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

# آشکارسازی با تکنیک تفاضل مدی درحسگرهای ضریب شکستی میکروکره

زینب چناری ، حمید لطیفی

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

**چکیده – دراین مقاله یک روش تفاضلی برای کاهش نویز حسگر ضریب شکستی میکروکره پیشنهاد شده است و نشان داده شده است که با بکارگیری این روش می توان حد آشکارسازی را تا ۳۰ مرتبه بهبود داد. این روش حسگری با دیگر حسگرهای میکروکاواک برای دستیابی به حدهای آشکارسازی کمتر نیز سازگار است.**

کلید واژه- میکروکاواک، حسگر ضریب شکستی، حسگری زیستی، کاهش نویز

# Differential-mode detection in microsphere refractive index sensors

Zeinab Chenari, Hamid Latifi

Laser & Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, 1983963113, Evin, Tehran, Iran

Abstract- A differential mode sensing scheme for microsphere refractive index sensors, is proposed and demonstrated that can substantially suppress environmental noises to improve the detection limit about **30** times. This sensing scheme has high compatibility with any other microcavity sensors to get lower biosensing limit.

Keywords: Microcavity, Refractive index sensing, Biosensing, Noise suppression

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]



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

حسگرهای زیستی میکروکاواک، خصوصا حسگرهای رزوناتور whispering gallery mode (WGM) به طور گسترده ای برای آشکارسازی بیومولکولها با حساسیت بالا و حد آشکارسازی پایین مورد بررسی قرار گرفته اند[۱]. اگرچه انتظارداریم با افزایش فاکتورکیفیت رزوناتور، حد آشکارسازی کمتری بدست آوریم، اما تحت این شرایط هم نویزها می توانند بسیار بزرگتر از سیگنال باشند. تا کنون روشهای متعددی برای کاهش نویز نشان داده شده اند. به طور مثال با پایدارسازی طول موج لیزر توسط یک تداخل -سنج مرجع می توان نویز ناشی از نوسانات طول موج را برطرف کرد. بدین ترتیب، تاکنون حد آشکارسازی به کمتر از nM–pM رسیده است[۱]. برای کاهش دیگر عوامل نویز، روشهای آشکارسازی خودمرجع و تفاضلی پیشنهاد شده اند و به صورت تجربی نشان داده شده اند[۲و۳]. به طور مثال اخیرا نشان داده شده است که با استفاده از آشکارسازی تفاضلی میان یک کاواک فابری-پرو دوکاناله، نویز سیستم به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است، به طوریکه به حد آشکارسازی RIU ۵,۵×۱۰^-۸ دست یافته اند[۴].

از آنجا که تاکنون این روش برای میکروکاواکهای کروی مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله، ما به مطالعه بکارگیری روش تفاضلی برای حسگر میکروکره می پردازیم و نشان می دهیم که چگونه می توان حد آشکارسازی این نوع حسگرها را نیز تا حد قابل توجهی ارتقا داد. در این روش از دو حسگر میکروکره برای کاهش نویز اندازه گیری استفاده می شود. بدین ترتیب هر دو نویز جابجایی طول موج و تغییر دما به طور چشمگیری کاهش خواهند یافت. این تکنیک برای دیگر حسگرهای زیستی مبتنی بر میکرورزوناتورها نیز قابل بکارگیری است.

با کمی تقریب فرکانس تشدید مدهای WGM از رابطه زیر محاسبه می شوند [۵]:

$$\lambda_{qlm}^{i} \approx 2\pi R_s n_s \times \left[ l+\frac{1}{2}+a_q\left(\frac{l+\frac{1}{2}}{2}\right)^{1/3} - \Delta^{i} \pm \varepsilon^{2}\left(\frac{l-|m|}{2}\right)\right]^{-1} = 2\pi R_s n_s A \qquad (۱)$$

در این رابطه اندیس $q$ عدد شعاعی بیانگر تعداد گره‌های داخل کره، $l$ عدد مد سمتی بیانگر نصف تعداد گره‌ها در راستای سمتی و $m$ عدد قطبی است که $l-m+1$ بیانگر تعداد ماکزیممها در راستای قطبی است. $R_s$، $n_s$ شعاع و ضریب شکست کره و $i$ نمایانگر قطبشTE یا TM است، و $\Delta^{TE} = n/\sqrt{n^2-1}$ و $\Delta^{TM} = \left(n\sqrt{n^2-1}\right)^{-1}$، $n = n_s/n_e$ ، $n_e$ ضریب شکست محیط پیرامون کره، $a_q$ مقدار $q$ امین صفر تابع آیری و $\varepsilon^{r}$ میزان بیضی‌گونگی می باشد.

