

文章编号: 1001-3806(2015)01-0028-05

1 维石墨烯光子晶体的电磁吸收特性

宁仁霞^{1,2}, 刘少斌², 章海锋², 孔祥鲲², 卞博锐²

(1. 黄山学院 机电与信息工程学院, 黄山 245041; 2. 南京航空航天大学 电子信息工程学院 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京 210016)

摘要: 为了研究1维石墨烯光子晶体在可见光波段的吸收特性,采用传输矩阵的方法进行了理论分析和数值仿真,得到了1维石墨烯吸收特性与石墨烯层数、缺陷层介质厚度、电磁波模式有关的结果。结果表明,增加石墨烯层数时,对波长为556nm左右的绿光的吸收作用明显增强;缺陷层介质厚度增加时会引起吸收峰的增加;在TE模式下,入射角对石墨烯光子晶体吸收特性影响较小。该研究结果为1维石墨烯光子晶体吸收器的设计提供了理论依据。

关键词: 光电子学;吸收特性;传输矩阵法;石墨烯光子晶体

中图分类号: O734 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.01.006

Electromagnetic absorption characteristics of 1-D graphene photonic crystals

NING Renxia^{1,2}, LIU Shaobin², ZHANG Haifeng², KONG Xiangkun², BIAN Borui²

(1. College of Mechanical and Information Engineering, Huangshan University, Huangshan 245041, China; 2. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics of Ministry of Education, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the absorption characteristics of 1-D graphene photonic crystal in the visible band, theoretical analysis and numerical simulation were conducted by using transfer matrix method. The dependence of absorption characteristics of 1-D graphene on graphene layers, dielectric thickness of defect layers, and electromagnetic mode were obtained. The results show that the absorption with green light of wavelength of about 556nm is enhanced significantly with the increasing of the layers of graphene. The absorption peak will increase with the increasing of dielectric thickness of defect layer. In the TE mode, the angle of incidence has a little effect on the absorption characteristics of graphene photonic crystal. The results provide the theoretical basis for the study of 1-D graphene photonic crystal absorbers.

Key words: optoelectronics; absorption characteristics; transfer matrix method; graphene photonic crystal

引言

光子晶体的研究已经持续了20多年^[1-2],目前

依然是研究的热点问题之一^[3-5]。光子晶体是由介质材料按周期结构排列的一种人工材料,某些频段的电磁波因为其周期性结构产生的散射效应而无法传播,产生了光子带隙(photonic band gap, PBG)。近年来关于光子晶体的研究成果非常丰富^[6-8],研究的重点已逐步向色散介质光子晶体方向转移。HO-JO等人^[9]和LI^[10]首次提出等离子体光子晶体的概念。LIU等人^[6]利用时域有限差分方法重点研究了等离子体光子晶体(plasma photonic crystal, PPC)的带隙、缺陷模等特性,得到PPCs具有高通滤波特性。WANG等人^[7]研究了在含有单负材料光子晶体中,全向带隙的产生是由于倏逝波相互作用的结果。ZHANG等人^[8]研究了电磁波在3维色散光子晶体中的传播特性,研究表明通过改变等离子体频

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61307052);航空科学基金资助项目(20121852030);江苏省自然科学基金资助项目(BK2011727);黄山学院科研资助项目(2010xkj006);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ13-0166);安徽省教育厅自然科学基金资助项目(KJ2013B267);大学生创新创业训练计划资助项目(201210375030)

