



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



معرفی یک زیست حسگر فراماده فروسرخ با حساسیت بالا

مهدی عسکری

بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سلمان فارسی کازرون، کازرون

mehdiaskari@kazerunsfu.ac.ir

چکیده - در این مقاله، به کمک روش های شبیه سازی، حسگر فراماده ای با سلول واحد متشکل از دو میله کوتاه و دو تیغه فلزی، همگی از جنس نقره، را معرفی نموده ایم که در محدوده های فرکانسی فروسرخ عمل می کند. هنگام استفاده از آب در بین قطعات فلزی، فرکانس تشدید ساختار برابر 205.3 THz و هنگام استفاده از محلول ۲۵ درصد گلوکز در بین آنها، فرکانس تشدید برابر 201.1 THz به دست می آید. در نتیجه حساسیت حسگر طراحی شده برابر 105 THz/RIU (معادل 775 nm/RIU) محاسبه می شود که در مقایسه با حساسیت حسگرهای فراماده معرفی شده تاکنون، مقدار بالایی است.

کلید واژه- تشدید، حسگر، فراماده، نوسان های تراهرتز.

Introduction of an infrared metamaterial biosensor with a high sensitivity

Mehdi Askari

Physics department, Faculty of Sciences, Salman Farsi University of Kazerun, Kazerun.

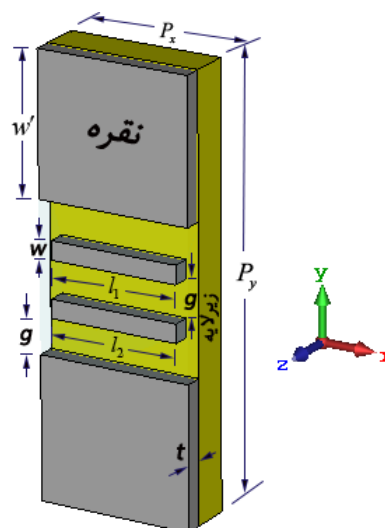
mehdiaskari@kazerunsfu.ac.ir

Abstract- In this paper, using simulation methods, we have introduced a metamaterial sensor, with the unit cell containing two silver bars and two silver slabs, operating in infrared frequency range. Using water between metallic elements, a resonance frequency 205.3 THz is calculated, and when a 25 percent glucose solution is used between them, a resonance frequency 201.1 THz is obtained. Consequently, the sensitivity of the designed sensor is calculated to be 105 THz/RIU (equivalent to 775 nm/RIU) which is high compared to the sensitivity of other sensors introduced so far.

Keywords: resonance, sensor, metamaterials, terahertz oscillations.

مقدمه

فرامواد، ساختارهای مصنوعی با سلول واحد کوچکتر از طول موج هستند که علاوه بر داشتن خصوصیتی که در مواد طبیعی یافت نمی‌شود، برای کاربردهای مختلفی نظیر ابر لنزها، پنهان‌سازی، ایجاد نور آهسته و حسگرها قابلیت استفاده دارند [۱،۲]. یکی از مهم‌ترین این کاربردها استفاده از آن‌ها برای تولید حسگری‌های با حساسیت بالا و قابلیت ساخت آسان است [۳]. در این مقاله، حسگر فراماده‌ای را طراحی نموده‌ایم که در محدوده فرکانسی فروسرخ حساسیت بسیار بالایی دارد.



شکل ۱. سلول واحد حسگر. دو ورقه و دو میله، همگی از جنس نقره، بر روی یک زیر لایه دی الکتریک قرار گرفته‌اند. ضخامت قطعات فلزی $t = 30\text{ nm}$ است.

معرفی ساختار پیشنهادی

شکل ۱، سلول واحد حسگر پیشنهادی را نشان می‌دهد. هر سلول واحد، از دو تیغه و دو میله، همگی از جنس نقره تشکیل شده است که بر روی یک زیر لایه از جنس Duroid (tm) به ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon = 2/2$ قرار گرفته‌اند [۳]. میله‌ها دارای طولی برابر $l_1 = l_2 = 210\text{ nm}$ و پهنایی برابر $w = 30\text{ nm}$ بوده و در فاصله $g = 60\text{ nm}$ از یکدیگر، در وسط سلول واحد قرار گرفته‌اند. تیغه‌های

فلزی در راستای x کل سلول واحد را می‌پوشانند و در راستای y در دو انتهای سلول واحد قرار گرفته و طولی برابر $w' = 230\text{ nm}$ دارند. ساختار در راستاهای x و y دوره‌ای بوده و در راستای z تک‌لایه‌ای است.

