



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 نقص دار شامل تک لایه $\text{MoSe}_2$

ریحانه خلیلی و نرگس انصاری

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

گروه فیزیک، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران

چکیده - بیوحسگرهای مبتنی بر امواج سطحی بلاخ (BSW) جایگزین بیوحسگرهای پلاسمونیک متداول هستند. در این مقاله عملکرد حسگرهای ضریب شکست برپایه تشدید BSW در ساختار بلور فوتونی یک بعدی شامل لایه نقص  $\text{MoSe}_2$  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 بلور فوتونی و تک لایه  $\text{MoSe}_2$ ،  $\pm 0.7\%$  درصد به دست می آید. حساسیت بالای بیوحسگرها می تواند در زمینه ی حسگرهای زیستی و شیمیایی بسیار کاربرد داشته باشد.

کلید واژه - امواج سطحی بلاخ، بلور فوتونی نقص دار، بیوحسگر، پلاسمونیک، TMDC

## Design a biosensor with the usage of Bloch surface waves in the defective photonic crystal includes monolayer $\text{MoSe}_2$

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  $\text{MoSe}_2$  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

## مقدمه

در دهه گذشته، فناوری حسگر بر اساس پلاسمون‌های سطحی ( $SP^1$ ) به سرعت توسعه یافته و در طیف وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار گرفته 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 مطرح شده 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 پلاسمونیک دارای اتلاف طیفی کمتر و عملکرد بهتر بوده و در هر دو قطبش  $TE$  و  $TM$  قابل مطالعه هستند درحالی که در پلاسمونیک تنها قطبش  $TM$  بررسی می شود [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 می شوند [۳]. برانگیختگی بسیار خوب امواج سطحی بلاخ در کمینه بازتاب اتفاق می افتد که مقدار و مکان کمینه نسبت به تغییرات ضریب شکست ماده زیستی بسیار حساس است.

تک لایه‌های کلکوژناید های فلزات واسطه ( $TMDC^4$ ) به دلیل گاف نواری مستقیم (کمتر از ۲ الکترون ولت) فرصت‌های زیادی رو در مطالعه حسگرهای  $BSW$  فراهم کرده است که استفاده از آن‌ها پاسخ‌های نوری را به طرز چشمگیری افزایش می دهد [۴]. در میان  $TMDC$  ها، مولبیدیم دی سلنید،  $MoSe_2$ ، به دلیل داشتن سه گاف

نواری در طول موج‌های ۴۷۴، ۷۱۰ و ۸۰۲ نانومتر به ترتیب با جذب ۳۲، ۷/۶ و ۶/۹ درصد در ابزارهای اپتوالکترونیکی دارای اهمیت می باشند [۵].

استفاده از تک لایه  $MoSe_2$  به عنوان نقص در بلورهای فوتونی یک بعدی 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 به عنوان بیوحسگر ایجاد می شود.

در این مقاله بیوحسگرهای امواج سطحی بلاخ در بلور فوتونی نقص دار ( $DPC^5$ ) شامل  $MoSe_2$  در قطبش  $TE$  مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر تغییر ضریب شکست ماده زیستی و ضخامت لایه میانی بر کمینه میزان بازتاب برای افزایش حساسیت داده‌ها ارزیابی شده‌اند.

## تئوری

در روش اندازه گیری حسگر ضریب شکست، نور از یک لیزر تنظیم پذیر بسیار کم نوسان به بلور فوتونی نقص دار تابیده شده و با محاسبات اپتیکی، نور بازتابی تحلیل می شود. طیف بازتاب شده در یک طول موج خاص یا زاویه فرودی مشخص به کمینه مقدار خود می رسد.

