

光子晶体增强石墨烯THz吸收*

谢凌云¹⁾²⁾ 肖文波³⁾ 黄国庆¹⁾ 胡爱荣¹⁾ 刘江涛^{1)4)†}

1)(南昌大学物理系, 南昌 330031)

2)(中山大学物理科学与工程技术学院, 广州 510275)

3)(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

4)(南昌大学高等研究院微尺度科学实验室, 南昌 330031)

(2013年10月8日收到; 2013年11月10日收到修改稿)

研究了光子晶体表面石墨烯在应力赝磁场作用下的太赫兹 (THz) 吸收. 由于应力赝磁场的存在使得石墨烯中电子出现朗道能级并对 THz 波呈现出一个较强的吸收. 而光子晶体和石墨烯形成了表面微腔结构使得石墨烯对 THz 波的吸收比无光子晶体时增强了将近四倍. 且可以通过改变应力赝磁场和间隔层厚度来调控石墨烯的 THz 吸收.

关键词: 石墨烯, 光子晶体, 太赫兹, 赝磁场

PACS: 78.67.Wj, 42.70.Qs, 95.85.Fm

DOI: 10.7498/aps.63.057803

1 引言

THz 范围的频率主要是 0.1—10 THz (30 μm —3 mm) 范围的光谱. THz 范围的光谱由于其特殊的性质, 在通信、医疗成像、雷达探测、无损检测、电子对抗、电磁武器等领域具有很广泛的应用^[1-7]. 而 THz 探测与调制一直是 THz 研究中的重要问题. 目前 THz 辐射的探测方法主要通过非线性效应、热辐射探测法、傅里叶变换光谱法、时域光谱法、外差式探测法以及半导体量子阱探测器等来实现^[8-13]. 而其中全固态的半导体 THz 探测器由于具有响应速度快、制作工艺成熟、体积小和易集成化等优点一直是人们所重点关注的领域^[12,13].

而在 2004 年, Novoselov 和 Geim 的团队在室温下, 用微机械剥离法制备出石墨烯. 自此, 石墨烯作为一种新颖的二维半导体材料引起人们的广泛关注^[14]. 石墨烯韧性强、导电性良好、响应速度快, 零带隙能带结构, 室温下电子的超高迁移率, 近弹道输运等特点, 在传感器, 纳米机电器件, 复合

材料很具潜力^[15-17]. 除此之外, 石墨烯具有独特的光敏感特性, 这使得其在光电探测器和光电传感器的应用方面具有很好的前景^[18-31]. 与此同时, THz 也用来研究石墨烯的电子态及电子的超快动力学过程. 由此, 石墨烯与 THz 的相互作用已成为目前石墨烯和 THz 研究的热点之一^[32-37].

但由于石墨烯的厚度极薄, 只有大约 0.34nm 厚, 这使得其光吸收率很低, 从而限制了石墨烯在光学领域的应用. 对此人们提出了多种办法来增强石墨烯的光吸收, 如周期性掺杂、利用表面等离子体、光学微腔等^[19-21,38,39]. 最近 Liu 等人研究发现, 当石墨烯位于光子晶体表面时, 石墨烯和间隔层在光子晶体表面构成了表面缺陷, 从而导致光的局域化. 这种局域化将使得由石墨烯能带间跃迁所导致的可见光吸收被增强大约 4 倍^[40]. 而 Peres 等人研究了石墨烯带内跃迁所导致的 THz 吸收, 并同样利用光子晶体来增强石墨烯的 THz 吸收, 研究发现可以将石墨的 THz 吸收增强 3 倍以上^[41].

然而为了在石墨烯中获得较强的带内跃迁需

* 国家自然科学基金 (批准号: 10904059, 11364033)、江西省自然科学基金 (批准号: 20122BAB212003 20132BAB202003)、江西省教育厅科研基金 (批准号: GJJ13005) 和集成光电子学国家重点实验室开放课题 (批准号: IOSKL2012KF14) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jtliu@semi.ac.cn

要较高的掺杂浓度, 且调谐较为困难. 这一问题对于较高频率的 THz 波尤为突出. 为此, 本文研究了石墨烯上应力所产生的赝磁场对较高频率的 THz 波吸收的影响, 并利用光子晶体来增强石墨烯的 THz 吸收. 在一定应力的作用下, 垂直于石墨烯表面会产生一个强的赝磁场^[42]. 大约 1% 的应力形变即可产生 $B_s = 7\text{T}$ 的赝磁场. 且与普通磁场不同, 赝磁场并不破坏时间反演对称性, 也不会出现磁光效应. 在赝磁场的作用下, 石墨烯中的狄拉克费米子会形成的分立朗道能级. 与早前所研究的石墨烯带间跃迁不同, 分立朗道能级之间的光学跃迁将导致较强的 THz 吸收. 此吸收可以通过改变应力赝磁场来调谐.

