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

طراحی بیوحسگر زیستی با استفاده از امواج سطحی بلاخ در بلور فوتونی نقص‌دار شامل تک لایه‌ی $MoSe_2$

ریحانه خلیلی و نرگس انصاری

r.khalili@student.alzahra.ac.ir - n.ansari@alzahra.ac.ir

گروه فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

چکیده -بیوحسگرهای مبتنی بر امواج سطحی بلاخ (BSW) جایگزین بیوحسگرهای پلاسمونیکی متداول هستند. در این مقاله عملکرد حسگرهای ضریب شکست برپایه تشدید BSW در ساختار بلورفوتونی یک بعدی شامل لایه نقص $MoSe_2$ بررسی شده است. با استفاده از روش محاسباتی ماتریس انتقال TMM در مد TE، میزان جابجایی طول موج تشدید و زاویه تشدید ساختار در اثر تغییرات ضریب شکست ماده زیستی در بازه طول موج فروسرخ نزدیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. حساسیت تصویر برداری ساختار با بهینه سازی ضخامت لایه میانی، لایه مابین بلورفوتونی و تک لایه‌ی $MoSe_2$، ۰/۷ درصد به دست می‌آید. حساسیت بالای بیوحسگرها می‌تواند در زمینه‌ی حسگرهای زیستی و شیمیایی بسیار کاربرد داشته باشد.

کلید واژه- امواج سطحی بلاخ، بلورفوتونی نقص‌دار، بیوحسگر، پلاسمونیک، TMDC

Design a biosensor with the usage of Bloch surface waves in the defective photonic crystal includes monolayer $MoSe_2$

Reyhaneh Khalili, Narges Ansari

r.khalili@student.alzahra.ac.ir - n.ansari@alzahra.ac.ir

Department Physics, Alzahra University, Tehran, Iran

Abstract- Bloch surface waves supersede usual plasmonic biosensors. In this paper, the truncated one-dimensional photonic crystal (1DPC) structure includes monolayer $MoSe_2$ as a defect layer has been investigated. The shift of the resonance wavelength and resonance angle as a result of the change in the refractive index of the biomaterial is explored by using the TMM method in the near-infrared range. The impact of the change in the spacer layer thickness was discussed in detail and imaging sensitivity has been obtained at 0.7 percent. Also, high sensitivity in this paper can be applied in the field of biological and chemical sensor applications.

Keywords: Bloch surface waves, Defective photonic crystal, Biosensor, Plasmonic, TMDC

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

مقدمه

در دهه گذشته، فنّاوری حسگر بر اساس پلاسمون‌های سطحی (SP[1]) به‌سرعت توسعه‌یافته و در طیف وسیعی از کاربردها مورداستفاده قرارگرفته است؛ اما به دلیل اتلاف جذب بالا، منحنی پهن بازتاب و پایداری ضعیف فلزات، بهبود عملکردشان سخت بوده و همراه با هزینه‌های بالای تولید هستند [۱]. یکی از راهکارهای مطرح‌شده استفاده از تشدید امواج سطحی بلاخ (BSW[2]) بوده که امواج الکترومغناطیس سطحی موجود در لایه نقص بلور فوتونی (PC[3]) هستند. BSW ها به علت نبود لایه فلزی نسبت به بیوحسگرهای پلاسمونیکی دارای اتلاف طیفی کمتر و عملکرد بهتر بوده و در هر دو قطبش TE و TM قابل‌مطالعه هستند درحالی‌که در پلاسمونیک تنها قطبش TM بررسی می‌شود [۲]. BSW ها مشابه پلاسمون‌های سطحی، دارای حساسیت بالا نسبت به تغییرات محیط اطراف بوده و با قرارگیری لایه‌های زیستی و تغییر در ضریب شکست آن‌ها در بیوحسگرها استفاده می‌شوند [۳]. برانگیختگی بسیار خوب امواج سطحی بلاخ در کمینه بازتاب اتفاق می‌افتد که مقدار و مکان کمینه نسبت به تغییرات ضریب شکست ماده زیستی بسیار حساس است.

