

طراحی حسگر زیستی جدید فراماده‌ای THz مبتنی بر ساختارهای ترکیبی شکاف-حلقه T و شکاف-حلقه O

فاطمه آقائی^۱، حمید بهادر^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، تبریز، fatemeh.aghaee97@ms.tabrizu.ac.ir

^۲ استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، hamid.bahador@uma.ac.ir

چکیده

کاربرهای فراماده‌ها در حوزه‌ی پزشکی به عنوان حسگرهای زیستی نوری جهت شناسایی غلظت و انواع نانو ذرات مولکولی می‌باشد [۴-۷]. حسگرهای زیستی MMs بر اساس حوزه کاری فرکانسی به سه دسته مهم میکرو-موج، تراهرتز و پلاسمونیک تقسیم می‌شوند [۸-۱۰]. امواج تراهرتزی دارای انرژی فوتون پایین و قدرت نفوذ بالا مانند اشعه X، زیست سازگاری بالا با بدن انسان و پاسخ‌های نوری بی‌مانندی می‌باشد [۱۱]. محدوده طیفی امواج تراهرتز در میان امواج الکترومغناطیسی از ۰.۱ THz تا ۱۰ THz می‌باشد. حسگرهای زیستی MMs های مبتنی بر امواج تراهرتز دارای حساسیت‌های فوق العاده بالایی هستند، به همین دلیل به یک حوزه نوظهور در دنیا تبدیل شده‌اند. از ویژگی‌های دیگر این نوع از حسگرهای زیستی می‌توان به اندازه کوچک، هزینه ساخت پایین و سرعت شناسایی بالا اشاره کرد [۳].

در این مقاله، یک بیوسنسور MMs مبتنی بر امواج تراهرتزی با ترکیبی از دو ساختار شکاف-حلقه O شکل و T شکل برای اولین بار ارائه شده است. اثرات حضور و عدم حضور هر یک از این بخش‌های ترکیبی MMs به طور کامل در فرکانس پایین ۰.۲ THz تا ۲ THz بررسی شده است. مکانیزم شناسایی ذرات براساس تغییرات ضریب شکست محیط می‌باشد، که نتایج و داده‌های مستخرج از روش تفاضل محدود حوزه زمان^۲ (FDTD) به دست آمده است. در این مطالعه، نشان داده‌ایم با ترکیب ساختارها با یکدیگر می‌توان نقاط قوت حسگر را درخشان‌تر نمود. ساختار ارائه شده را می‌توان در حوزه پزشکی به منظور شناسایی انواع سلول‌های سرطانی، پلاسمای خون و موارد دیگر به کار برد.

روش مدل‌سازی

در این مطالعه، ساختار شکل ۱ که بیانگر شمای کلی یک حسگر زیستی MMs که ترکیبی از ساختارهای O شکل و T شکل می‌باشد، در فرکانس ۰.۲ تا ۲ تراهرتز بررسی شده است. جنس بستر GaAs با ابعاد $30 \times 50 \times 50 \mu\text{m}^3$ می‌باشد که بر روی آن فلز طلا (Au) به

تفاضل روز افزون به منظور شناسایی انواع نانوذرات با دقت و سرعت بالا به خصوص در حوزه پزشکی به منظور حفظ سلامت انسان، منجر به افزایش چشم‌گیر کاربرد سنسورهای نوری شده است. حسگر زیستی ارائه شده در این مقاله، از نوع حسگرهای نوری مبتنی بر فراماده که در فرکانس‌های تراهرتزی عمل می‌کنند، می‌باشد. این نوع از حسگرها به سبب پاسخ نوری مناسب و پروسه ساخت اقتصادی مورد توجه قرار گرفته‌اند. ساختار پیشنهادی در این مطالعه از ترکیب دو نوع ساختار مهم و اساسی شکاف-حلقه T شکل و شکاف-حلقه O شکل حاصل شده است. که دارای حساسیت ۵۶۶.۶ GHz/RIU می‌باشد، که در مقایسه با حسگرهای نوری دیگر افزایش قابل توجهی در حساسیت بدست می‌دهد. معیار شایستگی و ضریب کیفیت حسگر پیشنهادی به ترتیب برابر با 1.95 RIU^{-1} و ۴.۱۷ می‌باشد. نتایج بدست آمده در این پژوهش از طریق روش تفاضل محدود حوزه زمان صورت گرفته است. این نتایج مناسب، حاصل ترکیب دو ساختار فراماده‌ای ذکر شده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

حسگر زیستی، فراماده، شکاف-حلقه، فرکانس تشدید.

