همایش نانوفوتونیک ایران ۱۳۹۹- ۱ و ۲ آبان
Iranian Nano-Photonic Conference 2020
October 23 and 24

# مدل‌سازی نانو ساختار جاذب مبتنی بر فسفر سیاه در محدوده طول موج‌های فروسرخ

**الهه حسینی[1,*]، علی میر[1]، علی فرمانی[1]**

[1] گروه الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، 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 ۵ µm تا ۱۵ µm محاسبه و نمودار جذب به دست آمده است. نتایج عددی به دست‌آمده، نشان می‌دهد بیشترین میزان جذب در طول موج‌های $\lambda_1$ =۷/۷ µm و $\lambda_2$ = ۹/۷ µm به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۲۶ به‌دست آمده است. نانوساختار پیشنهادی می‌تواند در جاذب‌های تنظیم‌پذیر در محدوده طول موج‌های 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 Mir[1] , Ali Farmani[1]**

[1]Department 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 µm to 15 µm was calculated and the absorption spectrum is obtained. The obtained numerical results show that maximum absorption is obtained at wavelengths $\lambda_1$ = 7.7 µm and $\lambda_2$ = 9.7 µm, 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



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13 ]

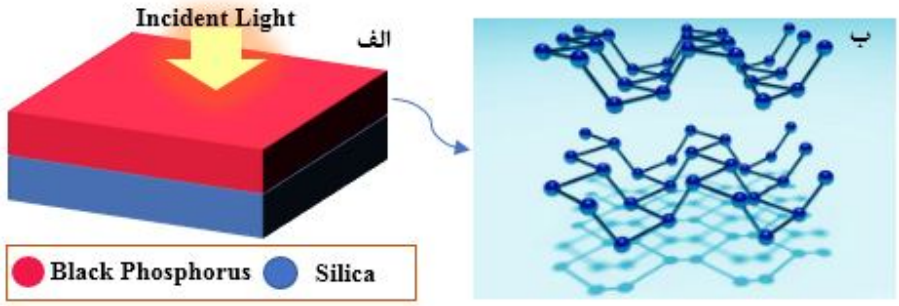
## ۱- مقدمه

در سال های اخیر با ظهور زمینه نسبتاً جدیدی در مبحث نور به نام پلاسمونیک، راه‌های زیادی برای کوچک‌سازی 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 نیم‌رسانای آرمانی برای کاربردهای مختلف مانند تبدیل فتو-الکتریکی کارآمد و انتشار فوق العاده نور قرار می‌دهد. با افزایش تعداد لایه‌ها، برهم‌کنش‌های داخل لایه‌ها مشخص می‌شود[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، $RIU^{-1}$ ۱۳/۶۲ بوده است[۲]. در سال بعد کومار و همکاران با ارائه زیست حسگر فسفرسیاه توانستند به حساسیت ۱/۷ دست یابند[۳]. در سال۲۰۱۹ 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 پوسته‌ای مبتنی بر فسفر سیاه، به صورت یک آرایه مربعی از فسفر سیاه به عنوان سلول اولیه با دوره تناوب P=۲۰۰ nm را نشان می‌دهد که در صفحه x-y تشکیل شده است. نانو پوسته فسفر سیاه دارای شکل مکعبی به ابعاد L×L×d است. پارامترهای پوسته فسفر سیاه دارای مقادیر L=۱۵۰ nm و d=۲ nm هستند. این امکان را می دهد تا برای تعریف گذردهی الکتریکی نسبی فسفر سیاه با ضخامت d یک تانسور قطری معادل $\varepsilon_D(\varepsilon_{33},\varepsilon_{22},\varepsilon_{11})$ تعریف شود. رسانایی فسفر سیاه چند لایه، از رابطه $\sigma_{jj}=\frac{iD_j}{\pi\left(\omega+\frac{i\eta_e}{\hbar}\right)}$ محاسبه می‌شود 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، □ ثابت کاهش یافته پلانک، $\eta_e$ نرخ پراکندگی در فسفر سیاه، $\omega$ فرکانس زاویه‌ای نور ورودی، و $m_1$ و $m_2$ جرم مؤثر الکترون در صفحه در نزدیکی نقطه $\Gamma$ در مدل همیلتون است که به صورت $m_1=\hbar^2/(2\gamma^2/\Delta+\eta_c)$ و $m_1=\hbar^2/v_c$ محاسبه می‌شوند. چگالی الکترونیکی فسفر سیاه، $n_s$، با ضخامت d به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$n_s=\begin{pmatrix} n_{s1} & 0 \\ 0 & n_{s2}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2\end{pmatrix}\frac{K_BT}{d\pi\hbar^2}\ln\left[1+\exp\left(\frac{E_f-E_c}{K_BT}\right)\right] \quad (۱)$$




