

# 激光与光电子学进展

## 黑磷/介质多层结构包覆的可调谐波导

徐海林\*

深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518061

**摘要** 从理论上提出了一种由黑磷/介质多层结构包覆的等离子体波导。利用 MATLAB 数值求解该波导的色散方程, 进而仿真出波导的有效折射率、传播长度、趋肤深度及品质因数等性能参数曲线。由仿真曲线可知, 波导的性能与黑磷/介质多层结构中的电子掺杂率正相关, 与单元层中介质层厚度负相关。与同类型金属/介质多层结构波导的性能比较后可知, 黑磷/介质多层结构波导在中红外及远红外波段具更大的传播长度、更小的趋肤深度及更大的品质因数。该波导可调谐且性能优良。

**关键词** 材料; 波导; 黑磷/介质多层结构; 可调谐性; 电子掺杂率; 有效介电常数

中图分类号 O441.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2316005

## Tunable Plasma Waveguides Cladded by Black Phosphorus/Dielectric Multilayer Structures

Xu Hailin\*

College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University,  
Shenzhen, Guangdong 518061, China

**Abstract** In this study, a plasma waveguide cladded by black phosphorus/dielectric multilayer structures was theoretically proposed. By numerically solving the dispersion equation with MATLAB, the performance curves of the effective refractive index, propagation length, penetration depth, and figures of merit of the waveguide could be simulated. According to the simulation curves, the performances of the waveguide positively and negatively correlated with the electron doping rate of the black phosphorus/dielectric multilayer structure and the dielectric thickness in the element layer. Compared with the same type of metal/medium multilayer structures waveguide, the black phosphorus/dielectric multilayer structures waveguide has a larger propagation length, a smaller propagation depth and a larger figures of merit in the mid-infrared and far-infrared bands. The waveguide is tunable and has excellent performance.

**Key words** materials; waveguides; black phosphorus/dielectric multilayer structures; tunability; electron doping rate; effective permittivity

**OCIS codes** 230.7370; 160.1190; 160.3918

### 1 引言

二维黑磷(BP), 类石墨烯材料, 可以通过机械剥离或等离子体稀释等方式得到<sup>[1]</sup>, 具有高载流子

迁移率、低损耗和灵活的可调谐性等优势<sup>[2-4]</sup>。近期, Xiao 等<sup>[5]</sup>提出了可调谐黑磷/介质多层结构(属于双曲超材料); 他们发现, 在中红外和远红外波段, 黑磷具有负介电常数的金属特性<sup>[6-10]</sup>, 可代替金属/介质

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-06-26; 录用日期: 2021-07-09

通信作者: \*xuhailin@szu.edu.cn

多层结构中的金属,提供具有负介电常数的电感层;他们利用有效介质理论拟合了各向异性材料的有效介电常数,为光学器件的设计提供了数据基础。

等离子体波导(PWGs)作为亚波长尺寸的电路元件,对表面等离子体极化具有强局域性<sup>[11-15]</sup>。近年来,为了使波导在性能上有所突破,人们提出了一种由金属/介质多层结构包覆的新型等离子体波导。该结构与传统的等离子体波导相比,在传播长度、局域性等方面都有所增强。然而,金属的高损耗性导致波导的性能受到了一定影响,例如趋肤深度变大。为了克服金属的高损耗性,同时保证在亚波长尺寸激发等离子体,本课题组提出了用黑磷/介质多层结构代替金属/介质多层结构的等离子体波导,该波导为三层平板结构。与金属/介质多层结构等离子体波导相比,黑磷/介质多层结构等离子体波导克服了金属的高损耗性,且具有可调节性、传播长度更长、品质因数更大等优势。黑磷/介质多层结构能够代替金属材料为器件提供更好的性能,在等离子体器件中具有极大的应用潜力。

## 2 理论模型与方法

### 2.1 黑磷/介质多层结构的介电常数

本文提出的黑磷/介质多层结构等离子体波导的原理图如图 1 所示,中间层是介电常数为  $\epsilon_c = 2.25$  的二氧化硅介质,其厚度为  $2d_c = 100 \text{ nm}$  ( $d_c$  代表中间层厚度的一半),上下层为黑磷/介质多层结构。黑磷/介质多层结构由二维黑磷和介质(介电常数为 2)组成的单元层堆叠而成,该结构由 Xiao 等<sup>[5]</sup>提出。