作者简介:宁仁霞(1978-),女,讲师,主要从事等离子体光子晶体、石墨烯光子晶体电磁特性研究。

E-mail: nrxxiner@hsu.edu.cn

收稿日期:2014-02-16;收到修改稿日期:2014-02-24

率、填充率及相对介电常数等参量调谐 PBG。KONG 等人^[11]对等离子体光子晶体的截止频率展开了研究。

石墨烯作为一种具有蜂窝状2维晶体结构半金属材料,其特殊的特性很快被人们所关注^[12-14]。研究结果显示,单层石墨烯对可见光的吸收率为2.3%,石墨烯层数对吸收率有明显的影响^[13]。BONACCORSO 等人^[14]详细分析了石墨烯的特性,提出了在透光导体、光伏器件等方面的应用。FURCHI^[15]和 FERRIERIA 等人^[16]分别利用石墨烯作为缺陷层设计了 Fabry-Perot 微谐振腔,吸收率可达90%以上。AREFINIA^[17]利用传输矩阵法研究了基于光子晶体的1维石墨烯在太赫兹波段的色散曲线和带隙特性,并分析了含有 ZnS 缺陷模的带隙特性,结果表明,缺陷厚度可调谐缺陷模的位置及宽度。VINCENTI 等人^[18]研究了1维光子晶体中引入单层石墨烯缺陷,结果显示,增加石墨烯可产生完美的窄带吸收效应,在抽运频率的激励下吸收率的非线性变化。LIU 等人^[19]研究了含有石墨烯的1维光子晶体的吸收率随石墨烯层数、电磁波模式及入射角的变化情况,从理论上得出吸收率受人射角、衬底厚度等参量调谐。以上研究结果表明,石墨烯光子晶体在光电设备、太阳能电池、发光设备等方面有十分强大的潜在应用。

本文中利用传输矩阵法研究了1维石墨烯光子晶体在可见光波段的吸收特性,探讨了当增加石墨烯厚度时,对一定波长的光,其吸收率的变化;分析了缺陷模的厚度对吸收峰的影响;分析了入射光角度对其吸收特性的影响。

1 1维石墨烯光子晶体理论依据及建模

本文中在理想情况下讨论可见光波段1维石墨烯光子晶体,分析了其结构变化引起的吸收特性变化,当入射角发生变化时吸收特性,以及电磁波模式对吸收特性影响。

1.1 计算方法

1维光子晶体由于结构简单,常用传输矩阵法得到解析解,本文中利用传输矩阵法的理论,根据透射率 T 、反射率 R 的计算公式^[20],通过下式来计算吸收率 A :

$$A = 1 - R - T \quad (1)$$

1.2 介质层介电常数

本文中设计的1维石墨烯光子晶体选用石墨烯、锆酸钡(barium zirconate, BaZrO₃)和金属钛(tita-

nium, Ti)组成。

首先分析石墨烯的介电常数模型。参考文献[21]中通过理论分析以及实验对比给出了石墨烯在可见光波段的折射率 n_g ,表示为:

$$n_g = n + iC_1\lambda/n \quad (2)$$

式中, λ 为入射电磁波波长, C_1 为系数,取值为 $5.446\mu\text{m}^{-1}$, n 为石墨烯折射率实部,取3.0。

BaZrO₃ 是一种高介电常数的新型陶瓷,具有耐高温等特殊的性质^[20],常应用于电容器等^[22-24]的制备中。本文中利用其高介电常数的特性,设计的1维石墨烯光子晶体在 TE 模式下,角度对缺陷模的影响会比较小。其介电常数的选择见参考文献[25]。

Ti 在光波段的介电常数 ϵ_i 采用杜德(Drude)模型,表示如下^[26-27]:

$$\epsilon_i = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\gamma\omega) \quad (3)$$

式中, $\omega_p = \sqrt{N_e e^2 / m_e}$ 称为传导电子的等离子体频率, m_e 是电子质量, N_e 是电子密度, e 是电荷,计算得到 $\omega_p = 0.38265 \times 10^{16} \text{ Hz}$; ω 为电磁波的频率; γ 为阻尼系数,对于金属 Ti, $\gamma = 0.72005 \times 2\pi \times 10^{14}$ ^[28]。

2 石墨烯光子晶体参量

作者从理论上研究的1维石墨烯光子晶体由石墨烯层,锆酸钡层和钛层组成,可表示为 G/A₀/AB,其中 G 表示石墨烯层,厚度为 d_G , A₀ 为 BaZrO₃ 缺陷层,厚度为 d_{A_0} , A 和 B 分别为 BaZrO₃ 和 Ti,厚度分别为 d_A 和 d_B 。A, B 呈周期性排列,周期数用 N 表示,其结构示意图如图1所示。设3种介质磁导率均为1。

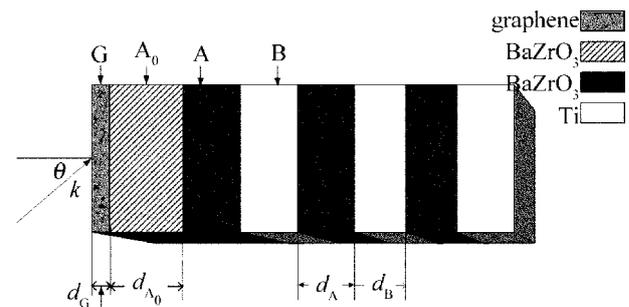


Fig. 1 Model of 1-D graphene photonic crystals

3 分析与讨论

下面从石墨烯厚度、电磁波入射角及模式等方

面分析其吸收特性。单层石墨烯的厚度为 $d_G = 0.334\text{nm}$ ^[29], $d_A = d_B = 0.1\lambda_0$, $\lambda_0 = 650\text{nm}$ 。