**شکل ۱**- (الف) نانو ساختار نانو پوسته فسفر سیاه بر روی بستر $SiO_2$، (ب) نمای جانبی از پوسته فسفر سیاه.



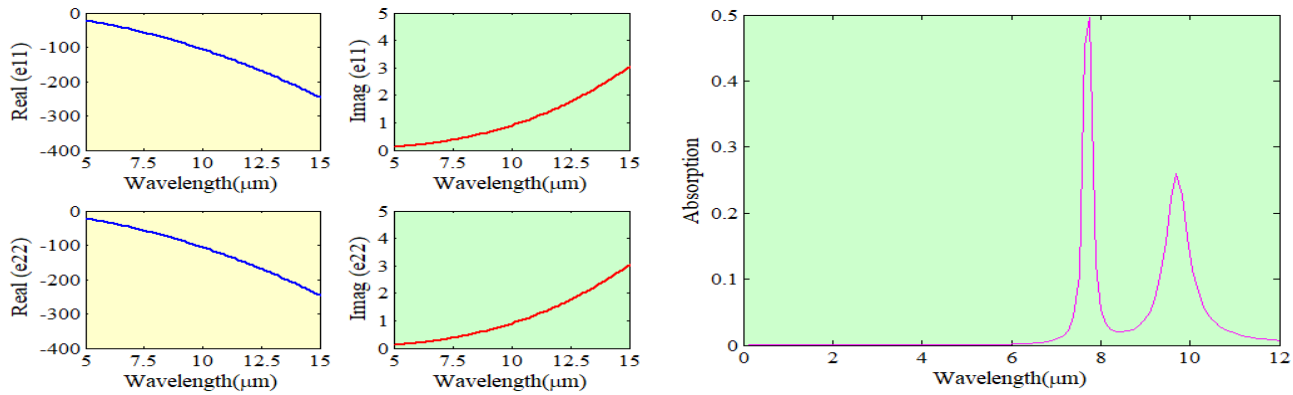
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13 ]

تانسور گذردهی الکتریکی نسبی معادل برای فسفر سیاه، به صورت $\varepsilon_{jj} = \varepsilon_r + \frac{i\sigma_{jj}}{\varepsilon_0 \omega d} = \varepsilon_r - \frac{e^2 n_{sj}}{\varepsilon_0 m_j} \frac{1}{\omega(\omega + i\gamma_{bp})}$ حساب شود. میزان 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، $\Delta$ برابر ۰/۷ eV برای ضخامت $d$=۲ nm، $a$=۰/۲۳۳ nm، $\gamma = 4a/\pi$ meV، $\eta_c = \hbar^2/0.4m_0$، $v_c = \hbar/0.7m_0$، $\eta_e = 10^{-3}$ eV، $E_f - E_c = 0.6$ eV، $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_r = 5.760$، مقدار فرکانس برخورد $\gamma_{bp}$ 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 $\varepsilon_{11}$، $\varepsilon_{22}$ شکل (۲- الف) نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۲- الف) قسمت حقیقی مؤلفه‌های گذردهی الکتریکی در طول موج $\mu m$ ۵ مقدار بیشتری نسبت به طول موج $\mu m$ ۱۵ 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 مولفه های e11 و e22، 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 ۱۲ µm را پیشنهاد دادیم. در این ساختار، در طول موج ۷/۷ µm = $\lambda$ به میزان جذب ۰/۵ 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.



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13 ]