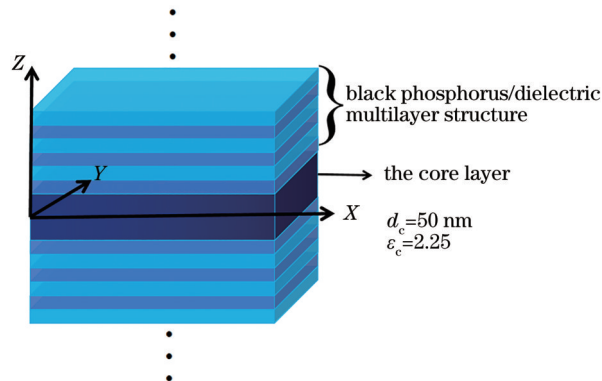


图 1 黑磷/介质多层结构等离子体波导的原理图(上下层为黑磷/介质多层结构,中间层为介质)

Fig. 1 Schematic of plasma waveguides cladded by black phosphorus/dielectric multilayer structures (the clad layer is black phosphorus/dielectric multilayer structures, and the core layer is the dielectric)

黑磷具有显著的平面内电子色散各向异性及方向依赖的导电性,因此,在中红外及远红外波段,黑磷的表面电导率可以用经典的 Drude 模型表示<sup>[16-17]</sup>,即

$$\sigma_{jj} = \frac{iD_j}{\pi \left( \omega + \frac{i\eta}{\hbar} \right)}, j = x, y, \quad (1)$$

式中:  $j = x, y$ , 代表  $x$  方向和  $y$  方向;  $D_j$  表示 Drude 重量;  $i$  为虚数单位;  $\omega$  为入射电磁波的频率;  $\eta$  为电子弛豫速率,  $\eta = 10 \text{ meV}$ ;  $\hbar$  为普朗克常数。(1)式中的 Drude 重量  $D_j$  可以表示为

$$D_j = \frac{\pi e^2 n}{m_{cj}}, j = x, y, \quad (2)$$

式中:  $e$  为电子电荷;  $n$  代表电子掺杂率;  $m_{cx}$  和  $m_{cy}$  分别是平面内电子沿  $x$  方向和  $y$  方向的有效质量<sup>[2]</sup>,  $m_{cx} = 0.15 m_0$ ,  $m_{cy} = 0.7 m_0$ ,  $m_0$  表示电子的静止质量。因此,  $x, y, z$  方向上黑磷的有效介电常数为

$$\epsilon_{jj} = \epsilon_r + \frac{i\sigma_{jj}}{\epsilon_0 \omega t_{BP}}, j = x, y, z, \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_r$  是黑磷的相对介电常数,  $\epsilon_r = 5.76$ ;  $\epsilon_0$  是真空介电常数;  $t_{BP}$  表示黑磷/介质多层结构中黑磷的厚度。

黑磷/介质多层结构可以看作是一种均匀的有效介质,适用于有效介质理论。沿  $x, y, z$  方向的有效介电常数可以近似地表示为<sup>[18]</sup>

$$\epsilon_{jj}^{\text{eff}} = \frac{\epsilon_{jj} t_{BP} + \epsilon_d t_d}{t_{BP} + t_d}, j = x, y, \quad (4)$$

$$\epsilon_{jj}^{\text{eff}} = \frac{\epsilon_{jj} \epsilon_d (t_{BP} + t_d)}{t_{BP} \epsilon_d + t_d \epsilon_{BP}}, j = z, \quad (5)$$

式中:  $t_d$  表示黑磷/介质多层结构中介质层的厚度。

根据(4)~(5)式可以绘制出中红外及远红外波段黑磷/介质多层结构有效介电常数实部和虚部在三个方向的分量,如图 2(a)和图 2(b)所示,其中电子掺杂率为  $n = 7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ <sup>[19-20]</sup>,黑磷的厚度  $t_{BP} = 4.5 \text{ nm}$ ,黑磷/介质多层结构中介质的厚度  $t_d = 30 \text{ nm}$ 。通过图 2 可知,有效介电常数实部  $\epsilon_{xx}^{\text{eff}} < 0$ ,  $\epsilon_{yy}^{\text{eff}} < 0$ ,  $\epsilon_{zz}^{\text{eff}} > 0$ ,满足黑磷/介质多层结构介电常数各向异性的性质,保证了黑磷/介质多层结构中等离子体的传播。