3.1 单介质的吸收特性

首先考虑只有一种介质时的吸收特性。选择参量为 $N = 10$, $d_{A_0} = 0.1\lambda_0$, $d_A = 0.1\lambda_0$, $d_B = 0.1\lambda_0$, 考虑在垂直入射的情况下对 TE 波的吸收率, 计算结果见图 2。图中正方形连接线表示单层石墨烯的吸收特性, 圆点连接线表示厚度为 $1.1\lambda_0$ 钽酸钡的吸收特性, 三角形连接线表示厚度为 λ_0 金属钛的吸收特性。

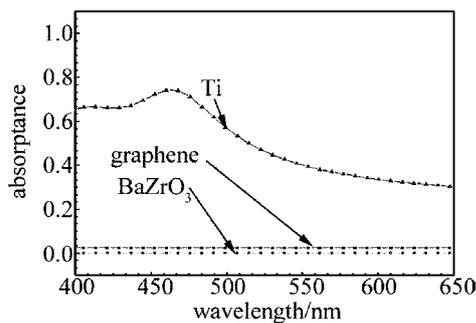


Fig. 2 Absorbance of only one material of graphene ($d_G = 0.335\text{nm}$), BaZrO_3 ($d_A = 0.1\lambda_0$, $d_{A_0} = 0.1\lambda_0$) and Ti ($d_B = 0.1\lambda_0$), $N = 10$

从图 2 中可看出, 只有单层石墨烯时的吸收率略大于 0, 与参考文献[3]中相吻合。 BaZrO_3 的吸收率为 0, 这是因为 BaZrO_3 为高介电常数陶瓷类材料, 对电磁波无吸收。金属 Ti 对波长为 460nm 左右的蓝光有较强的吸收作用, 在 $N = 10$ 时吸收率达到 0.7233。计算结果显示, 当层数 N 增加时, 该吸收峰的吸收率相应增加。很显然, 当层数增加时, 钛厚度也随之增加, 因此吸收性能有一定的提高。

3.2 石墨烯层数变化对吸收率影响

下面考虑石墨烯层数变化对吸收特性影响。取 $N = 10$, 石墨烯层数 N_g 分别为 0 层、1 层、2 层、4 层, 其它参量不变, 考虑 TE 波情况, 其吸收特性变化

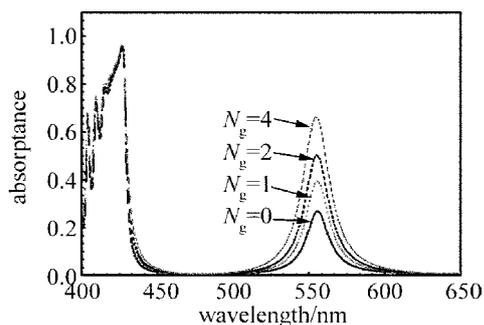


Fig. 3 Absorbance of different graphene layers for $N = 10$, $d_A = 0.1\lambda_0$, $d_{A_0} = 0.1\lambda_0$, $d_B = 0.1\lambda_0$

如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 在波长 556nm 处的吸收峰随着石墨烯层数增加, 其吸收率的大小呈近似线性增加, 这与参考文献[19]中的结论一致, 但由于本文中所选介质不同, 吸收峰值超过 0.6。而在波长为 428nm 处的吸收率接近至 1, 此处吸收峰主要是金属 Ti 对蓝光的吸收作用, 当石墨烯层数增加时, 对其吸收频点略有影响。