مقدمه

فراماده‌ها^۱ (MMs) به سبب دارا بودن ضریب شکست منفی، به عنوان یک ماده غیر طبیعی یا مصنوعی شناخته می‌شوند [۱، ۲]. اولین بار MMs در سال ۱۹۶۸ توسط یک فیزیکدان روسی، آقای ویکتور وسلایگو، معرفی شد. ایشان بیان داشتند که با استفاده از تشدیدکننده‌های ترکیبی ($\mu < 0$) و آرایه‌ای از فلزهای نازک ($\epsilon < 0$) می‌توان به ضریب شکست منفی و در نتیجه MMs دست یافت [۳]. به همین دلیل MMs، دارای خواص منحصر بفردی می‌باشند که سبب کاربرد آن‌ها در حوزه‌هایی نظیر مهندسی، شیمی، فیزیک و محیط زیست به عنوان فیلتر، جاذب و سنسور شده است. یکی دیگر از

² Finite Difference Time Domain

¹ Metamaterials

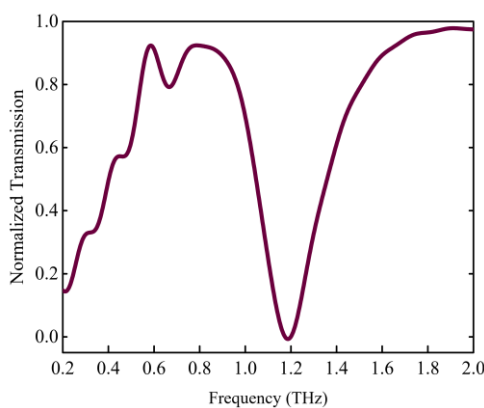
خازنی که با C نشان داده می‌شود از رابطه‌ی $\epsilon_0 \epsilon_c w d / g$ بدست می‌آید؛ که در آن ϵ_0 ضریب گذردهی فضای آزاد، ϵ_c ضریب گذردهی نسبی ماده شکاف، W_0 عرض شکاف و g فاصله شکاف می‌باشد. مقدار C_0 همان سرعت نور در خلا است. از طرفی عبور برای امواج الکترو مغناطیسی در این حالت برابر است با [۱۳]:

$$T = \frac{4n_{sur}n_{sub}\epsilon(\omega)\mu(\omega)}{(n_{sur}n_{sub} + \epsilon(\omega)\mu(\omega))^2} \quad (2)$$

n_{sur} و n_{sub} به ترتیب بیانگر ضریب شکست بستر و محیط اطراف سنسور می‌باشد؛ که نشان می‌دهد طیف عبوری یا انتقال با ضریب شکست ارتباط مستقیمی دارد. هنگامی که ضریب شکست محیط در نتیجه تغییر غلظت تغییر می‌کند، محل رزونانس طیف عبوری جابجا شده و حساسیت ($S = \Delta f_r / \Delta n$ [۱۴]) به دست می‌آید.