由文献[5]可知通过改变黑磷/介质多层结构中的材料特性和几何参数可以灵活地调控黑磷/介质多层结构的介电常数。由(1)~(5)式可知,电子掺杂率  $n$  直接决定了黑磷的表面电导率,进而影响介电常数的大小。图 3(a)给出了电子掺杂率  $n$  从  $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  变化至  $10 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  时,黑磷/介质多层结构  $x$  方向有效介电常数  $\epsilon_{xx}^{\text{eff}}$  的实部随波长变

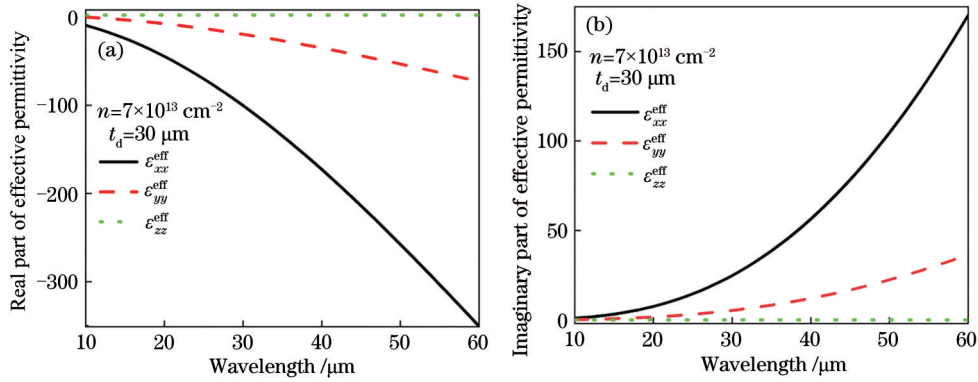


图 2 黑磷/介质多层结构有效介电常数沿  $x, y, z$  三个方向的分量。(a)实部的分量;(b)虚部的分量

Fig. 2 Components of effective permittivity in  $x, y,$  and  $z$  directions of black phosphorus/dielectric multilayer structures.

(a) Components of the real part; (b) component of the imaginary part

化的曲线图,可以看出,电子掺杂率越高,有效介电常数  $x$  方向的分量越大。这说明黑磷/介质多层结构介电常数的绝对值正向依赖于电子掺杂率。由图 3(b)可以看出,改变黑磷/介质单元层中介质层的厚度,使  $t_d$  从 10 nm 变化至 50 nm,  $x$  方向有效介

电常数实部的绝对值逐渐增大。这说明黑磷/介质多层结构介电常数的绝对值正向依赖于黑磷/介质单元层中介质的厚度。因此,黑磷/介质多层结构的介电常数可以通过改变电子掺杂率和黑磷/介质单元层中介质层的厚度进行灵活调控。