ساختار مورد بررسی برای بیوحسگر  $BSW$ ،  $DPC$  با لایه‌های دی الکتریک متناوب  $TiO_2$  و  $MgF_2$  با دوره تناوب ۳ است. تک لایه نقص  $MoSe_2$  با استفاده از لایه میانی<sup>۶</sup> از جنس  $TiO_2$  با ضخامت  $d_s$  انتهای  $PC$  گذاشته شده و ماده زیستی در زیر لایه نقص قرار گرفته است. نور با زاویه مایل،  $\theta_0$ ، از طریق منشور  $BK7$  به علت جفت کنندگی نور با بلور فوتونی وارد ساختار می شود که در شکل ۱ شماتیک ساختار نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Surface Plasmon

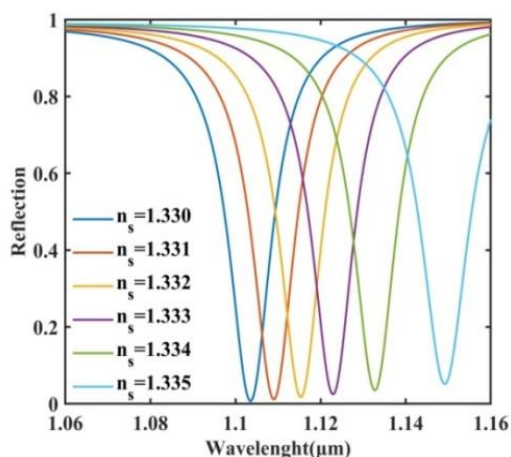
<sup>2</sup> Bloch Surface Wave

<sup>3</sup> Photonic Crystal

<sup>4</sup> Transition Metal Dichalcogenides (TMDC)

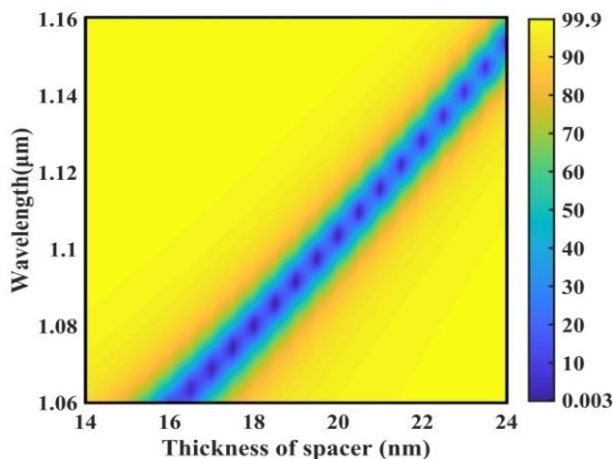
<sup>5</sup> Defective Photonic crystal

<sup>6</sup> Spacer layer



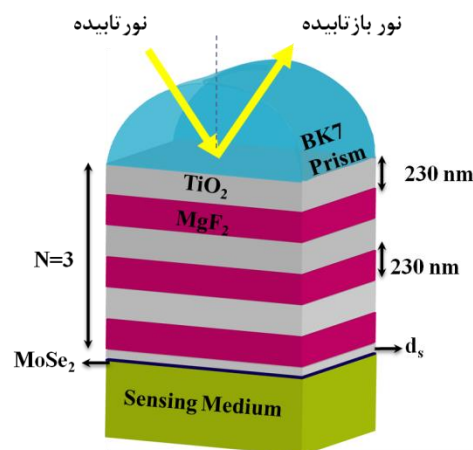
شکل ۲ طیف بازتاب برای ضریب شکست‌های متفاوت ماده زیستی در زاویه ۶۲/۵ درجه برای قطبش TE

به منظور بررسی تأثیر تغییر ضخامت لایه میانی بر طول موج تشدید، طیف بازتاب برای  $n_s = 1/330$  برحسب  $d_s$  در شکل ۳ رسم شده است. طول موج تشدید با افزایش  $d_s$  افزایش یافته و طول موج تشدید در  $d_s = 20 \text{ nm}$  برابر با  $1103 \text{ nm}$  است.



شکل ۳ طیف بازتاب برحسب ضخامت لایه میانی در  $n_s = 1/330$  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 طول موج  $1100 \text{ nm}$  برای قطبش TE برحسب زاویه فرودی نور، برای  $n_s$  های متفاوت رسم شده است. با افزایش  $n_s$  تشدید در زاویه بزرگتر اتفاق می افتد.



شکل ۱ تصویر شماتیک ساختار بلور فوتونی نقص دار برای حسگر زیستی

بازتاب ساختار با استفاده از روش ماتریس انتقال ( $TMM^1$ ) محاسبه می شود. این روش نیازمند ضخامت و ضریب شکست لایه ها است. ضخامت تک لایه  $MoSe_2$  و لایه های دی الکتریک به ترتیب برابر  $0.7$  و  $230 \text{ nm}$  است. ضریب شکست منشور  $BK7$ ،  $MgF_2$ ،  $TiO_2$  و  $MoSe_2$  از مراجع [۵-۸] گرفته شده است و ضریب شکست ماده زیستی بین  $1/330$  تا  $1/335$  تغییر می کند.