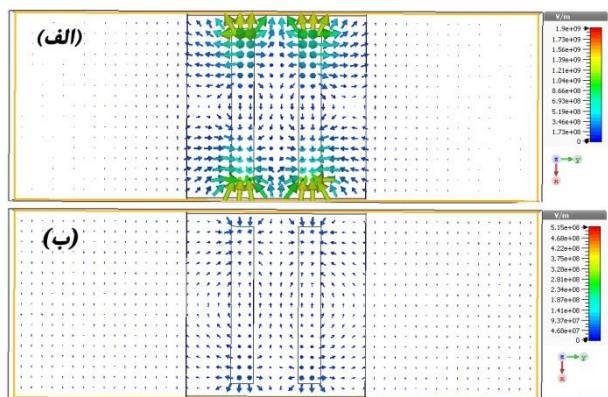
روش انجام شبیه‌سازی

در انجام شبیه‌سازی‌ها، تنها از یک سلول واحد با شرط‌های مرزی مناسب استفاده می‌کنیم. یک موج الکترومغناطیسی قطبیده‌ی خطی، با میدان الکتریکی در راستای محور x (در امتداد میله‌ها) و میدان مغناطیسی در راستای محور y (عمود بر میله‌ها و در صفحه x - y) را عمود بر ساختار و در راستای z می‌تابانیم و ضرایب عبور و بازتاب را محاسبه می‌کنیم. برای ضریب گذردهی الکتریکی نقره، از مدل الکترون آزاد درود با رابطه‌ی

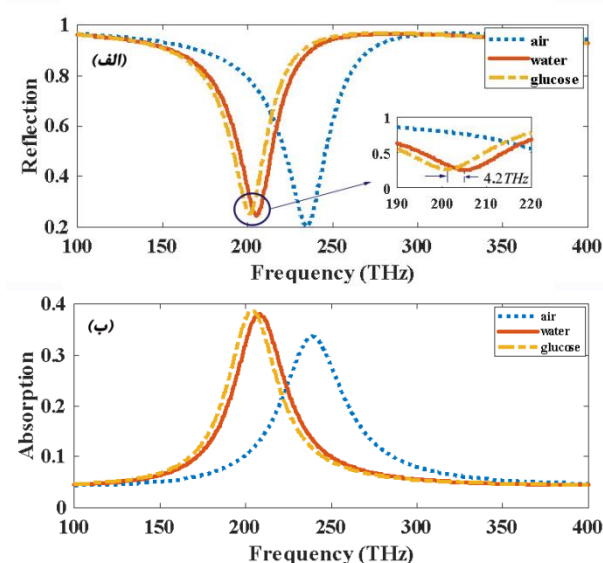
$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \quad (1)$$

استفاده می‌کنیم؛ که در این رابطه ω_p فرکانس پلاسمایی و γ فرکانس برخورد است. مقادیر ω_p و γ برای نقره به ترتیب برابر $1.4 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ و $0.32 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ در نظر گرفته می‌شود [۴]. برای اطمینان از دوره‌ای بودن ساختار در دو راستای جانبی x و y و همچنین برای اطمینان از قطبش موج فرودی به صورت ذکر شده در بالا، سلول واحد را به گونه‌ای درون یک موجبر قرار می‌دهیم که بر دیواره‌های عمود بر محور x موجبر، رساناهای الکتریکی کامل و بر روی دیواره‌های عمود بر محور y آن، رساناهای مغناطیسی کامل قرار گرفته‌باشد. در انجام شبیه‌سازی‌ها و محاسبات از نرم افزار CST Microwave Studio استفاده کرده‌ایم.

۳.ب). مشاهده می‌شود که نسبت به حالت قبل، تجمع میدان‌ها در دو انتهای میله‌ها ضعیف بوده که نشان‌دهنده عدم وجود تشدید در این فرکانس است.