3.3 缺陷层厚度改变对吸收特性影响

这里选择石墨烯层数 $N_g = 4$, AB 周期数、厚度均不变, A_0 层厚度改变后, 从图 4 可以看出, 当缺陷层厚度 d_{A_0} 分别为 $0.1\lambda_0$, $0.2\lambda_0$ 和 $0.4\lambda_0$ 时, 反射区分别出现 1 个、2 个、3 个吸收峰, 当厚度增加到 $0.6\lambda_0$ 时, 在反射区会出现 4 个吸收峰, 同时, 在反射区之外会产生新的吸收峰。这里需要说明的是, 在波长为 428nm 处的吸收峰几乎没有变化, 这是因为该处的吸收峰主要有 Ti 的吸收特性产生, 因此当 BaZrO_3 发生变化时, 几乎对其无影响。但当 BaZrO_3 厚度增加到一定值时, 会产生新的吸收峰。主要是由于 BaZrO_3 作为缺陷层, 其厚度改变时, 使得反射的电磁波与行进的电磁波的相位差发生变化, 当相位差满足 2π 的整数倍时, 产生干涉相长的作用, 也就必然使得缺陷模数产生变化^[30]。因而增加 BaZrO_3 厚度时, 当电磁波频率在一定范围内, 可使缺陷模数目增加。

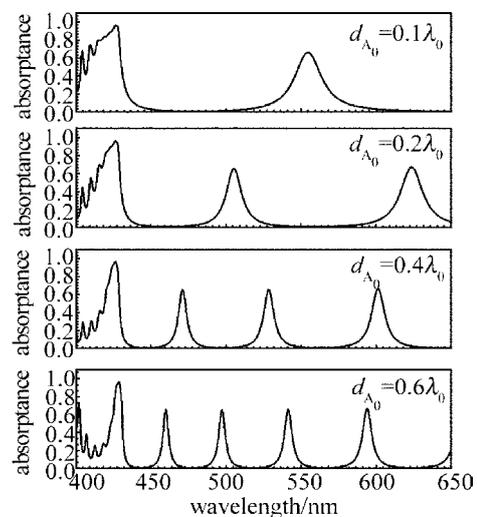


Fig. 4 Absorbance of different defect layers for $N_g = 4$, $N = 10$, $d_A = 0.1\lambda_0$, $d_B = 0.1\lambda_0$

3.4 入射角对吸收特性的影响

选择缺陷层厚度 $d_{A_0} = 0.1\lambda_0$, 其余参量不变, 首先考虑 TE 波的情况。改变电磁波入射角 θ 时, 可以看出, 当 θ 从 0° 到 85° 时, 在波长 556nm 处吸收率

几乎不变,吸收峰略微向右偏移,如图 5a 所示。从图中可看出,在 428nm 处的吸收峰的顶点在向左偏移的同时其值略有下降。这是由于 BaZrO₃ 的介电常数比较大,使得入射角对相位差 δ 的影响很小,几乎可以忽略^[31]。

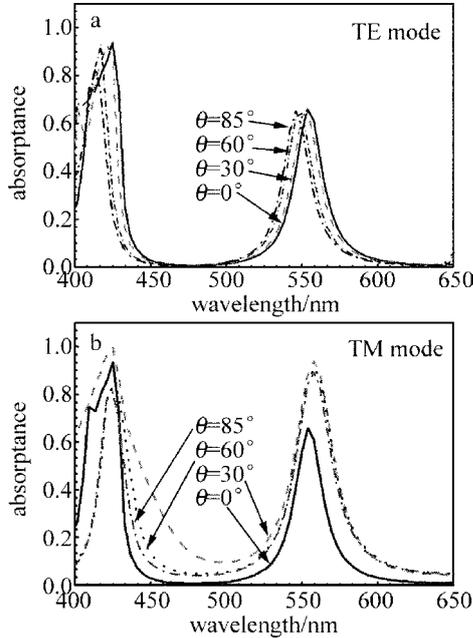


Fig. 5 Absorbance of 1-D graphene PCs for different incident angles for $d_{A_0} = 0.1\lambda_0, d_A = 0.1\lambda_0, d_B = 0.1\lambda_0, N_g = 4, N = 10$

图 5b 是在 TM 模式下入射角变化时的吸收特性,从图中可以看出,在波长 428nm 左右的吸收峰随着入射角从 0°到 85°变化时,其值先略有增加而后减小,在 30°时的值最大,吸收率基本为 1。在波长 556nm 处的吸收峰在入射角为 0°时其值最小,在入射角大于 30°时,吸收率达到 0.9 以上,其值基本不变。

图 6 所示的是不同模式下,入射角 θ 从 0°到 85°变化时吸收率随波长变化情况,横坐标表示波长,纵坐标表示入射角,图片右边的色度条表示吸收率 A 。从图 6a 可以看出,在 TE 波模式下,在波长 556nm 左右的吸收率在大角度时略有左移,吸收率维持在 0.6 以上。从图 6b 可以看出,在 TM 波模式下,吸收峰依然在 556nm 左右,此时的吸收率较 TE 模式要高,大约在 0.9 以上,在入射角较小时吸收率略有减小。