تک لایه‌های کلکوژنایدهای فلزات واسطه (TMDC[4]) به دلیل گاف نواری مستقیم (کمتر از ۲ الکترون‌ولت) فرصت‌های زیادی رو در مطالعه حسگرهای BSW فراهم کرده است که استفاده از آن‌ها پاسخ‌های نوری را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد [۴]. در میان TMDC ها، مولبیدیم دی‌سلنید، $MoSe_2$، به دلیل داشتن سه گاف نواری در طول‌موج‌های ۴۷۴، ۷۱۰ و ۸۰۲ نانومتر به ترتیب با جذب ۳۲، ۷/۶ و ۶/۹ درصد در ابزارهای اپتوالکترونیکی دارای اهمیت می‌باشند [۵].

استفاده از تک‌لایه $MoSe_2$ به‌عنوان نقص در بلورهای فوتونی یک‌بعدی روش مناسبی برای برانگیختگی BSW ها است زیرا به علت جایگزیدگی موج در لایه نقص و ایجاد مد نقص، امکان بهبود شرایط برای استفاده از BSW ها به‌عنوان بیوحسگر ایجاد می‌شود.

در این مقاله بیوحسگرهای امواج سطحی بلاخ در بلور فوتونی نقص‌دار (DPC[5]) شامل $MoSe_2$ در قطبش TE موردبررسی قرارگرفته است. تأثیر تغییر ضریب شکست ماده زیستی و ضخامت لایه میانی بر کمینه میزان بازتاب برای افزایش حساسیت داده‌ها ارزیابی‌شده‌اند.

تئوری

در روش اندازه‌گیری حسگر ضریب شکست، نور از یک لیزر تنظیم‌پذیر بسیار کم نوسان به بلور فوتونی نقص دار تابیده‌شده و با محاسبات اپتیکی، نور بازتابی تحلیل می‌شود. طیف بازتاب شده در یک طول‌موج خاص یا زاویه فرودی مشخص به کمینه مقدار خود می‌رسد.

ساختار موردبررسی برای بیوحسگر BSW، DPC با لایه‌های دی‌الکتریک متناوب TiO_2 و MgF_2 با دوره تناوب ۳ است. تک لایه نقص $MoSe_2$ با استفاده از لایه میانی[6] از جنس TiO_2 با ضخامت d_s انتهای PC گذاشته‌شده و ماده زیستی در زیر لایه نقص قرارگرفته است. نور با زاویه مایل، θ_0، از طریق منشور BK7 به علت جفت کنندگی نور با بلور فوتونی وارد ساختار می‌شود که در شکل ۱ شماتیک ساختار نشان داده‌شده است.

[1] Surface Plasmon

[2] Bloch Surface Wave

[3] Photonic Crystal

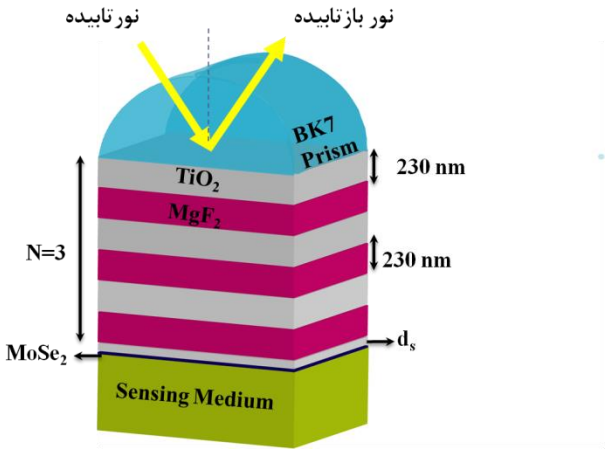
[4] Transition Metal Dichalcogenides (TMDC)

[5] Defective Photonic crystal

[6] Spacer layer

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]



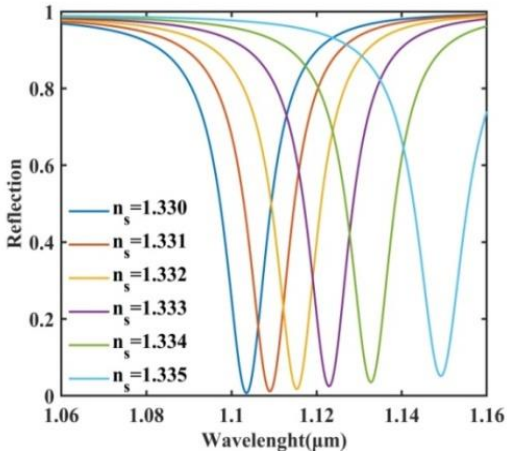
شکل ۱ تصویر شماتیک ساختار بلور فوتونی نقص‌دار برای حسگر زیستی