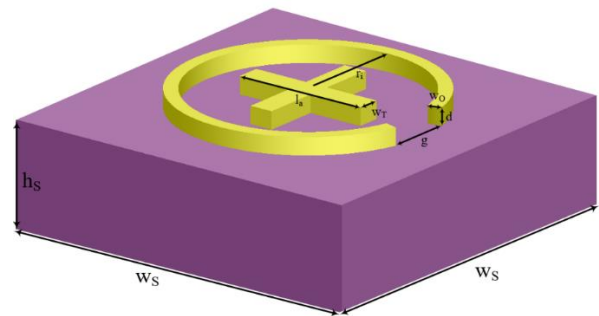
نتایج

نمودار انتقال برای ساختار ارائه شده در شکل ۱، دارای یک تشدید در فرکانس ۱.۱۱۸ تراهرتز است (شکل ۲). پروفایل شدت نسبی میدان الکتریکی نیز در همین فرکانس در شکل ۳ ارائه شده است. طبق پروفایل بدست آمده برای میدان از طریق نرم افزار FDTD، تشدید و کوپلینگ در لبه های شکاف با گپ قابل مشاهده است. شدت میدان الکریکی هم در مقدار بیشینه در حدود ۱۲ بوده که مقدار قابل توجهی می‌باشد.



شکل ۲. نمودار طیف انتقال ساختار ترکیبی شکاف-حفره O و T شکل.

صورت شکاف حلقه های O و T قرار گرفته است. ساختار از هر دو جهت x و y دارای شرایط مرزی پرودیگ می‌باشد. عرض شکاف-حلقه‌ی O، برابر با ۱ میکرومتر، ارتفاع آن ۵ میکرومتر و فاصله شکاف برابر با ۹.۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. برای شکاف-حلقه T، ضخامت برابر ۵ میکرومتر و عرض آن ۳.۵ میکرومتر می‌باشد. لازم به ذکر است حسگر زیستی با آب به ضریب شکست ۱.۳۳ احاطه شده است. پارامترهای هندسی ساختار شکل ۱ در جدول ۱ ذکر شده‌اند.



شکل ۱: ساختار کلی یک بیوسنسور MMs مبتنی بر امواج تراهرتزی با ترکیبی از دو ساختار شکاف-حفره‌ی O شکل و T شکل.

جدول ۱: پارامترهای هندسی بیوسنسور ساختار شکل ۱

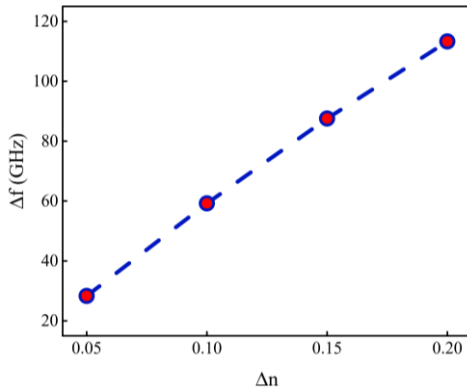
پارامترهای هندسی ساختار	W_s	h_s	r_i	l_a	W_T	W_O	g	d
مقدار بر حسب میکرومتر	۵۰	۳۰	۱۸	۲۰	۳.۵	۱	۹.۵	۵

به هنگام بهینه سازی ابعاد، این نتیجه حاصل شد که اندازه ابعاد ساختار بر روی کوپلینگ و در نتیجه عملکرد سنسور اثر می‌گذارد. علاوه بر این، از طریق تغییر در ابعاد می‌توان محل تشدید رزوناتور را تنظیم کرد. مکانیزم فیزیکی ساختار شکاف-حلقه به این ترتیب است که بار القایی باعث ایجاد میدان الکتریکی می‌گردد. در نتیجه پس از ایجاد جریان خاصیت خازنی در شکاف و خاصیت سلفی در حلقه ایجاد می‌گردد؛ که از طریق حالت درود-لورنتز^۳ می‌توان فرکانس تشدید را به صورت زیر بدست آورد [۱۲]:

$$\omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{C_0}{a\sqrt{\epsilon_c}} \sqrt{\frac{g}{\omega}} \quad (1)$$

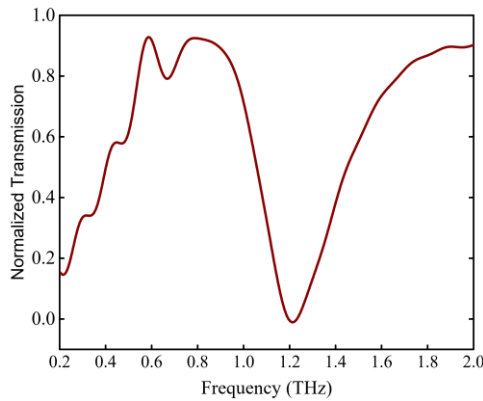
در اینجا L بیانگر اندوکتانس حلقه است که برابر با $\mu_0 a^2 / d$ می‌باشد، که a اندازه ساختار حلقه و d ضخامت فلز می‌باشد. ظرفیت