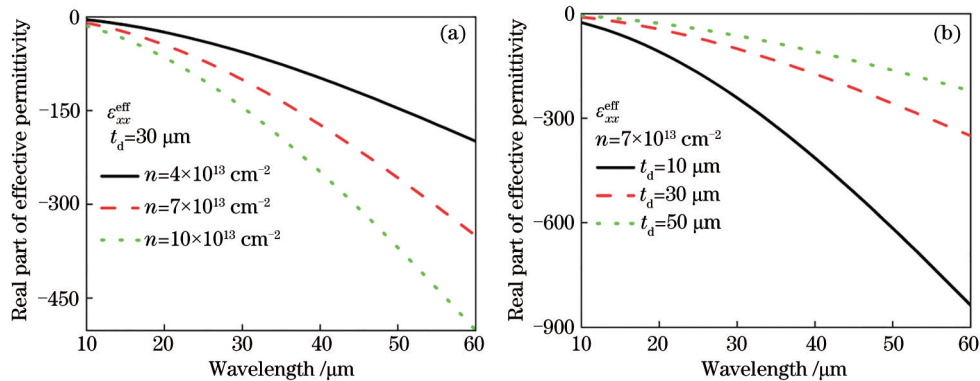


图 3 在不同的电子掺杂率和介质层厚度下,黑磷/介质多层结构  $x$  方向有效介电常数实部随波长的变化。

(a)不同电子掺杂率下;(b)不同介质层厚度下

Fig. 3 Real part of effective permittivity in  $x$  direction of black phosphorus/dielectric multilayer structures varied with the wavelength at different electron doping rates and the dielectric thicknesses of element layer. (a) At different electron doping rates; (b) at different dielectric thicknesses of element layer

## 2.2 波导理论

本文主要讨论图 1 所示的等离子体波导中 TM 极化下电磁波的传播情况,该模式下的电场矢量可以表示为  $\mathbf{E} = (\vec{E}_x, 0, \vec{E}_z)\exp(ik_x z)$ , 磁场矢量可以表示为  $\mathbf{H} = (0, \vec{H}_y)\exp(ik_x z)$ , 这里  $k_x$  是传播常数。在 TM 模式中,  $y$  方向的磁场分布可以通过麦克斯韦方程及边界条件得到,具体形式为

$$\begin{cases} H_{1y} = A \exp[-\alpha_{BP}(z-L)], & z > d_c \\ H_{2y} = C \exp(\alpha_c z) + D \exp(\alpha_c z), & -d_c \leq z \leq d_c, (6) \\ H_{3y} = B \exp[-\alpha_{BP}(z+L)], & z < -d_c \end{cases}$$

式中:  $H_{1y}, H_{3y}$  表示波导中上下层黑磷/介质多层结构  $y$  方向的磁场;  $H_{2y}$  为波导中间层  $y$  方向的磁场;  $A, B, C, D$  为任意实数;  $\alpha_c$  和  $\alpha_{BP}$  分别是中间层和黑磷/介质多层结构波矢的大小,  $\alpha_c = \sqrt{k_x^2 - \epsilon_c k_0^2}$ ,  $\alpha_{BP} = \sqrt{(\epsilon_{xx}^{\text{eff}}/\epsilon_{zz}^{\text{eff}})k_x^2 - \epsilon_{xx}^{\text{eff}}k_0^2}$ ,  $k_0$  是真空中波矢的大小。通过(6)式可以计算出波导中的磁场分布。需要借助色散方程求解波导的传播常数, TM 极化下波导的色散关系为<sup>[21]</sup>

$$\tanh(2\alpha_c d_c) = -\frac{2}{\alpha_{BP}\epsilon_c / (\alpha_c \epsilon_{xx}^{\text{eff}}) + \alpha_c \epsilon_{xx}^{\text{eff}} / (\alpha_{BP}\epsilon_c)} \quad (7)$$

无法通过色散方程直接得到  $k_x$  的解析解, 因此

利用 MATLAB 求解出传播常数  $k_x$  的数值解, 进而模拟出中红外波段下黑磷/介质多层结构波导的性能曲线。本研究团队通过模拟得到了黑磷/介质多层结构波导的有效折射率、传播长度、趋肤深度及品质因数(FoM)。有效折射率被认为是波导包覆层与芯层折射率的加权平均值, 其计算公式为  $n_{\text{eff}} = \text{Re}(k_x)/k_0$  [22-23], 其中  $\text{Re}$  表示取实部(传播常数的虚部被认为是电磁波能量的损耗部分)。有效折射率对表征光波导的传输性能具有至关重要的作用, 波导的数值孔径、剖面色散等性能表征参数可以通过有效折射率得到。在实际应用中, 可以通过数值模拟和实际测量得到有效折射率, 进而确定波导的性能。传播长度表示电磁波在波导中的传输距离, 其计算公式为  $L = \text{Im}(2k_x)^{-1}$ ,  $\text{Im}$  表示取虚部。本文用趋肤深度表示电磁波在黑磷/介质多层结构中的传播深度 [24], 计算公式为  $\delta = \text{Re}(\alpha_{\text{BP}})^{-1}$ 。品质因数表征波导的传输质量, 由 Pierre Berini 提出, 其定义为传播长度与趋肤深度的比值, 计算公式为  $a_{\text{FoM}} =$