بازتاب ساختار با استفاده از روش ماتریس انتقال (TMM[1]) محاسبه می‌شود. این روش نیازمند ضخامت و ضریب شکست لایه‌ها است. ضخامت تک لایه $MoSe_2$ و لایه‌های دی‌الکتریک به ترتیب برابر ۰/۷ و ۲۳۰ نانومتر است. ضریب شکست منشور BK7، MgF_2، TiO_2 و $MoSe_2$ از مراجع [۵-۸] گرفته‌شده است و ضریب شکست ماده زیستی بین ۱/۳۳۰ تا ۱/۳۳۵ تغییر می‌کند.

نتایج و بحث

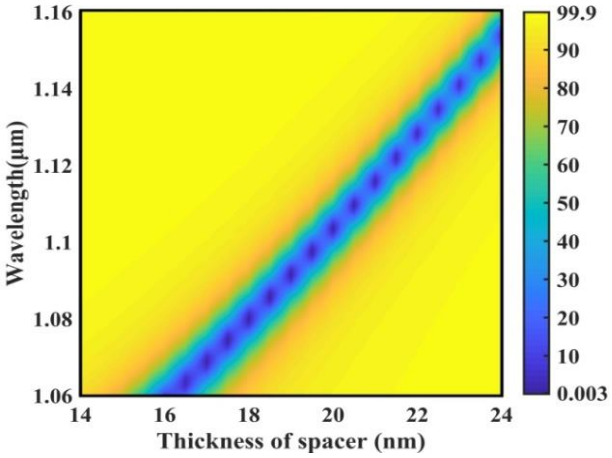
ایجاد یک دره عمیق در طیف بازتاب منجر به بالا رفتن حساسیت بیوحسگر می‌شود. برای تشخیص ماده زیستی در بیوحسگرها لازم است طیف بازتاب در ضریب شکست‌های مختلف n_s، به صفر نزدیک شود. بدین منظور برای d_s=۲۰ nm، طیف بازتاب در بازه‌ی طول‌موج فروسرخ نزدیک در زاویه ۶۲/۵ درجه برای قطبش TE در n_sهای متفاوت در شکل ۲ رسم شده است.

هر کمینه بازتاب در شکل ۲ نشان‌دهنده یک طول‌موج تشدید است که با افزایش n_s به سمت فروسرخ پیش می‌رود.



شکل ۲ طیف بازتاب برای ضریب شکست‌های متفاوت ماده زیستی در زاویه ۶۲/۵ درجه برای قطبش TE

به‌منظور بررسی تأثیر تغییر ضخامت لایه میانی بر طول‌موج تشدید، طیف بازتاب برای n_s= ۱/۳۳۰ برحسب d_s در شکل ۳ رسم شده است. طول‌موج تشدید با افزایش d_s افزایش‌یافته و طول‌موج تشدید در d_s=۲۰nm برابر با ۱۱۰۳نانومتر است.



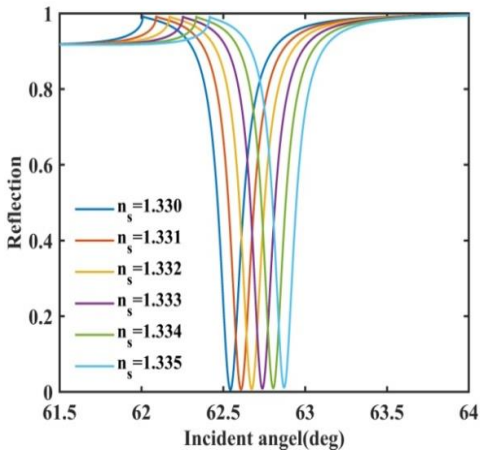
شکل ۳ طیف بازتاب برحسب ضخامت لایه میانی در n_s=۱/۳۳۰ در زاویه ۶۲/۵ درجه برای قطبش TE

بیوحسگر بلاخ علاوه بر تغییر d_s و n_s، به تغییر زاویه فرودی نیز حساس است. بدین منظور در شکل ۴ بازتاب در طول‌موج ۱۱۰۰ نانومتر برای قطبش TE برحسب زاویه فرودی نور، برای n_s های متفاوت رسم شده است. با افزایش n_s تشدید در زاویه بزرگ‌تر اتفاق می‌افتد.