بدین ترتیب میزان حساسیت ضریب شکستی و دمایی برای مد TM از روابط زیر بدست می آید:

$$\frac{d\lambda^{TM}}{dT} = \lambda\alpha_s + \lambda\beta_s + An\lambda\left(n^{-2}\left(n^2-1\right)^{-1/2} + \left(n^2-1\right)^{-3/2}\right)\left(\beta_e - \beta_s\right) \qquad (۲)$$

$$\frac{d\lambda^{TM}}{dn_e} = \frac{An\lambda}{n_e}\left(n^{-2}\left(n^2-1\right)^{-1/2} + \left(n^2-1\right)^{-3/2}\right)$$

در اینجا $\alpha_s$، $\beta_e$ و $\beta_s$ به ترتیب ضریب انبساط حرارتی میکروکره و ضرایب ترمواپتیک محیط آبی و میکروکره هستند. حساسیت های مد TE به طور مشابه بدست می آیند.

به طور مثال برای کره ای به شعاع50 µm حساسیت ضریب شکستی مد اصلی در طول موج 1550nm به ترتیب معادل $S^{TM}$ =60 nm/RIU و $S^{TE}$ =52 nm/RIU است. حساسیت دمایی این سنسور معادل 4pm/K برای مد TM و 4.8 pm/K برای مد TE است. در اینصورت با تغییر دمای محیط به اندازه 0.1 K خطای اندازه گیری ضریب شکست حدوداً $6.7\times10^{-6}$ RIU خواهد بود. در حالیکه با فرض اینکه فاکتور کیفیت $Q = \frac{\lambda_r}{\Delta\lambda_r} \approx 1\times10^{7}$ باشد و رزولوشن اندازه گیری طول موج تا حد $R_e = \frac{\Delta\lambda_r}{100}$ باشد، حد آشکارسازی حسگر به صورت بالقوه معادل $D = \frac{R_e}{S} = 2.5\times10^{-8}$ RIU خواهد بود. در اینجا $\Delta\lambda_r$ پهنای خط رزونانسی است. ازاینرو برای کاهش



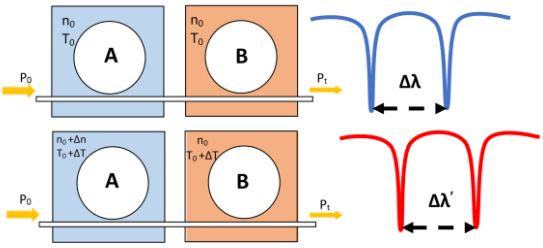
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]

حد آشکارسازی کنترل نوسانات طیفی ناشی از نویز دمایی نکته کلیدی خواهد بود. راه کارهای عملی استفاده از یک خنک کننده، استفاده از مواد با ضرایب دمایی خاص، و یا استفاده از یک کانال مرجع است. از آنجا که علاوه بر نویز نوسانات دمایی، عوامل نویز دیگری چون جابجایی طول موج لیزر در عملکرد حسگر موثر هستند، بکارگیری یک کانال مرجع می تواند این عامل نویز را به طور کامل و به طور همزمان نویز دمایی را تا حد زیادی کاهش دهد. طرح پیشنهادی ما استفاده از یک میکروکره است که به صورت سری با حسگر قرار گرفته است. میکروکره مرجع در محیطی همسان با محیط پیرامون حسگر قرار می گیرد. در مورد حسگرهای زیستی که در اینجا مورد نظر است محیط پیرامون آب است. بدین ترتیب قبل از ایجاد تغییرات ضریب شکستی دو خط رزونانس مربوط به کره حسگر و مرجع در دو طول موج $\lambda_1$ و $\lambda_2$ هستند (شکل۱.الف) بنابراین اختلاف این دو خط برابر با $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ است. پس از ایجاد تغییرات ضریب شکستی پیرامون کره حسگر اختلاف دو خط رزونانسی معادل $\Delta\lambda' = \lambda_2' - \lambda_1'$ خواهد بود (شکل۱.ب). بدین ترتیب در صورتیکه میزان حساسیت دمایی دو مد رزونانسی برابر باشد با اندازه گیری شیفت تفاضل دو خط رزونانسی $\Delta\Lambda = \Delta\lambda' - \Delta\lambda$ می توان میزان تغییرات ضریب شکست پیرامون حسگر را آشکارسازی کرد. درواقع در روش حسگری تفاضلی، اختلاف میان دو مد رزونانسی به عنوان سیگنال حسگری عمل می کند. در اینجا چون فقط یکی از میکروکره ها تغییرات ضریب شکست را آشکار می کند حساسیت ضریب شکستی $\frac{d\Delta\lambda}{dn_e}$ معادل با $\frac{d\lambda}{dn_e}$ است. این در حالیست که حساسیت دمایی حسگر به طور مثال برای مد TM از رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{d\Delta\lambda^{TM}}{dT} = \frac{d\lambda_2}{dT} - \frac{d\lambda_1}{dT} = \Delta\lambda\alpha_s + \Delta\lambda\left(\beta_s + An\left(n^{-2}\left(n^2-1\right)^{-1/2} + \left(n^2-1\right)^{-3/2}\right)\left(\beta_e - \beta_s\right)\right) + \lambda A\Delta\left(n\left(n^{-2}\left(n^2-1\right)^{-1/2} + \left(n^2-1\right)^{-3/2}\right)\left(\beta_e - \beta_s\right)\right) \quad (۳)$$

