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

بررسی اثر دما بر عملکرد حسگر موجبر بلور فوتونی

سعید دبیری[۱]، مهدی سویزی[۱]

[۱] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

چکیده – در این مقاله به صورت نظری به بررسی اثر دما بر عملکرد حسگر موجبر بلور فوتونی که مبتنی بر تشدید پلاسمون‌های سطحی نانوذرات طلا می‌باشد پرداخته شده است. تحلیل انتشار نور در موجبر بلور فوتونی به روش ماتریسی انجام شده است و سپس اثر دما بر حسگر بررسی شده است. مشاهده گردید که تغییر دما منجر به تغییرات شدید شکل و ارتفاع مد نقص می‌شود. با توجه به پهنای بسیار کمتر قله‌ی مد نقص نسبت به قله‌ی تشدید پلاسمون سطحی در این مقاله از مد نقص به جای طیف پلاسمون سطحی به عنوان اساس کار حسگر دمایی استفاده شده است.

کلید واژه- موجبر بلور فوتونی، تشدید پلاسمون سطحی

Study the effect of temperature on the performance of micro structured photonic crystal waveguide sensors

Saeed Dabiri [1], Mahdi Sovizi [1]

[1] Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

Abstract- In this paper the effect of temperature on the performance of Photonic crystal waveguide sensor based on surface plasmon resonance is theoretically investigated. To analyze the propagation of light in the waveguide the matrix method is used and then the temperature effect on the sensor is analyzed. It is observed that the defects mode varies in peak height, which could be used as a mechanism for temperature sensing applications.

Keywords: Photonic crystal waveguide, Surface plasmon resonance

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-09]

۱- مقدمه

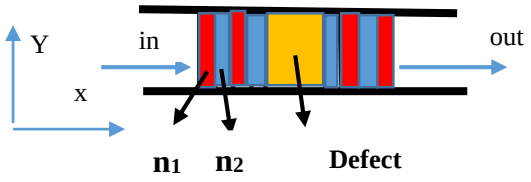
دسته‌ای از ادوات اپتیکی که با بلورهای فوتونی قابل ترکیب شدن هستند تارهای نوری (موجبرها) هستند که به چنین ساختارهایی تار بلور فوتونی می گویند.

در چند سال گذشته راسل و همکارانش با شناخت و تحقیق در مورد تارهای بلور فوتونی در این زمینه پیشگام شدند[۱]. در سال های اخیر تارهای بلور فوتونی که یک نقص بر آنها اعمال شده است اهمیت زیادی را بخاطر خواص منحصر به فردشان بدست آورده اند که این خواص در تارهای معمولی دیده نمی شود. اگر در محیط نقص از نانوذرات فلزی استفاده شود، در مرز بین فلز و دی‌الکتریک می‌توان پدیده‌ی تشدید پلاسمون سطحی را مشاهده کرد که با توجه به خواص ترموپتیکی محیط دی‌الکتریکی و نانوذرات فلزی فرکانس تشدید را می‌توان تحت تاثیر تغییرات دما قرار داد و از این خاصیت به عنوان اساس کار یک حسگر دمایی استفاده کرد[۲].

در این پژوهش به بررسی تاثیر دما بر روی تغییر ارتفاع مد نقص پرداخته شده است که این پدیده ناشی از تاثیر دما بر روی تغییر شکل و جا به جایی طیف تشدید پلاسمون سطحی می‌باشد. در این راستا از مدل ماتریسی برای بررسی انتشار نور در موجبر استفاده شده است.

۲- ساختمان حسگر موجبر بلور فوتونی

فرض شده است در یک موجبر تیغه‌ای با دهانه‌ی ۱ میکرومتر با ایجاد تناوب‌های طولی، ساختار موجبر بلور فوتونی مورد نظر تشکیل شده است. ضریب شکست مغزی موجبر ۱/۳ و محیط اطراف آن هوا فرض می‌شود. بلور فوتونی یک بعدی از ۱۲ تناوب در سمت راست و ۱۲ تناوب در سمت چپ تشکیل شده که یک نقص در وسط آن قرار می‌گیرد. هر تناوب از دو لایه با ضرایب شکست ۱,۲۱ و ۱,۸۰ و طول ۹۰ و ۶۵ نانومتر تشکیل شده است. طول محیط نقص ۹۵۰ نانومتر و جنس آن شیشه‌ی سیلیکایی می‌باشد که به نانوذرات طلا به شعاع ۲۵ نانومتر آغشته شده است. طول و ضریب شکست اجزای بلور فوتونی به گونه‌ای انتخاب شده است که ناحیه‌ی ممنوعه فوتونی و مد نقص در محل تشدید پلاسمون سطحی قرار گیرد. شماتیک ساختار تعریف شده در شکل (۱) نشان داده می شود.