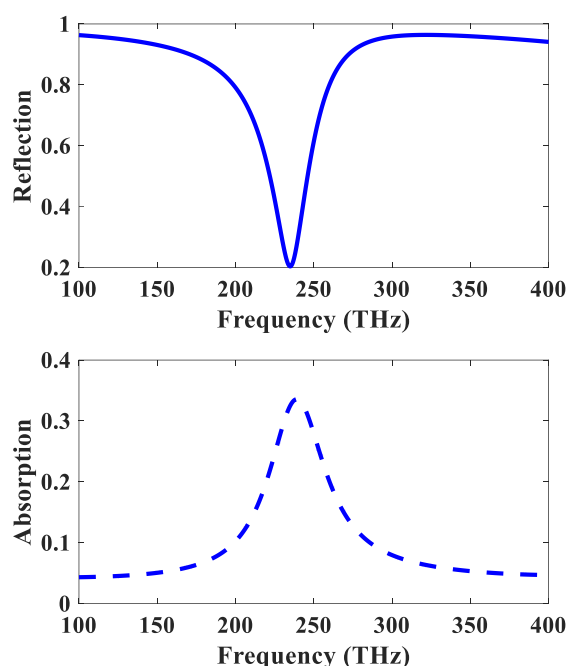


شکل ۳. شبیه‌سازی بردار میدان الکتریکی در دو فرکانس متفاوت؛ (الف) در فرکانس تشدید 235 THz و (ب) در فرکانس غیرتشدید 224 THz .



شکل ۴. (الف) نمودار بازتاب و (ب) نمودار جذب از ساختار، وقتی هوا، آب و محلول ۲۵ درصد گلوکز بین قطعات فلزی قرار می‌گیرند. فرکانس تشدید در حالت استفاده از هوا، آب و محلول ۲۵ درصد گلوکز، به ترتیب برابر 235 THz ، $205/3\text{ THz}$ و $201/1\text{ THz}$ است.

نمودارهای رسم شده در شکل ۲ برای حالتی است که در فضای بین میله‌ها و همچنین فضای بین میله‌ها و تیغه‌ها، هوا وجود داشته باشد. اگر دی‌الکتریک دیگری در این فضا قرار گیرد، فرکانس تشدید تغییر می‌کند. در این قسمت،



شکل ۲. نمودار طیف بازتاب و طیف جذب از ساختار. در این حالت در فرکانس 235 THz ، گافی در طیف بازتاب و قله‌ای در طیف جذب مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده برهم‌کنش تشدیدی ساختار با موج الکترومغناطیسی فرودی در این فرکانس است.

بررسی عملکرد حسگری ساختار

ابتدا در حالتی که بین تیغه‌ها و میله‌های فلزی هوا است، منحنی‌های طیف بازتاب و جذب را رسم می‌کنیم. در این حالت، در یک ناحیه فرکانسی در اطراف 235 THz ، دره‌ای در طیف بازتاب و قله‌ای در طیف جذب مشاهده می‌شود که به نوعی نشان‌دهنده برهم‌کنش تشدیدی ساختار با موج الکترومغناطیسی فرودی در این فرکانس است (شکل ۲). جهت مشاهده تشدید به صورتی دیگر، شبیه‌سازی بردار میدان الکتریکی را در این فرکانس ارائه می‌کنیم (شکل ۳. الف). همانگونه که مشاهده می‌شود، در این فرکانس، شدت بردار میدان الکتریکی در دو انتهای میله‌ها بسیار زیاد بوده که نشان‌دهنده تجمع بارهای الکتریکی در این دو انتها و القای ممان دو قطبی الکتریکی تشدید در میله‌ها است. به هدف مقایسه، در یک فرکانس با بازتاب نزدیک به یک (224 THz) نیز شبیه‌سازی میدان الکتریکی را انجام می‌دهیم (شکل

نتیجه گیری

در این مقاله به کمک روش‌های شبیه‌سازی، ساختار فراماده‌ای را پیشنهاد داده‌ایم که در محدوده‌های فرکانسی فرورسرخ می‌تواند به عنوان یک زیست‌حسگر مبتنی بر ضریب شکست با حساسیت بالا عمل نماید. هنگام استفاده از آب و محلول ۲۵ درصد گلوکز در بین قطعات فلزی ساختار، فرکانس تشدید به ترتیب برابر $205/3 \text{ THz}$ و $201/1 \text{ THz}$ بوده که بدان معنا است که حساسیت این حسگر برابر $775 \text{ nm} / \text{RIU}$ می‌باشد. در مقایسه با بیشتر حسگرهای فراماده معرفی شده تاکنون، این مقدار بالاتر است.