³ Drude-Lorentz

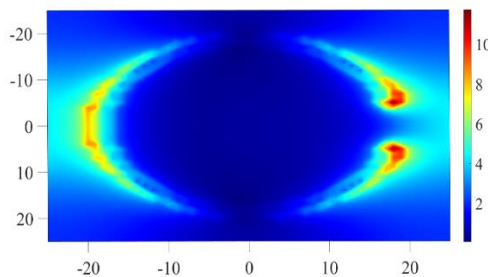


شکل ۵. نمودار تغییرات مکان فرکانس رزونانس بر اساس تغییرات ضریب شکست ساختار ترکیبی.

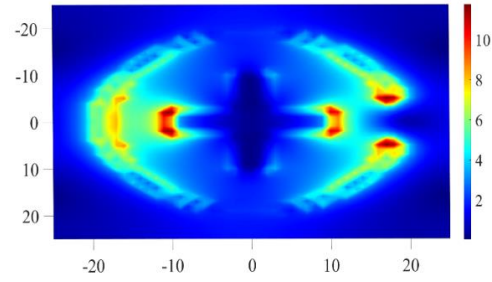
در گام بعد به بررسی اثر ساختار شکاف-حلقه‌ی T پرداخته شده است. این بار، فلز T شکل را از مرکز ساختار برداشته و پاسخ نوری آن بررسی می‌گردد. شکل ۶ نمودار طیف انتقالی حسگر زیستی MMs مبتنی بر شکاف-حلقه O را نمایش می‌دهد. براساس این شکل فرکانس تشدید نسبت به ساختار بالا دچار شیفت قرمز شده و به مقدار ۱.۲۱ تراهرتز افزایش می‌یابد. اما ضریب کیفیت ساختار بدون MMs مبتنی بر شکاف-حلقه T از مقدار ۴.۱۷ به ۳.۴۴ کاهش می‌یابد. شکل ۷ پروفایل شدت میدان الکتریکی نسبی را برای این ساختار نمایش می‌دهد، که مقدار بیشینه آن در حدود ۱۲ است.



شکل ۶. نمودار طیف انتقال ساختار شکاف-حلقه O شکل.



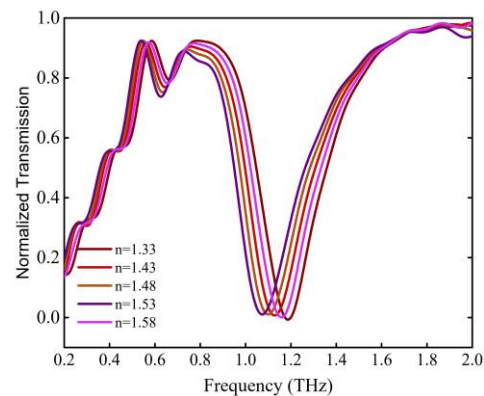
شکل ۷. پروفایل شدت میدان الکتریکی ساختار شکاف-حلقه O شکل.



شکل ۳. پروفایل شدت میدان الکتریکی ساختار ترکیبی شکاف-حلقه O و T شکل.

با بهینه سازی شعاع داخلی و خارجی ساختار شکاف-حلقه O شکل، می‌توان به بهترین عملکرد بیوسنسور دست یافت. در این مقاله، با روش آزمون و خطا مقدار شعاع داخلی $18 \mu\text{m}$ و شعاع خارجی برابر با $19 \mu\text{m}$ بدست آمد. بر اساس شکل ۲ و مقادیر بدست آمده، ضریب کیفیت که در این مقاله از رابطه $Q = f_r / FWHM$ پیروی می‌کند [۱۱]، که برای این ساختار در فرکانس تشدید 4.17 بدست آمد. $FWHM$ بیانگر عرض کامل در مقدار نصف بیشینه است.