$L/D'$ , 其中  $D' = 2(\delta + d_c)$  表示模式尺寸 [25]。在波导中, 传播长度越长, 趋肤深度越小, 表示电磁波在波导中的传输距离越长且局域性越强, 同时品质因数数值也越大, 波导性能也就越好。

### 3 结果与讨论

利用 MATLAB 求解黑磷/介质多层结构波导色散方程中的传播常数  $k_x$ , 并利用性能公式仿真波导的性能曲线。当  $t_d = 30 \text{ nm}$  时, 黑磷/介质多层结构波导在中红外及远红外波段(10~60  $\mu\text{m}$ ) 的有效折射率、传播长度、趋肤深度和品质因数曲线如图 4(a)~(d) 所示。随着电子掺杂率  $n$  从  $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  变化至  $10 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 黑磷/介质多层结构波导的传播长度逐渐变大, 趋肤深度逐渐减小, 进而品质因数逐渐变大, 波导性能越来越好。这说明波导性能与黑磷中的电子掺杂率正相关, 电子掺杂率越大, 波导的性能越好, 波导传播和储存电磁波的能力也就越强。

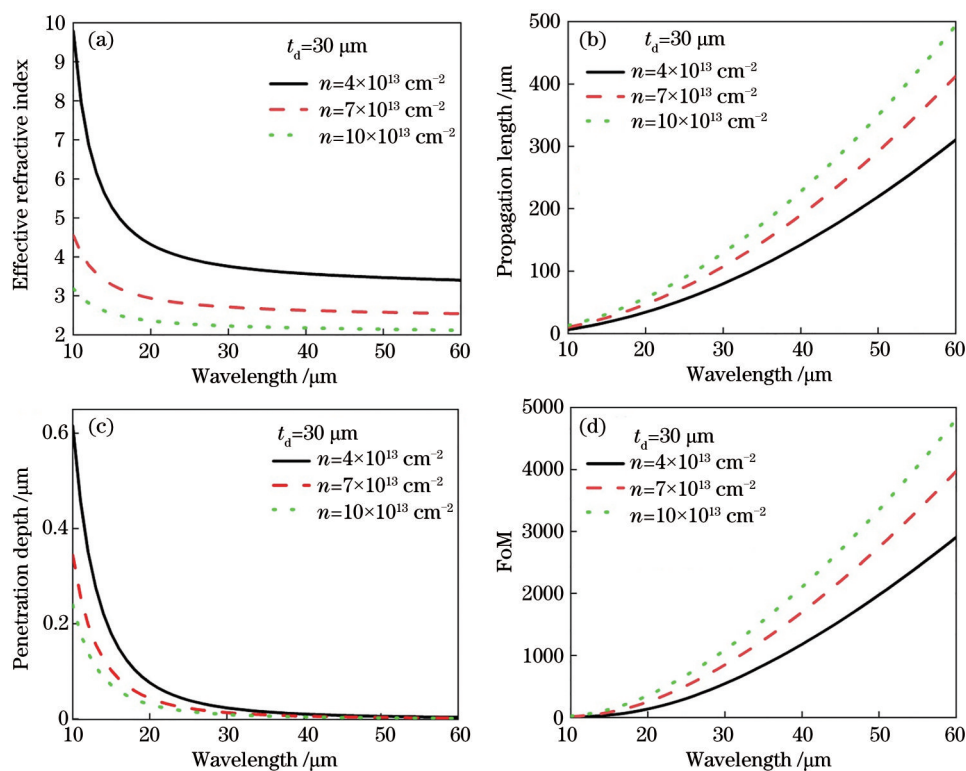


图4 不同电子掺杂率下黑磷/介质多层结构等离子体波导的性能随波长的变化。(a)有效折射率;(b)传播长度;(c)趋肤深度;(d)品质因数

Fig. 4 Variations of performance of black phosphorus/dielectric multilayer structures plasma waveguides with wavelength at different electron doping rates. (a) Effective refractive index; (b) propagation length; (c) penetration depth; (d) figure of merit (FoM)

当电子掺杂率为  $7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  时, 黑磷/介质多层结构波导在中红外及远红外波段(10~60  $\mu\text{m}$ ) 的