جمله اول در سمت راست هر دو رابطه (۲) و (۴) نشاندهنده نویز انبساط حرارتی، و بقیه جملات نویز ترمواپتیک هستند. بسته به اینکه $\Delta\lambda$ چند مرتبه بزرگی کوچکتر از طول موج باشد، نویز انبساط حرارتی به همین اندازه کاهش می یابد، و کاهش نویز ترمو-اپتیکی نیز به مشخصات دو مد بستگی دارد.

عموماً نویز شامل نویز جابجایی طول موج لیزر و نویز جابجایی دمایی می شود. به دلیل تغییر همزمان مدهای رزونانسی، $\Delta\lambda$ ذاتاً نسبت به نویز شیفت طول موج لیزر ایمن است.




شکل ۱: شماتیک طرح پیشنهادی کاهش نویز در حسگر میکروکره، کره A سنسور و کره B مرجع می باشد.

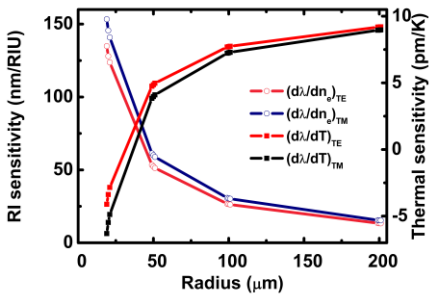
برای بدست آوردن شرایط بهینه میکروکره مرجع حساسیت ضریب شکست و دمایی را برای میکروکره با شعاعهای متفاوت مورد بررسی قرار می دهیم. در اینجا فقط مد اصلی و قطبش TM را در نظر می گیریم.

دو حالت را بررسی می کنیم، در حالت اول میکروکره مرجع کاملاً مشابه میکروکره حسگر است. دراینصورت قبل از ایجاد تغییرات ضریب شکستی دو خط رزونانس مربوط به کره حسگر و مرجع بر هم منطبق هستند. پس از ایجاد تغییرات ضریب شکستی پیرامون کره حسگر دو خط رزونانسی از هم شکافته می شوند . از آنجا که دو مد مربوط به دو رزوناتور کاملاً همسان، در شرایط جفت شدگی و دمایی یکسانی هستند بنابراین تقریباً نویز یکسانی را می بینند و بنابراین نویز دمایی به طور کامل حذف می شود. در اینصورت کمترین $\Lambda$ قابل اندازه گیری در اثر تغییرات ضریب شکستی معادل با نصف پهنای خط رزونانسی یعنی $\frac{\Delta\lambda_r}{2}$ است. به عبارت دیگر رزولوشن اندازه گیری و در نتیجه حد آشکارسازی ۵۰ برابر کاهش یافته است. بنابراین این روش موثر نخواهد بود. در ادامه حالت دوم که میکروکره مرجع با حسگر همسان نیست را در نظر می گیریم.



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]

شکل (2) نمودار حساسیت ضریب شکستی و دمایی را بر حسب شعاع میکروکره نشان میدهد، همانطور که ملاحظه می شود کره های کوچکتر حساسیت ضریب شکستی بیشتر و حساسیت دمایی کمتری نسبت به کره های بزرگتر نشان میدهند. نمودارها برای میکروکره حسگر با شعاع $R_0$ و میکروکره مرجع با شعاع $R_0 \pm ۱$ میکرون رسم شده اند. در جدول (۱) نشان داده شده است که اختلاف حساسیت های دمایی برای دو کره حسگر و مرجع که همان حساسیت دمایی سیگنال $\Delta\lambda$ است برای کره های کوچکتر بسیار بزرگتر از کره های با شعاع بزرگ است. از اینرو استفاده از کره های بزرگتر امکان کاهش بیشتر نویز حرارتی را فراهم می کند، اما از طرفی حساسیت ضریب شکستی کمتری دارند. برای پیدا کردن شعاع بهینه یافتن حد آشکارسازی راه حل کلیدی است.