برای بررسی حساسیت حسگر زیستی MMs ارائه شده، از داده‌های شکل ۴، استفاده شده است. بازه‌ی تغییرات ضریب شکست از 1.33 تا 1.53 با گام‌های 0.05 می‌باشد. شکل ۴ بیانگر تغییرات مکان پیک فرکانس تشدید طیف عبور برای ضریب شکست‌های مختلف می‌باشد؛ که همانگونه که شکل ۵ نمایش می‌دهد یک رابطه خطی میان تغییرات ضریب شکست و تغییرات فرکانس تشدید وجود دارد. حساسیت بدست آمده 566.6 GHz/RIU و معیار شایستگی $(FOM = S / FWHM)$ 1.95 RIU^{-1} است.



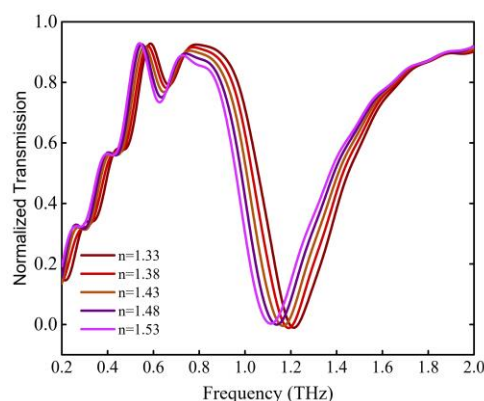
شکل ۴. نمودار تغییرات طیف انتقال به هنگام تغییر ضریب شکست محیط اطراف ساختار ترکیبی.

ذرات ریزمولکولی با دقت RIU ۰.۰۵ می باشد. محدوده فرکانس کاری در بازه ۰.۲ تا ۲ تراهرتز (آن فرکانس پایین) بوده و یکی از ویژگی های بسیار مهم آن قابلیت تنظیم محل فرکانس تشدید با تغییر در ابعاد ساختار می باشد. در این مقاله، برای اولین بار با ترکیب دو ساختار، به حساسیت بالا و خواص نوری قابل توجهی دست یافتیم. اهمیت حضور هر یک از ساختارهای MMs از طریق FDTD بررسی شد. ساختار بهینه و نهایی که همان بیوسنسور ترکیبی می باشد؛ دارای حساسیت ۵۶۶.۶ GHz/RIU⁻¹ و معیار شایستگی RIU⁻¹ ۱.۹۵ می باشد. اهمیت ترکیب دو نوع ساختار MMs زمانی مشخص شد که مقادیر حساسیت و معیار شایستگی در نبود فلز T شکل به ۴۱۱.۸ GHz/RIU⁻¹ و RIU⁻¹ ۱.۱۶۹ کاهش یافت. از کاربردهای این حسگر زیستی می توان به شناسایی اوره، انواع سلول های سرطانی در محلول آبی اشاره کرد؛ که ایجاد تغییر در غلظت محیط اطراف حسگر موجب تغییرات ضریب شکست و در نتیجه جابجایی فرکانس تشدید و شناسایی می گردد.

