

مدل سازی نانو ساختار جاذب مبتنی بر فسفر سیاه در محدوده طول موج های فروسرخ

الهه حسینی^{۱*}، علی میر^۱، علی فرمانی^۱

^۱ گروه الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

hosseini.el@fe.lu.ac.ir , mir.a@lu.ac.ir , farmani.a@lu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، به منظور افزایش جذب نور، یک نانو ساختار مبتنی بر فسفر سیاه ارائه شده است. نانو ساختار مورد نظر یک ساختار توری شکل مبتنی بر فسفر سیاه و سیلیکون است. به منظور دستیابی به میزان جذب، از تحلیل عددی برای این ساختار استفاده شده است. برای ارزیابی این نانو ساختار ضریب گذردهی فسفر سیاه در محدوده طول موجی $5\ \mu\text{m}$ تا $15\ \mu\text{m}$ محاسبه و نمودار جذب به دست آمده است. نتایج عددی به دست آمده، نشان می دهد بیشترین میزان جذب در طول موج های $\lambda_1 = 7.7\ \mu\text{m}$ و $\lambda_2 = 9.7\ \mu\text{m}$ به ترتیب برابر 0.5 و 0.26 به دست آمده است. نانو ساختار پیشنهادی می تواند در جاذب های تنظیم پذیر در محدوده طول موج های فروسرخ مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژگان: فسفر سیاه؛ نانو ساختار؛ نانو پوسته؛ توری؛ جذب؛ پلاسمون سطحی.

Modeling of absorbent nanostructure black phosphorus-based in the range of infrared wavelengths

Elahe Hosseini^{1,*}, Ali Mir¹, Ali Farmani¹

¹Department of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

hosseini.el@fe.lu.ac.ir , mir.a@lu.ac.ir , farmani.a@lu.ac.ir

Abstract: In the present paper, to increase the light absorption, a black phosphorus-based nanostructure is proposed. The presented nanostructure has a grating-shaped structure based on black phosphorus and silicon. To access of reasonable absorption, numerical analysis has been used. To benchmark of this nanostructure, the black phosphorus permittivity in the wavelength range of $5\ \mu\text{m}$ to $15\ \mu\text{m}$ was calculated and the absorption spectrum is obtained. The obtained numerical results show that maximum absorption is obtained at wavelengths $\lambda_1 = 7.7\ \mu\text{m}$ and $\lambda_2 = 9.7\ \mu\text{m}$, which is to 0.5 and 0.26 , respectively. The proposed nanostructure can be used in tunable absorbers in the range of infrared wavelengths.

Keywords: black phosphorus; nanostructure; nanoflake; grating; absorption; surface plasmon.