شکل۱: طرح شماتیک موجبر بلور فوتونی

۳- روش حل مسئله

در این مسئله برای بررسی انتشار نور در موجبر از مدل ماتریسی استفاده شده است. در این راستا با تعیین ماتریس انتقال هر یک از لایه‌ها و محیط نقص به انجام محاسبات لازم برای بررسی انتشار نور در موجبر بلور فوتونی پرداخته شده است[۳].

در اغلب پژوهش‌هایی که در مورد موجبرها و کاربردهای آنها انجام می‌شود، دهانه‌ی موجبر با ابعاد بزرگ در نظر گرفته می‌شود. در اینگونه موجبرها تعداد مدهایی که مجاز به انتشار می‌باشند بسیار زیاد است از آن رو ثابت انتشار مدها به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. از این رو مدهای نقص ساختار به دلیل بر هم نهی پهن می‌باشند که تشخیص جا به جایی آنها دشوار است و قابلیت آشکارسازی آنها به صورت جداگانه وجود ندارد. در این راستا با کوچک کردن دهانه‌ی موجبر تعداد مدهای مجاز بسیار محدود شده و مدهای نقص به علت نداشتن بر هم نهی پهنای کمی دارند و تیز می‌باشند، بنابراین تشخیص جا به جایی آنها راحت تر می‌باشد. از این رو در این مسئله از موجبر با دهانه‌ی کوچک استفاده شده است. برای محاسبه‌ی ثابت انتشار و به دست آوردن یک رابطه‌ی تحلیلی برای پاشندگی موجبر با حل عددی معادله‌ی مشخصه‌ی موجبر به ازای ۳۰۰ طول موج در بازه‌ی ۳۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر، ثابت‌های انتشار برای مدهای پایه به دست آمده است. سپس با برازش یک منحنی بر روی نقاط مورد نظر، تابع متناظر با منحنی برازش شده به دست آمده است. از این پس این تابع، تابع برازش شده‌ی ثابت انتشار نامیده می‌شود که به صورت زیر است:

$$\beta(\lambda) = \left(-A\lambda^{3} + B\lambda^{2} - C\lambda + D\right) \qquad (1)$$

در این معادله $A=1{,}59\times10^{26}$، $B=3{,}14\times10^{20}$، $C=227950413772896$ و $D=71315599{,}23$ می‌باشد. از آنجا که فرض شده است دهانه ورودی موجبر در منطقه‌ای دور از ناحیه حسگری قرار دارد این ضرایب بستگی دمایی ندارند. با استفاده از این تابع می‌توان زوایای

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-09]

انتشار مجاز را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\theta = Cos^{-1}\left(\frac{\beta(\lambda)}{k}\right) \qquad (2)$$

k عدد موج و θزاویه‌ی مجاز انتشار نور در موجبر می‌باشد. سپس با استفاده از قانون اسنل انتشار نور در سایر لایه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴- تاثیر دما بر حسگر

چون پدیده‌ی تحریک پلاسمون سطحی مبتنی بر نوسانات دسته جمعی الکترون‌های آزاد سطح فلز است، هر عامل فیزیکی مانند دما که بتواند موجب تغییر ضریب شکست حسگر بشود، قادر به ایجاد تغییرات موثر در طیف تشدید پلاسمون سطحی است[۲].

الف) تاثیر دما بر بدنه‌ی سیلیکایی حسگر

از دهه‌ی ۱۹۶۰ تا به حال ماده‌ی اصلی سازنده‌ی موجبرها و ادوات تار نوری شیشه‌ی سیلیکایی بوده است، از این رو علاوه بر دانستن رابطه‌ی پاشندگی، شناخت تابعیت دمایی ضریب شکست آن جهت طراحی بسیار مهم است[۲]. ضریب شکست شیشه‌ی سیلیکایی که به عنوان دی-الکتریک در ساختار مورد نظر به کار رفته است از رابطه‌ی سلمیر به دست می‌آید. این رابطه به صورت زیر نمایش داده می‌شود[4] :

$$n^2 - 1 = \sum_{l=1}^{3} \frac{a_l}{b_l^2 - E^2} \qquad (3)$$

که در اینجا n ضریب شکست، E انرژی فوتون، a_l پارامتری است که از حاصل طول نوسان و تعداد نوسانات در واحد حجم به دست می‌آید و b_l انرژی تشدید نوسانات می-باشد[4]. وابستگی دمایی ضریب شکست با توجه به وابستگی دمایی هر یک از پارامترهای این معادله بیان می-شود. این وابستگی به صورت زیر بیان شده است:

$$a_l = a_{l0} + a_{l1}T + a_{l2}T^2 \qquad (4)$$

$$b_l = b_{l0} + b_{l1}T + b_{l2}T^2 \qquad (5)$$

که T دما و واحد آن درجه‌ی سلسیوس می‌باشد b_{l2}،b_{l1}،b_{l0}، a_{l2}، a_{l1} و a_{l0} ثابت‌های مدل سلمیر وابسته به دما می‌باشد که مقادیر l از ۱ تا ۳ تغییر می‌کند و برای مواد مختلف مقادیر متفاوتی را می‌پذیرد. با وارد کردن ثابت‌های مورد نظر برای شیشه‌ی سیلیکایی که از اندازه-گیری به وسیله‌ی داده‌های تجربی حاصل می‌شود مدل سلمیر وابسته به دما برای شیشه‌ی سیلیکایی حاصل می-گردد[4].

ب) تاثیر دما بر نانوذرات فلزی

رفتار ضریب شکست نانوذرات فلزی بر پایه‌ی مدل درود بیان می‌شود:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{{\omega_p}^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \qquad (6)$$

ω_p فرکانس پلاسما و γ ثابت میرایی می‌باشدکه این معادله برای یک فلز حجمی صادق می‌باشد. در صورتی که در حجم مورد نظر نانوذرات فلزی باشد ثابت میرایی ، γ ، به صورت زیر در معادله ظاهر می‌شود:

$$\gamma = \gamma_{bulk} + \frac{A\, v_f}{R} \qquad (7)$$

که در اینجا γ_{bulk} ثابت میرایی ماده حجمی، A یک ثابت با مقداری نزدیک به ۱، v_f سرعت فرمی و R شعاع نانو ذره می‌باشد[5]. جهت بررسی مدل درود وابسته به دما، وابستگی دمایی هر یک از پارامترهای آن بررسی می‌شود. وابستگی دمایی، γ_{bulk}، ناشی از پراکندگی الکترون – فونون به صورت زیر می‌باشد[6]:

$$\gamma_{bulk}(T) = K'\, T^5 \int_0^{\frac{\theta}{T}} \frac{z^4\, dz}{e^z - 1} \qquad (8)$$

که Θ با توجه به ویژگی‌های فلز مورد نظر تعریف می‌شود و K' یک ثابت می‌باشدکه با داشتن مقدار ثابت میرایی، γ_{bulk}، در یک دمای خاص می‌توان آن را محاسبه نمود[6]. افزایش شعاع نانوذرات نسبت به دما به صورت زیر است:

$$R(T) = R_0(1 + \beta\Delta T)^{\frac{1}{3}} \qquad (9)$$

که R_0 شعاع نانوذره در دمای اتاق و β ضریب انبساط حجمی می‌باشد. ضریب انبساط حجمی به صورت رابطه‌ی زیر به دما وابسته می‌باشد[6]:

$$\beta(T) = \frac{192\rho k_b}{r_0\phi(16\rho - 7Tk_b)^2} \qquad (10)$$

که در اینجا k_b ، ثابت بولتزمن و ϕ, ρ, r_0 پارامترهای پتانسیل مورس می‌باشند. با توجه به روابط ذکر شده فرکانس پلاسما تابعی از دما می‌شود که وابستگی دمایی آن به صورت زیر نمایش داده می‌شود[6]:

$$\omega_p(T) = \frac{\omega_{p0}}{\sqrt{1 + \beta(T)\Delta T}} \qquad (11)$$

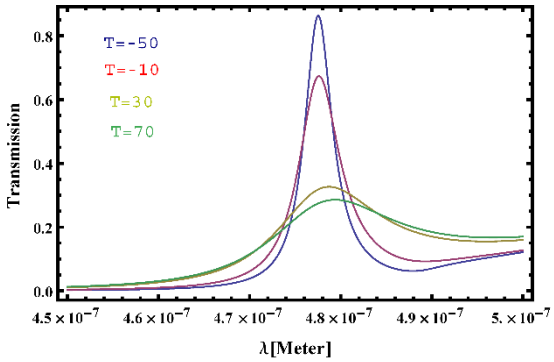
که ω_{p0} فرکانس پلاسمای نانوذره در دمای اتاق می‌باشد. به این ترتیب مدل درود وابسته به دما به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\epsilon(\omega, T) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p(T)^2}{\omega\big(\omega + i\gamma(T)\big)} \qquad (12)$$

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-09]