在前面的研究中发现,在电磁波入射角大于 30°以后,对比单频点和多频点吸收特性,可以看出在 TM 模式下吸收率更高。选择参量 $N_g = 4, N = 10, d_A = d_B = 0.1\lambda_0, d_{A_0} = 0.1\lambda_0$ (单频吸收,见图

7a), $d_{A_0} = 0.2\lambda_0$ (双频吸收,见图 7b))。

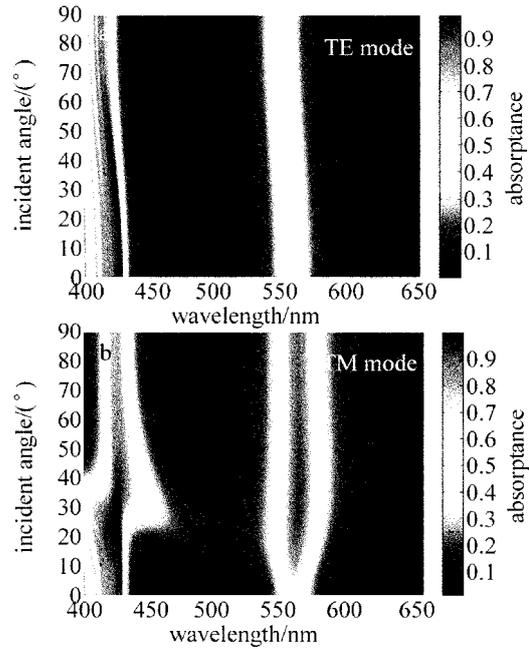


Fig. 6 Absorbance of 1-D graphene photonic crystals as a function of the light wavelength and the incident angles for $d_{A_0} = 0.1\lambda_0, d_A = 0.1\lambda_0, d_B = 0.1\lambda_0, N_g = 4, N = 10$

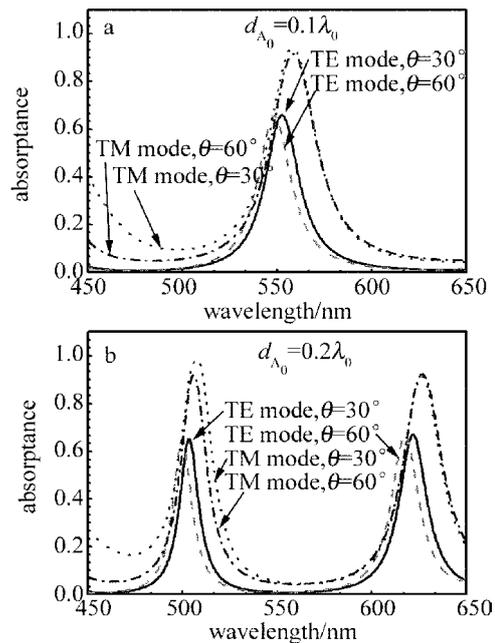


Fig. 7 Absorbance relationship between different electromagnetic wave modes and incidence angle at $d_{A_0} = 0.1\lambda_0, d_{A_0} = 0.2\lambda_0$

4 结 论

从石墨烯层数、缺陷层厚度及电磁波入射角变化等方面分析了石墨烯光子晶体的吸收特性。发现当石墨烯层数增加,对应的吸收率也会增加;当缺陷层厚度增加,导致吸收峰个数相应变化;当电磁波入

射角改变时,在角度较小时对 TE 波基本无影响,角度偏大时吸收频率略向右移动,吸收率基本不变。对 TM 波,在入射角较小时其吸收率较小,在入射角大于 30° 以后基本无影响。以上这些研究工作为石墨烯光子晶体在可见光波段的应用提供了理论依据。在设计 1 维石墨烯光子晶体作为吸波器时,应选择石墨烯层数 4 层(此时吸收率超过 0.6);多频吸收时,缺陷层厚度根据频点个数进行选择;电磁波入射角对 TE 波影响较小,在 TM 波入射的条件下,应使入射角大于 30° 。