* hosseini.el@fe.lu.ac.ir

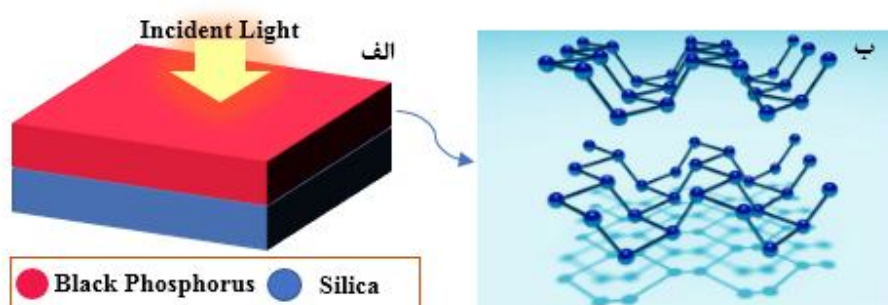
۱- مقدمه

در سال های اخیر با ظهور زمینه نسبتاً جدیدی در مبحث نور به نام پلاسمونیک، راه های زیادی برای کوچک سازی ابزارهای فوتونی در برابر محققان گشوده شده است. در سال ۲۰۱۴، برخی از گروه های تحقیقاتی در مورد عضو جدید خانواده دو بعدی، فسفر سیاه گزارش دادند. هر دو شکل فسفر سیاه به صورت تک و همچنین چند لایه، به دلیل خاصیت شکاف باند مستقیم اما قابل تنظیم، آن را به عنوان یک افزاره نیم رسانای آرمانی برای کاربردهای مختلف مانند تبدیل فتو-الکتریکی کارآمد و انتشار فوق العاده نور قرار می دهد. با افزایش تعداد لایه ها، برهم کنش های داخل لایه ها مشخص می شود [۱]. در همین راستا در سال ۲۰۱۸ پال و همکاران زیست حسگر مبتنی بر فسفر سیاه برای تشخیص پیوندزنی DNA را پیشنهاد دادند که حساسیت، دقت تشخیص و ضریب کیفیت به دست آمده برای این ساختار به ترتیب RIU ۰/۱۲۵، ۰/۹۵، ۱۳/۶۲ RIU⁻¹ بوده است [۲]. در سال بعد کومار و همکاران با ارائه زیست حسگر فسفر سیاه توانستند به حساسیت ۱/۷ دست یابند [۳]. در سال ۲۰۱۹ برای تشخیص سرطان، زیست حسگر فسفر سیاه - فیبرنوری توسط ژو و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۴].

۲- مدل و تئوری تحقیق

شکل (۱) یک نانو ساختار پوسته ای مبتنی بر فسفر سیاه، به صورت یک آرایه مربعی از فسفر سیاه به عنوان سلول اولیه با دوره تناوب $P=200\text{ nm}$ را نشان می دهد که در صفحه x-y تشکیل شده است. نانو پوسته فسفر سیاه دارای شکل مکعبی به ابعاد $L \times L \times d$ است. پارامترهای پوسته فسفر سیاه دارای مقادیر $L=150\text{ nm}$ و $d=2\text{ nm}$ هستند. این امکان را می دهد تا برای تعریف گذردهای الکتریکی نسبی فسفر سیاه با ضخامت d یک تانسور قطری معادل $\epsilon_D(\epsilon_{33}, \epsilon_{22}, \epsilon_{11})$ تعریف شود. رسانایی فسفر سیاه چند لایه، از رابطه $\sigma_{zz} = \frac{id_j}{\pi(\omega + i\eta_e)}$ محاسبه می شود که در آن ۲ و ۱، j ، بیانگر راستای x یا y است. همچنین $D_j = \pi e^2 n_{sj} / m_j$ وزن درود در راستای محور j است، e بار الکترون، $\square$ ثابت کاهش یافته پلانک، η_e نرخ پراکندگی در فسفر سیاه، ω فرکانس زاویه ای نور ورودی، و m_1 و m_2 جرم مؤثر الکترون در صفحه در نزدیکی نقطه Γ در مدل همیلتون است که به صورت $m_1 = \hbar^2 / (2\gamma^2 / \Delta + \eta_e)$ و $m_2 = \hbar^2 / v_e$ محاسبه می شوند. چگالی الکترونیکی فسفر سیاه، n_s ، با ضخامت d به صورت زیر مشخص می شود:

$$n_s = \begin{pmatrix} n_{s1} & 0 \\ 0 & n_{s2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \frac{K_B T}{d \pi \hbar^2} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_f - E_c}{K_B T} \right) \right] \quad (1)$$

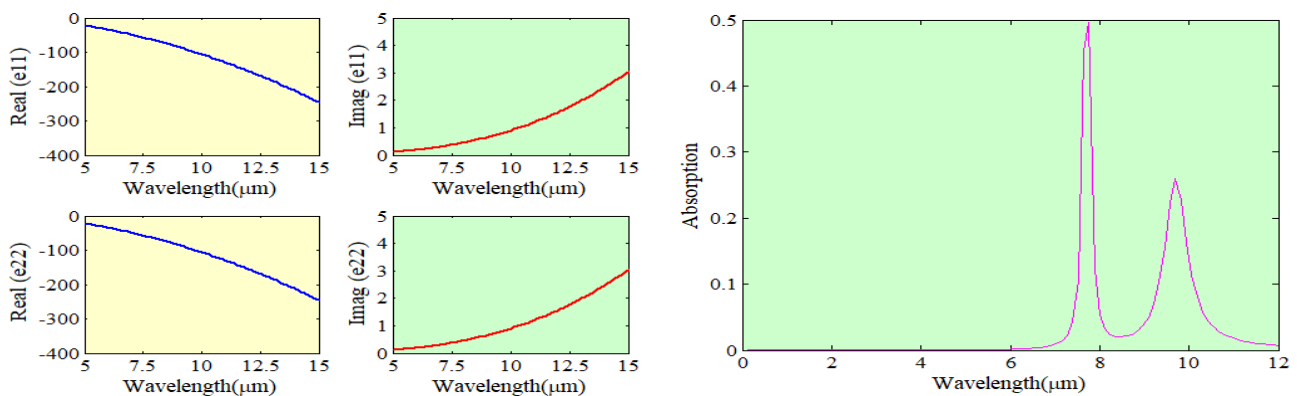


شکل ۱- (الف) نانو ساختار نانو پوسته فسفر سیاه بر روی بستر SiO₂، (ب) نمای جانبی از پوسته فسفر سیاه.