شکل 2: (الف) حساسیت ضریب شکستی و (ب)دمایی برحسب شعاع میکروکره برای مد اصلی و طول موج در بازه 1550nm

**بار دیگر فرض می کنیم فاکتور کیفیت $Q = 1\times10^7$ باشد در اینصورت سیگنال فقط در صورتی قابل آشکارسازی است که فاصله دو خط رزونانسی از نیم پهنای دره رزونانس یعنی حدود 0.15 pm بزرگتر باشد، جدول(۱) نشان میدهد که حتی اختلاف کوچکی میان دو شعاع کره ها این شرط را برآورده می کند. حال با فرض اینکه رزولوشن اندازه گیری طول موج محدود به نوسانات دمایی 0.1 K باشد، حد آشکارسازی حسگر مطابق جدول(۱) خواهد بود. همانطور که از جدول پیداست برای حسگر با شعاع ۵۰ μm در مقایسه با روش بدون کره مرجع حد آشکارسازی ۳۰ برابر بهبود یافته است.**

جدول۱: حساسیت دمایی، ضریب شکستی و حد آشکارسازی با استفاده از آشکارسازی تفاضلی برای دو میکروکره حسگر و مرجع با شعاعهای متفاوت با فرض اینکه نوسانات دمایی معادل 0.1 K باشد.

| $R_A$ (μm) | $R_B$ (μm) | $\Delta\lambda$ (nm) | $\frac{d\Delta\lambda}{dT}$ (pm/K) | $\frac{d\Delta\lambda}{dn_e}$ (nm/RIU) | Detection Limit (RIU) |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 19 | -0.34 | 0.837 | 145.6 | ۵,۷×10$^{-۷}$ |
| | 21 | 11.68 | -0.596 | | ۴×10$^{-۷}$ |
| 50 | 49 | 0.24 | 0.133 | 60 | ۲,۲×10$^{-۷}$ |
| | 51 | -0.23 | -0.128 | | ۲,۱×10$^{-۷}$ |
| 100 | 99 | 0.16 | 0.033 | 30.0 | ۱,۱×10$^{-۷}$ |
| | 101 | -0.15 | -0.032 | | ۱×10$^{-۷}$ |
| 200 | 199 | 0.10 | 0.008 | 15.4 | ۵,۱×10$^{-۸}$ |
| | 201 | 1.18 | -0.014 | | ۹×10$^{-۸}$ |

## نتیجه‌گیری

دراین مقاله یک روش تفاضلی را برای کاهش نویز پیشنهاد دادیم. در این روش نویز جابجایی طول موج لیزر به طور کامل رفع می شود و نویز نوسانات دمایی می تواند تا حدود ۳۰ مرتبه کاهش یابد. بعلاوه این روش تفاضلی را می توان برای دیگر حسگرهای میکروکاواک نیز بکار بست.

## مراجع


[1] F. Vollmer, L. Yang, *Label-free detection with high-Q microcavities: a review of biosensing mechanisms for integrated devices*, **Nanophotonics** ۱ (۲۰۱۲) 267–291.

[2] J. Homola, H. B. Lu, G. G. Nenninger, J. Dostalek, S. S. Yee**,** *A novel multichannel surface plasmon resonance biosensor*, **Sens.Actuators, B 76** (2001) 403.

[3] L. He, S¸. Kaya Ozdemir, J. Zhu, W. Kim, and L. Yang, *Detecting single viruses and nanoparticles using whispering gallery microlasers*, **Nat. Nanotechnol. 6** (2011) 428.

[4] P. Liu, H. Huang, T. Cao, X. Liu, Z. Qi, Z. Tang, and J. Zhang, *An ultra-low detection-limit optofluidic biosensor with integrated dual-channel FabryPérot cavity* **Appl.Phys. Lett.** 102(16), 163701 (2013).

[5] L. Huang, *Optical whispering-gallery mdoe spectroscopy for the study of molecule adsorption and desorption*, **PH.D. thesis** ed., USA, (2011).




[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]