有效折射率、传播长度、趋肤深度和品质因数曲线如图 5(a)~(d) 所示。随着黑磷/介质多层结构中



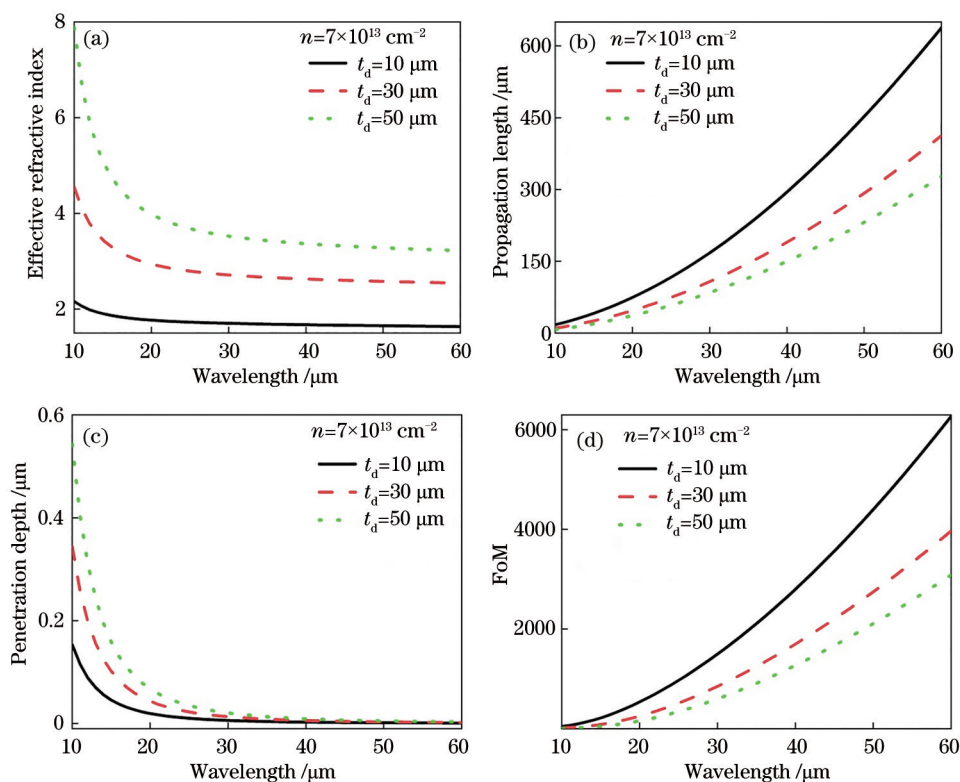


图5 不同介质层厚度下黑磷/介质多层结构等离子体波导的性能随波长的变化。(a)有效折射率;(b)传播长度;(c)趋肤深度;(d)品质因数

Fig. 5 Variations of performance of black phosphorus/dielectric multilayer structures plasma waveguides with wavelength at different dielectric thicknesses. (a) Effective refractive index; (b) propagation length; (c) penetration depth; (d) figure of merit

质层厚度  $t_d$  从 50 nm 减小至 10 nm, 黑磷/介质多层结构波导的传播长度逐渐变大, 而趋肤深度逐渐减小, 进而品质因数逐渐变大, 波导性能越来越好。这说明波导性能与黑磷/介质多层结构中的介质层厚度负相关, 介质层厚度越小, 波导的性能越好, 波导传播和储存电磁波的能力就越强。

综上所述, 在制备等离子体波导时可以适当减小黑磷/介质多层结构中介质层的厚度, 提高电子掺杂率, 这样会更利于等离子体在波导中的传播。在实验室制备该波导时, 需要注意黑磷的氧化<sup>[26]</sup>。目前, 解决黑磷易氧化问题多采用的方法是在其表面形成保护膜, 如  $\text{AlO}_x$  膜等<sup>[27]</sup>。

为进一步探讨波导中电磁波的局域性及传播情况, 基于(6)式仿真得出了波导在  $y$  方向的磁场分布曲线图, 如图6所示。对磁场进行归一化处理后可以观察到电磁波能量大部分集中在波导的中间层, 在上下层迅速衰减, 且随着黑磷/介质多层结构中介质层厚度的减小, 衰减越发明显。图6说明随着黑磷/介质多层结构中介质层厚度的减小, 波导的局域性越强, 能量越来越集中。结合图5、6可知,