[1] Transfer matrix method

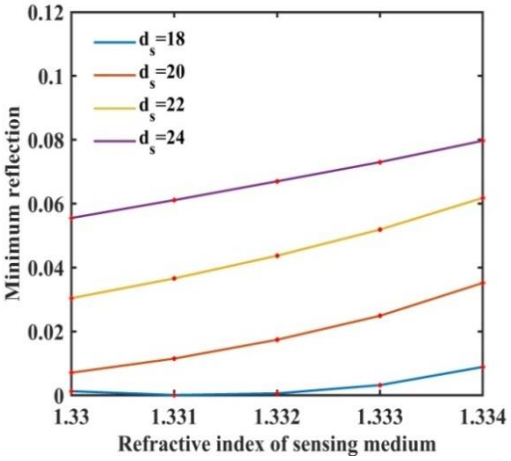
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]



شکل ۴ تغییرات بازتاب برحسب زاویه نور فرودی در طول‌موج ۱۱۰۰ نانومتر

به علت وابستگی کمینه بازتاب به d_s و n_s حساسیت تصویربرداری به‌صورت $\frac{\Delta R}{\Delta n_s}$ تعریف می‌شود که در آن زاویه فرودی ثابت در نظر گرفته‌شده است و ΔR فاصله دو کمینه بازتاب متناسب با تغییرات ضریب شکست ماده زیستی n_s است.



شکل ۵ حساسیت تصویربرداری در ضخامت‌های متفاوت لایه میانی

شیب نمودار در شکل ۵ نشان‌دهنده حساسیت تصویربرداری بوده و بیشترین حساسیت تصویربرداری با مقدار ۰/۷ درصد برای d_s= ۲۰nm به دست می‌آید که در تمام شکل‌ها از این مقدار ضخامت بهینه استفاده‌شده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله امواج سطحی بلاخ در بیوحسگرهای زیستی با توجه به طیف بازتاب، ضریب شکست ماده زیستی و ضخامت لایه میانی بررسی‌شده است که ایجاد یک دره عمیق در طیف بازتاب منجر به بالا رفتن حساسیت بیوحسگر می‌شود. حساسیت تصویربرداری بر اساس مقدار کمینه بازتاب و ضریب شکست ماده زیستی در d_s=۲۰nm، ۰/۷ درصد به دست آورده شده است. با توجه به نتایج می‌توان حسگرهای زیستی با حساسیت بالا با استفاده از بلورهای فوتونی نقص‌دار طراحی نمود که در اپتوالکترونیک بسیار موردتوجه است.

مرجع‌ها

[1]. Sinibaldi, A., et al., *Direct comparison of the performance of Bloch surface wave and surface plasmon polariton sensors.* Sensors and Actuators B: Chemical, 2012. **174**: p. 292-298.
[2]. Gan, S., et al., *Ultra-sensitive refractive index sensors based on Bloch surface waves with transition metal dichalcogenides.* IEEE Sensors Journal, 2019. **19**(19): p. 8675-8680.
[3]. Fenzl, C., T. Hirsch, and O.S. Wolfbeis, *Photonic crystals for chemical sensing and biosensing.* Angewandte Chemie International Edition, 2014. **53**(13): p. 3318-3335.
[4]. Yun, W.S., et al., *Thickness and strain effects on electronic structures of transition metal dichalcogenides: 2H-M X 2 semiconductors (M= Mo, W; X= S, Se, Te).* Physical Review B, 2012. **85**(3): p. 033305.
[5]. Ansari, N. and F. Ghorbani, *Light absorption optimization in two-dimensional transition metal dichalcogenide van der Waals heterostructures.* JOSA B, 2018. **35**(5): p. 1179-1185.
[6]. Optical constant of TiO_2, *https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=TiO2&page=Devore-o*.
[7]. Optical constant of MgF_2, *https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=MgF2&page=Dodge-o*.
[8]. Optical constant of BK7, *https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT*.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]