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 نموده‌ایم که در محدوده های فرکانسی فروسرخ عمل می‌کند. هنگام استفاده از آب در بین قطعات فلزی، فرکانس تشدید ساختار برابر THz ۲۰۵/۳ و هنگام استفاده از محلول ۲۵ درصد گلوکز در بین آن‌ها، فرکانس تشدید برابر THz ۲۰۱/۱ به دست می‌آید. در نتیجه حساسیت حسگر طراحی شده برابر THz/ RIU ۱۰۵ (معادل nm/ RIU ۷۷۵) محاسبه می‌شود 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.

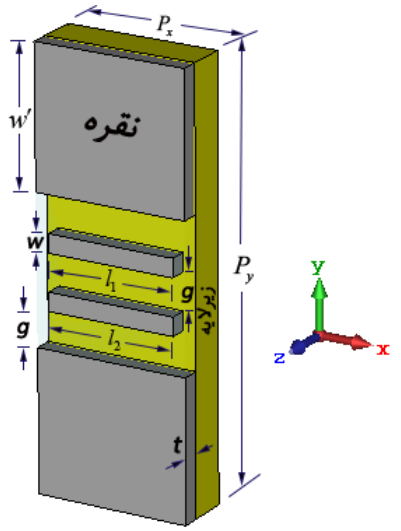
Keywords: resonance, sensor, metamaterials, terahertz oscillations.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]

مقدمه

فراموادها، ساختارهای مصنوعی با سلول واحد کوچکتر از طول موج هستند که علاوه بر داشتن خصوصیاتی 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 مهم ترین این کاربردها استفاده از آن ها برای تولید حسگری های 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 گرفته اند. ضخامت قطعات فلزی $t = ۳۰nm$ 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 $\varepsilon = ۲/۲$ قرار گرفته‌اند [۳]. میله‌ها دارای طولی برابر $l_۱ = l_۲ = ۲۱۰nm$ و پهنایی برابر $w = ۳۰nm$ بوده و در فاصله $g = ۶۰nm$ از یکدیگر، در وسط سلول واحد قرار گرفته‌اند. تیغه‌های فلزی در راستای x کل سلول واحد را می پوشانند و در راستای y در دو انتهای سلول واحد قرار گرفته و طولی برابر $w' = ۲۳۰nm$ دارند. ساختار در راستاهای x و y دوره‌ای بوده و در راستای z تک‌لایه‌ای است.

روش انجام شبیه‌سازی

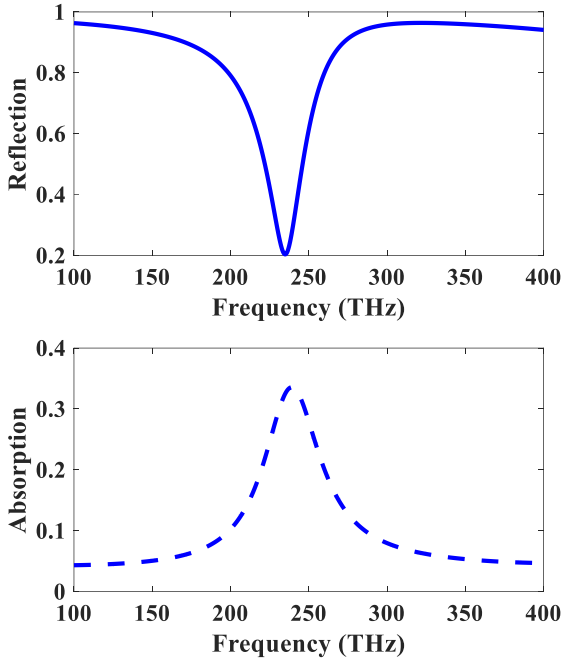
در انجام شبیه‌سازی‌ها، تنها از یک سلول واحد با شرط‌های مرزی مناسب استفاده می‌کنیم. یک موج الکترومغناطیسی قطبیده‌ی خطی، با میدان الکتریکی در راستای محور x (در امتداد میله‌ها) و میدان مغناطیسی در راستای محور y (عمود بر میله‌ها و در صفحه x-y) را عمود بر ساختار و در راستای z می‌تابانیم و ضرایب عبور و بازتاب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

$$\varepsilon(\omega) = ۱ - \frac{\omega_p^{۲}}{\omega^{۲} + i\omega\gamma} \qquad (۱)$$

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 $۱/۴\times۱۰^{۱۶} rad/s$ و $۰/۰۳۲\times۱۰^{۱۵} ۱/s$ 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 شبیه‌سازی ها و محاسبات از نرم افزار CST Microwave Studio استفاده کرده‌ایم.