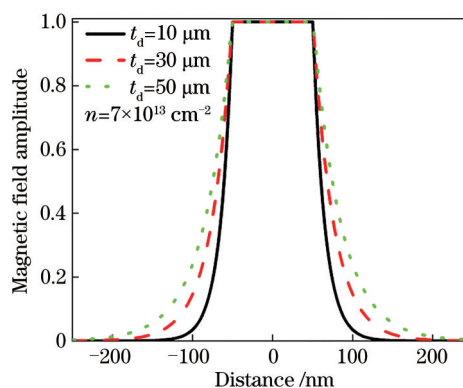


图6 波导磁场振幅沿  $y$  方向的分布

Fig. 6 Distribution of magnetic field amplitude along  $y$  direction

通过减小黑磷/介质多层结构中介质层的厚度可以改善电磁波在波导中的传播长度及局域性, 提高波导的性能。

在波长 20  $\mu\text{m}$  处, 将本文的黑磷/介质多层结构波导与同类型金属/介质多层结构波导<sup>[21]</sup>的有效折射率、传播长度、趋肤深度、品质因数进行比较, 结果如表1所示, 其中金属/介质多层结构波导中心层的介电常数为 2.25, 厚度  $2d_c = 100$  nm。与金属/介

表 1 两种等离子体波导有效折射率、传播长度、趋肤深度和品质因数的比较

Table 1 Comparison of effective index, propagation length, penetration depth, and figure of merit of two plasma waveguides

Types of PWGs	Effective index	Propagation length / $\mu\text{m}$	Penetration depth / $\mu\text{m}$	FoM
Metal/dielectric multilayer structures PWGs	1.4–1.5	10–20	5–10	40–100
Black phosphorus/dielectric multilayer structures PWGs	2–4	20–60	0.05–0.07	150–500

质多层结构波导相比,黑磷/介质多层结构波导的趋肤深度的数量级为  $10^{-2}$ , 能量损耗更小, 且具有更长的传播长度及更大的品质因数。综上, 黑磷/介质多层结构波导能够克服金属/介质多层结构波导中金属的高损耗性, 具有可调谐性、传播长度更长、品质因数更大等性能优势。

## 4 结 论

本文提出了黑磷/介质多层结构等离子体波导, 对该波导在中红外及远红外波段的有效折射率、传播长度、趋肤深度、品质因数等性能参数进行了仿真, 并将仿真结果与同类型金属/介质多层结构波导<sup>[21]</sup>的性能参数进行了比较。结果表明, 黑磷/介质多层结构等离子体波导的性能曲线与黑磷/介质多层结构中的电子掺杂率正相关, 与单元层中的介质层厚度负相关。与同类型金属/介质多层结构等离子体波导相比, 黑磷/介质多层结构等离子体波导克服了金属的高损耗性, 具有可调谐、传播长度更长、品质因数更大等优势。黑磷/介质多层结构在等离子体器件中的应用具有极大潜力。