تانسور گذردهی الکتریکی نسبی معادل برای فسفر سیاه، به صورت $\epsilon_{jj} = \epsilon_r + \frac{i\sigma_{jj}}{\omega\epsilon_0 d} = \epsilon_r - \frac{e^2 n_{sj}}{\epsilon_0 m_j \omega(\omega + i\gamma_{bp})}$ بیان کرد. بازدهی در جذب طیف نور را می‌توان به صورت $A(\omega) = 1 - |t|^2 - |r|^2$ بیان کرد.

۳- نتایج شبیه‌سازی

در ادامه، برای محاسبه گذردهی الکتریکی نانو ساختار فسفر سیاه با استفاده از معادله بالا مقادیر پارامترها به شرح زیر است: شکاف باند مستقیم وابسته به ضخامت، Δ برابر 0.7 eV ، برای ضخامت $a = 0.233 \text{ nm}$ ، $d = 2 \text{ nm}$ ، $\gamma = 4a/\pi \text{ meV}$ ، $\eta_c = \hbar^2 / \gamma m_e$ ، $\eta_v = \hbar^2 / \gamma m_h$ ، $E_f - E_c = 0.6 \text{ eV}$ ، $E_g = 5.76 \text{ eV}$ ، $\epsilon_{\infty} = \epsilon_r = 5.76$ ، مقدار فرکانس برخورد γ_{bp} از مدل درود برای فسفر سیاه در محدوده طول موج فروسرخ تقریباً برابر است با $\gamma_{bp} = \eta_e / \hbar$. قسمت حقیقی و موهومی مؤلفه‌های گذردهی الکتریکی نسبی ϵ_{11} ، ϵ_{22} شکل (۲-الف) نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۲-الف) قسمت حقیقی مؤلفه‌های گذردهی الکتریکی در طول موج $5 \mu\text{m}$ مقدار بیشتری نسبت به طول موج $15 \mu\text{m}$ دارد. در مقابل قسمت موهومی مؤلفه‌های گذردهی الکتریکی روند معکوس قسمت حقیقی را در پیش می‌گیرند. برای بررسی خصوصیات نوری در آرایه مربعی، طیف جذب نور، با استفاده از نرم‌افزار متلب، شبیه‌سازی شده و نتایج آن در شکل (۲-ب) آورده شده است.



شکل ۲ - الف) قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی نسبی مؤلفه‌های ϵ_{11} و ϵ_{22} (ب) طیف جذب نانو ساختار فسفر سیاه

ساختار توری شکل می‌تواند میدان نوری موضعی موج اصلی و موج هارمونیک دوم را به دلیل تشدید پلاسمون سطحی تقویت کند. عملکرد تشدید پلاسمون سطحی فسفر سیاه در یک توری نانو پوسته فسفر سیاه در مقایسه با یک نانو پوسته تک فسفر سیاه افزایش پیدا کرده است.

در این مقاله ما یک نانو ساختار فسفر سیاه به منظور افزایش ضریب جذب در ناحیه فروسرخ در محدوده بین صفر تا $12 \mu\text{m}$ را پیشنهاد دادیم. در این ساختار، در طول موج $7/7 \mu\text{m}$ به میزان جذب 0.5 رسیدیم.

مراجع

1. J. R. Choi, K.W. Yong, J.Y. Choi, A. Nilghaz, Y. Lin, J. Xu, X. Lu, *Theranostics*, 1005–1026(2018).
2. Pal, S., et al. (2018). *Applied Physics A* 124(5): 394.
3. Kumar, A., Gupta, N., Tripathi, M. M., & Chaujar, R. (2019). *Microsystem Technologies*, 1-7.
4. Zhou, L., Liu, C., Sun, Z., Mao, H., Zhang, L., Yu, X., & Chen, X. (2019). *Biosensors and Bioelectronics*, 137, 140-147.