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

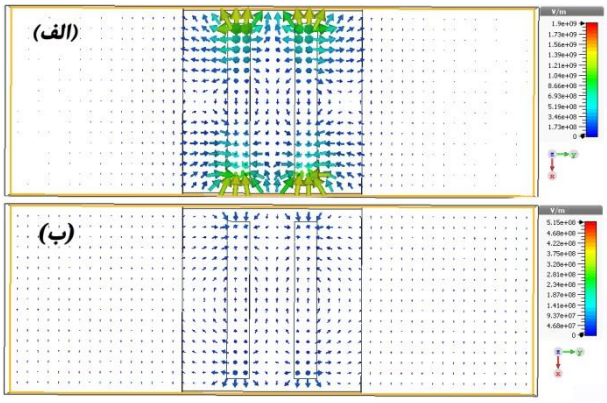
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]



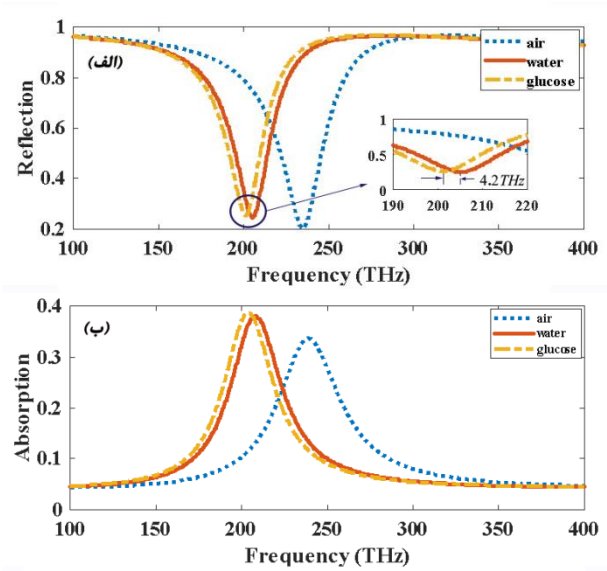
شکل ۲. نمودار طیف بازتاب و طیف جذب از ساختار. در این حالت در فرکانس ۲۳۵THz، گافی در طیف بازتاب و قله ای در طیف جذب مشاهده می شود که نشان دهنده برهم‌کنش تشدیدی ساختار با موج الکترومغناطیسی فرودی در این فرکانس است.

بررسی عملکرد حسگری ساختار

ابتدا در حالتی‌که بین تیغه‌ها و میله‌های فلزی هوا است، منحنی‌های طیف بازتاب و جذب را رسم می‌کنیم. در این‌حالت، در یک ناحیه فرکانسی در اطراف ۲۳۵THz، دره‌ای در طیف بازتاب و قله ای 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 تشدیدی در میله‌ها است. به هدف مقایسه، در یک فرکانس با بازتاب نزدیک به یک (۳۲۴THz) نیز شبیه‌سازی میدان الکتریکی را انجام می‌دهیم (شکل ۳.ب). مشاهده می‌شود که نسبت به حالت قبل، تجمع میدان‌ها در دو انتهای میله ها ضعیف بوده که نشان‌دهنده عدم وجود تشدید در این فرکانس است.



شکل ۳. شبیه سازی بردار میدان الکتریکی در دو فرکانس متفاوت؛ (الف) در فرکانس تشدیدی ۲۳۵THz و (ب) در فرکانس غیرتشدیدی ۳۲۴THz.



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 ۲۳۵THz، ۲۰۵/۳THz و ۲۰۱/۱THz 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،

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]

یک‌بار از آب با ضریب شکست $n=۱/۳۳۲$ و بار دیگر از محلول ۲۵ درصد گلوکز با ضریب شکست $n=۱/۳۷۲$، برای پرکردن فضای بین میله‌ها و تیغه‌ها استفاده کرده و نمودارهای بازتاب و جذب را بررسی می‌کنیم (شکل ۴). برای جذب، از رابطه‌ی $A=۱-T-R$ استفاده می کنیم که در آن T ضریب عبور، R ضریب بازتاب، و A ضریب جذب است. در حالی‌که هنگام استفاده از هوا بین میله‌ها، فرکانس تشدید برابر $۲۳۵THz$ بود، هنگام استفاده از آب و محلول ۲۵ درصد گلوکز، فرکانس تشدید به‌ترتیب برابر $۲۰۵/۳THz$ و $۲۰۱/۱THz$ به‌دست می‌آید. این بدان معنا است که اگر آب موجود بین قطعات فلزی را با محلول گلوکز جایگزین کنیم، فرکانس تشدید به اندازه $۴/۲THz$ 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 (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 $۱۰۵THz/RIU$ (معادل $۷۷۵nm/RIU$) به‌دست می‌آید که در مقایسه با حسگرهای فراماده معرفی شده تاکنون، مقدار آن بالا و قابل‌توجه است. به عنوان مثال، اندازه حساسیت گزارش شده در مراجع [۵]، [۶] و [۷]، به‌ترتیب برابر $۱۱۷\mu m/RIU$، $۵۷\mu m/RIU$ و $۲۲/۲GHz/RIU$ است. حسگر طراحی شده‌ی ما 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.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به کمک روش‌های شبیه‌سازی، ساختار فرامادهای را پیشنهاد داده‌ایم که در محدوده‌های فرکانسی فروسرخ 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 $۲۰۵/۳THz$ و $۲۰۱/۱THz$ بوده که بدان معنا است که حساسیت این حسگر برابر $۷۷۵\ nm/RIU$ 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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]