## 参 考 文 献

- [1] Yu X H, Du K X, Yang P Z. Preparation of low-dimensional black phosphorus and its application in solar cells[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 140001.  
余夏辉, 杜凯翔, 杨培志. 低维黑磷制备及其在太阳能电池中的应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(14): 140001.
- [2] Low T, Rodin A S, Carvalho A, et al. Tunable optical properties of multilayer black phosphorus thin films[J]. *Physical Review B*, 2014, 90(7): 075434.
- [3] Ling X, Wang H, Huang S X, et al. The renaissance of black phosphorus[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(15): 4523-4530.
- [4] Liu X F, Lu W, Zhou X Y, et al. Dynamical anisotropic response of black phosphorus under magnetic field[J]. *2D Materials*, 2018, 5(2): 025010.
- [5] Xiao S Y, Liu T T, Cheng L, et al. Tunable anisotropic absorption in hyperbolic metamaterials based on black phosphorous/dielectric multilayer structures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3290-3297.
- [6] Low T, Roldán R, Wang H, et al. Plasmons and screening in monolayer and multilayer black phosphorus [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(10): 106802.
- [7] Gonçalves P A D, Xiao S S, Peres N M R, et al. Hybridized plasmons in 2D nanoslits: from graphene to anisotropic 2D materials[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(12): 3045-3054.
- [8] Lu H, Gong Y K, Mao D, et al. Strong plasmonic confinement and optical force in phosphorene pairs [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5255-5263.
- [9] Nong J P, Wei W, Wang W, et al. Strong coherent coupling between graphene surface plasmons and anisotropic black phosphorus localized surface plasmons[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1633-1644.
- [10] Qing Y M, Ma H F, Cui T J. Tailoring anisotropic perfect absorption in monolayer black phosphorus by critical coupling at terahertz frequencies[J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 32442-32450.
- [11] Guan X W, Wu H, Shi Y C, et al. Ultracompact and broadband polarization beam splitter utilizing the evanescent coupling between a hybrid plasmonic waveguide and a silicon nanowire[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3005-3008.
- [12] Gao L F, Tang L X, Hu F F, et al. Active metal strip hybrid plasmonic waveguide with low critical material gain[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11487-11495.
- [13] Zhu D W, Zeng R M, Tang Z T, et al. Design of multiband filter based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 172401.  
朱登玮, 曾瑞敏, 唐泽恬, 等. 基于人工表面等离子体激元的多频带滤波器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 172401.
- [14] Yang H Y, Chen Y P, Xiao G L, et al. MIM tunable plasmonic filter embedded with symmetrical sector metal resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020,

- 40(11): 1124001.  
杨宏艳, 陈昱澎, 肖功利, 等. 内嵌对称扇形金属谐振腔的 MIM 可调谐等离子体滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1124001.
- [15] Li G M, Li Z Y, Li Z R, et al. High-sensitivity optical-fiber microfluidic chip based on surface plasmon resonance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0106002.  
李钢敏, 李致远, 李正冉, 等. 基于表面等离子体共振的高灵敏度光纤微流控芯片[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0106002.
- [16] Liu Z Z, Aydin K. Localized surface plasmons in nanostructured monolayer black phosphorus[J]. Nano Letters, 2016, 16(6): 3457-3462.
- [17] Xiong F, Zhang J F, Zhu Z H, et al. Strong anisotropic perfect absorption in monolayer black phosphorous and its application as tunable polarizer [J]. Journal of Optics, 2017, 19(7): 075002.
- [18] Agranovich V M, Kravtsov V E. Notes on crystal optics of superlattices[J]. Solid State Communications, 1985, 55(1): 85-90.
- [19] Liu T T, Jiang X Y, Zhou C B, et al. Black phosphorus-based anisotropic absorption structure in the mid-infrared[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27618-27627.
- [20] Dong D X, Liu Y W, Fei Y, et al. Designing a nearly perfect infrared absorber in monolayer black phosphorus[J]. Applied Optics, 2019, 58(14): 3862-3869.
- [21] Ishii S, Shalaginov M Y, Babicheva V E, et al. Plasmonic waveguides clad by hyperbolic metamaterials[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4663-4666.
- [22] Xu G D, Pan T, Zang T C, et al. Characteristics of guided waves in indefinite-medium waveguides[J]. Optics Communications, 2008, 281(10): 2819-2825.
- [23] Lyashko E I, Maimistov A I. Guided waves in asymmetric hyperbolic slab waveguides: the TM mode case[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(11): 2320-2330.
- [24] Yan M, Thylén L, Qiu M. Layered metal-dielectric waveguide: subwavelength guidance, leveraged modulation sensitivity in mode index, and reversed mode ordering[J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3818-3824.
- [25] Liu Y M, Bartal G, Zhang X. All-angle negative refraction and imaging in a bulk medium made of metallic nanowires in the visible region[J]. Optics Express, 2008, 16(20): 15439-15448.
- [26] Luo M M, Fan T J, Zhou Y, et al. 2D black phosphorus-based biomedical applications[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(13): 1808306.
- [27] Wood J D, Wells S A, Jariwala D, et al. Effective passivation of exfoliated black phosphorus transistors against ambient degradation[J]. Nano Letters, 2014, 14(12): 6964-6970.