابر است با ۲۰۹/۸.



شکل ۵: طیف عبور موجبر اصلی در حالت اولیه.

با جذب مولکول‌های هدف توسط مولکول‌های ، مکان موجبر حلقه‌ای جابجا می‌شود. این جابجایی باعث افزایش فاصله میان موجبر اصلی و موجبر حلقه‌ای می‌شود. در نمودار شکل ۶ اثر افزایش این فاصله نشان داده شده است. با افزایش جزئی فاصله، میزان جفت‌شدگی میان موجبر اصلی و موجبر حلقه‌ای کاهش چشمگیری دارد. در نتیجه از این حسگر می‌توان برای کاربردهایی استفاده نمود که در آن‌ها تغییرات جابجایی صفحه متحرک با جذب مولکول‌های هدف کم می‌باشد. حساسیت نوری (میزان تغییر عبور نور در یک طول موج مشخص (در این جا ۱۵۵۲ نانومتر) نسبت به تغییر فاصله موجبر اصلی و موجبر حلقه‌ای) برای این حسگر برابر است با $۰/۰۰۵ \frac{1}{\text{nm}}$.



شکل ۶: تغییرات نمودار طیف عبور با افزایش فاصله موجبرها.

نتایج

در این مقاله یک حسگر Bio-MEMS مبتنی بر تنش سطحی با تشخیص نوری، جهت تشخیص مولکول‌های زیستی پیشنهاد شده است. با استفاده یک رزوناتور حلقه‌ای نوری مقدار جابجایی بخش متحرک را اندازه‌گیری می‌شود. از حسگر پیشنهادی می‌توان در کاربردهایی که حساسیت بالایی مورد نیاز است، استفاده نمود. مدهای ارتعاشی نیز برای این حسگر شبیه‌سازی شده است. فرکانس اولین مد ارتعاشی در حدود ۹۹KHz می‌باشد. با توجه به این مقدار، پهنای باند ۵KHz برای این حسگر در نظر گرفته شده است.

مراجع

[1] S. Badilescu and M. Packirisamy, *BioMEMS: science and engineering perspectives*. CRC Press, 2016.

[2] T. M.-H. Lee, "Over-the-counter biosensors: Past, present, and future," *Sensors*, vol. 8, no. 9, pp. 5535-5559, 2008.

[3] R. Mathew and A. R. Sankar" ,A review on surface stress-based miniaturized piezoresistive SU-8 polymeric cantilever sensors," *Nano-micro letters*, vol. 10, no. 2, p. 35, 2018.

[4] S. Sang, Y. Zhao, W. Zhang, P. Li, J. Hu, and G. Li, "Surface stress-based biosensors," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 51, pp. 124-135, 2014.

[5] M. Z. Ansari, M. Bisen, and C. Cho, "Modelling and analysis of diaphragm integrated SU8/CB nanocomposite piezoresistive polymer microcantilever biosensor," *Microsystem Technologies*, vol. 24, no. 7, pp. 3061-3068 , 2018.

[6] W. Bogaerts *et al.*, "Silicon microring resonators," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 6, no. 1, pp. 47-73, 2012.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]