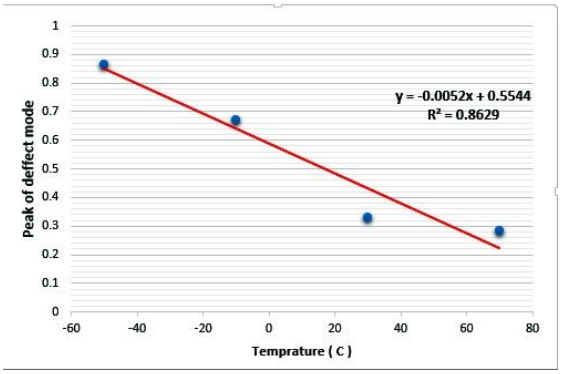
۵- بحث و نتایج

در این قسمت به بررسی میزان تاثیر دما بر روی حسگر دمایی معرفی شده پرداخته می‌شود. در این راستا به محاسبه و مقایسه‌ی ارتفاع مد نقص در دماهای ۵۰-،۱۰-، ۳۰و ۷۰ درجه‌ی سلسیوس برای محیط نقص پرداخته می‌شود که به صورت زیر نشان داده می‌شود:



شکل ۲: منحنی عبور نور از موجبر بلور فوتونی به ازای دماهای مختلف

قله نشان داده شده در شکل (۲) مد نقص تشکیل شده در ناحیه D را در حضور نانوذرات فلزی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تغییر دما، ارتفاع مد نقص تغییر می‌کند ولی موقعیت آن تغییر نکرده است. شیب تغییر ارتفاع مد نقص نسبت به تغییرات دما با شروع از دمای ۵۰- درجه‌ی سلسیوس و افزایش آن با گام ۴۰درجه در شکل (۲) نشان داده شده است:



شکل(۳) : شیب تغییر ارتفاع مد نقص نسبت به تغییرات دما

همان گونه که از شکل (۳) پیداست با افزایش دما از ۵۰- تا ۷۰درجه‌ی سانتی گراد ارتفاع مد نقص به اندازه‌ی ۶۰ درصد کاهش می‌یابد که این مقدار قابل توجهی می‌باشد. تغییرات ارتفاع مد نقص نسبت به دما اگرچه کاملا خطی نمی‌باشد اما نقاط به خط برازش شده بسیار نزدیک می‌باشند. از آن جهت که ارتفاع مد نقص در این ساختار معادل با شدت نور عبوری می‌باشد، با در نظر گرفتن یک باریکه‌ی شاهد می‌توان شدت نور را نسبت به دما کالیبره کرد و از این خاصیت به عنوان اساس کار حسگر دمایی استفاده کرد. در قسمت دیگر نتایج به محاسبه‌ی پهنای قله‌ی مد نقص در این پژوهش و مقایسه‌ی آن با مرجع [۲] پرداخته شد. پهنای محاسبه شده در این ساختار برای دمای ۵۰- درجه سانتی گراد برابر ۴ نانومتر می‌باشد که این پهنا در مرجع[۲] برابر ۲۰ نانومتر است. این مقایسه نشان می‌دهد که پهنای قله تقریبا ۱/۵ برابر شده است که تشخیص جا به جایی قله و آشکارسازی آن را بسیار راحت تر می‌کند.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد یک موجبر بلور فوتونی به عنوان یک حسگر دمایی در حضور نانوذرات طلا پرداخته شد. با توجه به خواص ترمو اپتیکی محیط سیلیکایی و نانوذرات طلا و تغییرات ضریب شکست آنها بر حسب تغییرات دما، تغییرات ارتفاع مد نقص که معادل شدت مد نقص می‌باشد مورد محاسبه قرار گرفت و حساسیت آن نسبت به تغییرات دما اندازه‌گیری شد. در قسمت دوم نتایج، پهنای قله مورد بررسی و مقایسه با حسگرهای مشابه قرار گرفت و مزیت آن در مقایسه بیان شد.

مراجع

[1] J. Broeng, D. Mogilevstev, S. Barkou, A. Bjarklev, *Photonic Crystal Fibers: A New Class of Optical Waveguides*, **Optical Fiber Technology** 5**(1999)** 305-330.

[۲] حمید اسماعیل زاده، عزت اله ارضی، *بررسی اثر دما بر عملکرد حسگر فوتونیک کریستالی پلاسمونی*، **هفدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران** (۱۳۸۹).

[3] G. Fowels, *Introduction to modern optics*, second ed. New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1975.

[4] J. Matsuoka, N. Kitamura, S. Fujinaga, *Temperature dependence of refractive index of SiO_2*, **Non-crystaline Solids** 135(1991) 86-89

[5] M. Rani, NK. Sharma, V. Sajal, *Localized surface plasmon resonance based fiber optic sensor with nanoparticles*, **Optics Communications** 292(2013) 92-100

[6] OA. Yeshchenko, IS. Bondarchuk, VS. Gurin, *Temperature dependence of the surface plasmon resonance in gold nanoparticles*, **Surface Science** (2013)

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-09]