مرجع‌ها

- [1] Soukoulis *et. al.*, "Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials," *Nature Photon.* Vol. 5, pp. 523, 2011.
- [2] N. I. Zheludev, "Obtaining optical properties on demand," *Science*, Vol. 348, pp. 973, 2015.
- [3] Liu *et. al.*, "Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing," *Nano. Lett.* Vol. 10, pp. 1103, 2010.
- [4] Tassin *et. al.*, "A comparison of graphene, superconductors and metals as conductors for metamaterials and plasmonics," *Nat. Photon.* Vol. 6, pp. 259, 2012.
- [5] A. Keshavarz, Z. Vafapour, "Water-based terahertz metamaterial for skin cancer detection application," *IEEE Sensors J.* Vol. 19, pp. 1519, 2019.
- [6] Singh *et. al.*, "Ultrasensitive terahertz sensing with high-Q Fano resonances in metasurface," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 105, pp. 171101, 2014.
- [7] You *et. al.*, "Terahertz refractive index sensors using dielectric pipe waveguides," *Optics Express.* Vol. 20, pp. 5858, 2012.

یک‌بار از آب با ضریب شکست $n=1/332$ و بار دیگر از محلول ۲۵ درصد گلوکز با ضریب شکست $n=1/372$ ، برای پرکردن فضای بین میله‌ها و تیغه‌ها استفاده کرده و نمودارهای بازتاب و جذب را بررسی می‌کنیم (شکل ۴). برای جذب، از رابطه‌ی $A=1-T-R$ استفاده می‌کنیم که در آن T ضریب عبور، R ضریب بازتاب، و A ضریب جذب است. در حالی که هنگام استفاده از هوا بین میله‌ها، فرکانس تشدید برابر 235 THz بود، هنگام استفاده از آب و محلول ۲۵ درصد گلوکز، فرکانس تشدید به ترتیب برابر $205/3 \text{ THz}$ و $201/1 \text{ THz}$ به دست می‌آید. این بدان معنا است که اگر آب موجود بین قطعات فلزی را با محلول گلوکز جایگزین کنیم، فرکانس تشدید به اندازه $4/2 \text{ THz}$ به سمت فرکانس‌های کمتر انتقال می‌یابد (انتقال قرمز). بنابراین با اندازه‌گیری فرکانس تشدید می‌توان نوع مایع بین قطعات فلزی را تعیین کرد. این یعنی اینکه ساختار می‌تواند به عنوان یک حسگر مبتنی بر ضریب شکست عمل نماید. حساسیت چنین حسگرهایی به صورت مقدار تغییر در فرکانس (طول موج) تشدید به ازای واحد تغییر در ضریب شکست محیط تعریف شده و بر حسب THz / RIU (یا nm / RIU) بیان می‌شود [۴]. با توجه به اندازه تغییر در فرکانس تشدید هنگام جایگزینی آب با محلول ۲۵ درصد گلوکز، حساسیت حسگر طراحی شده برابر $105 \text{ THz} / \text{RIU}$ (معادل $775 \text{ nm} / \text{RIU}$) به دست می‌آید که در مقایسه با حسگرهای فراماده معرفی شده تاکنون، مقدار آن بالا و قابل توجه است. به عنوان مثال، اندازه حساسیت گزارش شده در مراجع [۵]، [۶] و [۷]، به ترتیب برابر $111 \mu\text{m} / \text{RIU}$ ، $57 \mu\text{m} / \text{RIU}$ و $22/2 \text{ GHz} / \text{RIU}$ است. حسگر طراحی شده می‌تواند در صنایع غذایی برای تعیین میزان گلوکز موجود در مواد غذایی مختلف و همچنین به عنوان یک زیست حسگر در آشکارسازی مولکول‌های زیستی از قبیل پروتئین‌ها و مولکول‌های DNA مورد استفاده قرار گیرد.