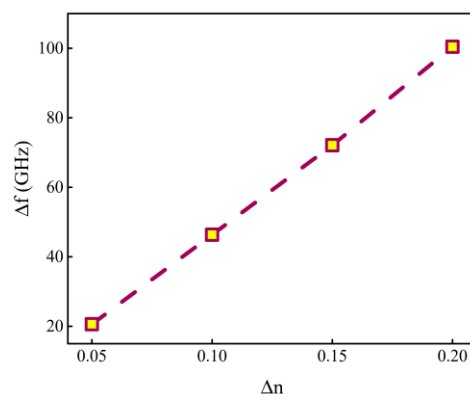
مراجع و منابع

- [1] Shalae, V. M. (2007). "Optical negative-index metamaterials." *Nature photonics* 1(1): 41-48.
- [2] Valentine, J., et al. (2008). "Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index." *nature* 455(7211): 376-379.
- [3] Emaminejad, H., et al. (2021). "Design and simulation of a novel tunable terahertz biosensor based on metamaterials for simultaneous monitoring of blood and urine components." *Plasmonics* 16(5): 1537-1548.
- [4] Xu, Z. and Y. S. Lin (2019). "A stretchable terahertz parabolic-shaped metamaterial." *Advanced Optical Materials* 7(19): 1900379.
- [5] Chen, H.-T., et al. (2006). "Active terahertz metamaterial devices." *nature* 444(7119): 597-600.
- [6] Choi, M., et al. (2011). "A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index." *nature* 470(7334): 369-373.
- [7] Han, Y., et al. (2020). "Tunable metamaterial-based silicon waveguide." *Optics Letters* 45(24): 6619-6622.

عامل مهم در سنجش عملکرد حسگرها حساسیت می باشد، که برای این حسگر ۴۱۱.۸ GHz/RIU از نمودارهای ارائه شده در شکل ۸ و ۹، بدست آمد. در اینجا هم، بازه ی تغییرات ضریب شکست از ۱.۳۳ تا ۱.۵۳ با گام های ۰.۰۵ می باشد. همچنین، معیار شایستگی برابر RIU⁻¹ ۱.۱۶۹ که یک کاهش حدودا ۱ RIU⁻¹ داشته است. اما تفاوت چشم گیر در میزان حساسیت با افتی برابر ۱۵۴.۸ GHz/RIU نشان از اهمیت حضور MM مبتنی بر شکاف-حلقه T دارد.



شکل ۸. نمودار تغییرات طیف انتقال به هنگام تغییر ضریب شکست محیط اطراف ساختار شکاف-حفره O شکل.



شکل ۹. نمودار تغییرات مکان فرکانس رزونانس بر اساس تغییرات ضریب شکست ساختار شکاف-حفره O شکل.

همانطور که مشاهده می شود، در هر دو ساختار تغییر ضریب شکست محیط منجر به شیفت آبی فرکانس تشدید بیوسنسور MMs مبتنی بر امواج تراهرتری یعنی جابجایی به سمت فرکانس های پایین تر می گردد.

نتیجه گیری و جمع بندی

در این کار، یک بیوسنسور فراماده مبتنی بر ساختارهای شکاف-حلقه T و O شکل ارائه گردید. این سنسور در محیط آبی قادر به شناسایی



- [8] Emami-Nejad, H. and A. Mir (2017). "Design and simulation of a flexible and ultra-sensitive biosensor based on frequency selective surface in the microwave range." *Optical and Quantum Electronics* **49**(10): 1-15.
- [9] Wang, B.-X., et al. (2015). "A novel dual-band terahertz metamaterial absorber for a sensor application." *Journal of Applied Physics* **117**(1): 014504.
- [10] Sreekanth, K. V., et al. (2016). "Extreme sensitivity biosensing platform based on hyperbolic metamaterials." *Nature materials* **15**(6): 621-627.
- [11] Yang, J. and Y.-S. Lin (2021). "Design of tunable terahertz metamaterial sensor with single-and dual-resonance characteristic." *Nanomaterials* **11**(9): 2212.
- [12] Xu, T., et al. (2021). "Tunable terahertz free spectra range using electric split-ring metamaterial." *Journal of Microelectromechanical Systems* **30**(2): 309-314.
- [13] Lin, Y.-S., et al. (2013). "Development of stress-induced curved actuators for a tunable THz filter based on double split-ring resonators." *Applied Physics Letters* **102**(11): 111908.
- [14] Wen, Y., et al. (2021). "Tunable Perfect Meta-Absorber with High-Sensitive Polarization Characteristic." *Advanced Photonics Research* **2**(3): 2000027.
- [15] Bahador, H. and H. Heidarzadeh (2021). "Highly sensitive refractive index sensor by floating nano-particles in the solution for the detection of glucose/fructose concentration." *Optical and Quantum Electronics* **53**(12): 1-12.