## نتایج و بحث

ایجاد یک دره عمیق در طیف بازتاب منجر به بالا رفتن حساسیت بیوحسگر می شود. برای تشخیص ماده زیستی در بیوحسگرها لازم است طیف بازتاب در ضریب شکست های مختلف  $n_s$  به صفر نزدیک شود. بدین منظور برای  $d_s = 20 \text{ nm}$ ، طیف بازتاب در بازه ی طول موج فروسرخ نزدیک در زاویه ۶۲/۵ درجه برای قطبش TE در  $n_s$  های متفاوت در شکل ۲ رسم شده است.

هر کمینه بازتاب در شکل ۲ نشان دهنده یک طول موج تشدید است که با افزایش  $n_s$  به سمت فروسرخ پیش می رود.

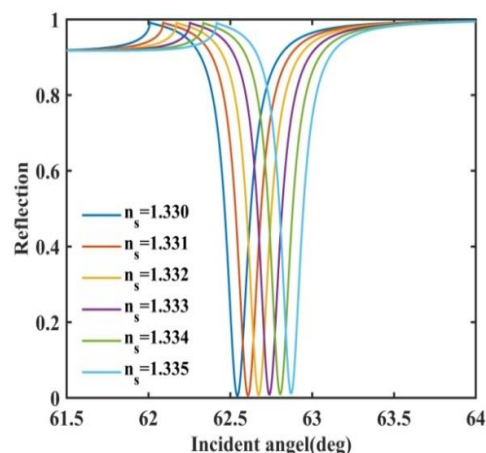
<sup>1</sup> Transfer matrix method

## نتیجه گیری

در این مقاله امواج سطحی بلاخ در بیوحسگرهای زیستی با توجه به طیف بازتاب، ضریب شکست ماده زیستی و ضخامت لایه میانی بررسی شده است که ایجاد یک دره عمیق در طیف بازتاب منجر به بالا رفتن حساسیت بیوحسگر می شود. حساسیت تصویربرداری بر اساس مقدار کمینه بازتاب و ضریب شکست ماده زیستی در  $d_s = 20 \text{ nm}$ ،  $0.7\%$  درصد به دست آورده شده است. با توجه به نتایج می توان حسگرهای زیستی با حساسیت بالا با استفاده از بلورهای فوتونی نقص دار طراحی نمود که در اپتوالکترونیک بسیار مورد توجه است.

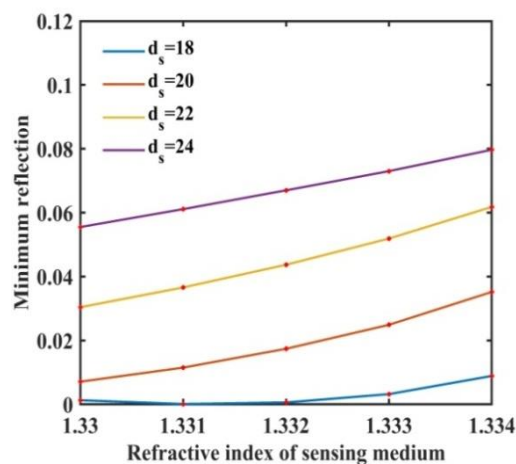
## مرجع ها

- [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  $\text{TiO}_2$ , <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=TiO2&page=Devore-o>.
- [7]. Optical constant of  $\text{MgF}_2$ , <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=MgF2&page=Dodge-o>.
- [8]. Optical constant of BK7, <https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT>.



شکل ۴ تغییرات بازتاب برحسب زاویه نور فرودی در طول موج ۱۱۰۰ نانومتر

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



شکل ۵ حساسیت تصویربرداری در ضخامت های متفاوت لایه میانی

شیب نمودار در شکل ۵ نشان دهنده حساسیت تصویربرداری بوده و بیشترین حساسیت تصویربرداری با مقدار  $0.7\%$  درصد برای  $d_s = 20 \text{ nm}$  به دست می آید که در تمام شکل ها از این مقدار ضخامت بهینه استفاده شده است.