参 考 文 献

- [1] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [2] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2061.
- [3] ZHANG H F, ZHENG J P, ZHU R J. Analysis of transmission characteristics of 1-D ternary magnetized plasma photonic crystals [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 208-216 (in Chinese).
- [4] XIONG C X, JIANG L J. Influence of material dispersion on defect modes of 1-D photonic crystal [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6): 743-746 (in Chinese).
- [5] GOTO T, INOUE M. Magnetophotonic crystal comprising electrooptical layer for controlling helicity of light [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(7): 07A913.
- [6] LIU Sh B, ZHU Ch X, YUAN N Ch. FDTD simulation for plasma photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(6): 2804-2808 (in Chinese).
- [7] WANG L G, CHEN H, ZHU S Y. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with single-negative materials [J]. *Physical Review*, 2004, B70(24): 245102.
- [8] ZHANG H F, LIU Sh B, KONG X K, *et al.* The properties of photonic band gaps for three-dimensional plasma photonic crystals in a diamond structure [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(4): 042110.
- [9] HOJO H, MASE A. Dispersion relation of electromagnetic waves in one-dimensional plasma photonic crystals [J]. *Plasma and Fusion Research*, 2004, 80(4): 89-92.
- [10] LI W, ZHANG H T, GONG M L, *et al.* Plasma photonic crystal [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(1): 263-266 (in Chinese).
- [11] KONG X K, WANG Y Sh, YANG H W, *et al.* Study on cut-off frequency of 1-D plasma photonic crystals [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(1): 126-129 (in Chinese).
- [12] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [13] NAIR R R, BLAKE P, GRIGORENKO A N, *et al.* Fine structure constant defines visual transparency of graphene [J]. *Science*, 2008, 320(5881): 1308.
- [14] BONACCORSO F, SUN Z, HASAN T, *et al.* Graphene photonics and optoelectronics [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 611-622.
- [15] FURCHI M, URICH A, POSPISCHIL A, *et al.* Microcavity-integrated graphene photodetector [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 2773-2777.
- [16] FERREIRA A, PERES N M R, RIBEIRO R M, *et al.* Graphene-based photodetector with two cavities [J]. *Physical Review*, 2012, B85(11): 115438.
- [17] AREFINIA Z, ASGARI A. Novel attributes in the scaling and performance considerations of the one-dimensional graphene-based photonic crystals for terahertz applications [J]. *Physica*, 2013, E54(12): 34-39.
- [18] VINCENTI M A, de CEGLIA D, GRANDE M, *et al.* Nonlinear control of absorption in one-dimensional photonic crystal with graphene-based defect [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(18): 3550-3553.
- [19] LIU J T, LIU N H, LI J, *et al.* Enhanced absorption of graphene with one-dimensional photonic crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(5): 052104.
- [20] WANG H. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 50(11): 2172-2178 (in Chinese).
- [21] BRUNA M, BORINI S. Optical constants of graphene layers in the visible range [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(3): 031901.
- [22] PARIDA S, ROUT S K, CAVALCANTE L S, *et al.* Structural refinement, optical and microwave dielectric properties of BaZrO₃ [J]. *Ceramics International*, 2012, 38(3): 2129-2138.
- [23] LUPINA G, DABROWSKI J, DUDEK P, *et al.* Dielectric constant and leakage of BaZrO₃ films [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(15): 152903.
- [24] FUENZALIDA V M, PILLEUX M E. Hydrothermally grown BaZrO₃ films on zirconium metal: microstructure, X-ray photoelectron spectroscopy, and Auger electron spectroscopy depth profiling [J]. *Journal of Materials Research*, 1995, 10(11): 2749-2754.
- [25] FREDERIKSE H P R. CRC handbook of chemistry and physics [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2003: 195.
- [26] WINDT D L, CASH W C, Jr, SCOTT M, *et al.* Optical constants for thin films of Ti, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Hf, Ta, W, Re, Ir, Os, Pt, and Au from 24 Å to 1216 Å [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(2): 246-278.
- [27] PALIK E D. Handbook of optical constants of solids [M]. New York, USA: Elsevier, 1998: 240-249.
- [28] RAKIC A D, DJURISIC A B, ELAZAR J M, *et al.* Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5271-5283.
- [29] ZHANG Y, TANG T T, GIRIT C, *et al.* Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene [J]. *Nature*, 2009, 459(7248): 820-823.
- [30] ZHANG H F, ZHENG J P, YANG G H. The forbidden band gap of tiame-varying magnetized plasma photonic crystals [J]. *Laser Physics*, 2011, 30(1): 74-78 (in Chinese).
- [31] FANG Y T, HE S. Transparent structure consisting of metamaterial layers and matching layers [J]. *Physical Review*, 2008, A78(2): 2381301.