2 理论模型和计算方法

单层石墨烯产生的磁场一致性主要由施力构成几何图形对称性决定. 如果沿着三个主要的晶格方向施加应力, 这时产生的赝磁场在 $\hbar = e = 1$ 单位制中可以由下式来计算^[42]:

$$B_s = 8\beta\Delta_m/Da, \quad (1)$$

这里的 a 晶格常数, β 是近邻跃迁参数并且 $\beta = -\partial \ln t / \partial \ln a \approx 2$, Δ_m 是施加的应变, D 是石墨烯的圆周半径. Levy 等人利用此方法在石墨烯中获得了高达 300 T 的赝磁场, 并观测到了朗道能级之间的光学跃迁过程^[43]. 在此赝磁场作用下所形成的朗道能级可由下式给出^[44]:

$$E_n = \text{sgn}(n)v_F\sqrt{2e\hbar B_s|n|} = \text{sgn}(n)E_0\sqrt{|n|}, \quad (2)$$

这里的 $E_0 = v_F\sqrt{2e\hbar B_s}$, v_F 是为费米速度, 大小约为光速的 1/300, n 是朗道能级数, 因此可以通过改变外磁场的大小对石墨烯的朗道能级进行调制. 通过利用微扰矩阵 $H_{\text{int}} = -e(A_x\sigma_x - i\alpha_\omega A_y\sigma_y)$ 即可求的朗道能级之间的光学跃迁概率和石墨烯的光电导^[45].

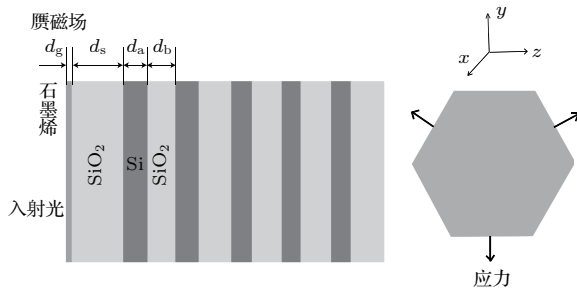


图1 多层薄膜石墨烯

为了增强石墨烯的光学吸收, 将石墨烯贴于介电常数周期性排列的 Si/SiO₂ 多层薄膜结构(也就是一维光子晶体)表面, 石墨烯和一维光子晶体(1DPC)之间有一层 SiO₂ 作为间隔层(如图 1 所示). 这时由于在 1DPC 的表面局域缺陷而产生光子局域化, 使得石墨烯的反射率降低并增强石墨的吸收. 根据麦克斯韦方程组, 以角度 θ 入射的光在第 l 层时的电场 TE 模如下:

$$E_l(y, z) = (A_l e^{ik_z z} + B_l e^{-ik_z z}) e^{-ik_y y} e_x, \quad (3)$$

和第 l 层的磁场 TM 模如下:

$$H_l(y, z) = (A_l e^{ik_z z} + B_l e^{-ik_z z}) e^{-ik_y y} e_x, \quad (4)$$

这里的磁场(电场)模式组成平行于 1DPC 表面的磁场(电场), $k_z = \sqrt{k^2 - k_y^2}$ 这里的 k 为光的复波矢. 通过使用传输矩阵法, 第 l 层光的 TE(TM) 模与入射光的关系可表示为^[40]

$$\begin{bmatrix} A_N \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

这样, 石墨烯的吸收率可以用坡印廷矢量来表示^[40]

$$A_o = (S_{0i} + S_{2i} - S_{0o} - S_{2o})/S_{0i}, \quad (6)$$

这里的 S_{0i} 和 S_{0o} (S_{2i} 和 S_{2o}) 是空气当中的入射和出射的坡印廷矢量(在间隔层处). 这里的 $S_{0i} = \beta_0 A_0^2 \cos \theta$, $S_{0o} = \beta_0 B_0^2 \cos \theta$ 和 $S_{2i} = \beta_0 A_2^2 \cos \theta'$, $S_{2o} = \beta_0 B_2^2 \cos \theta'$. 对于 TE 模, $\beta_0 = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0}$, $\beta_1 = \sqrt{\epsilon_s/\mu_0}$; TM 模 $\beta_0 = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0}$, $\beta_1 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_s}$. 这里的 ϵ_0 是真空的介电常数, ϵ_s 是间隔层的介电常数, θ' 是间隔层的中光的传播角. 在计算当中所用的参数有: Si 介电常数 $\epsilon_B = 12.96$, 厚度为 $d_B = \lambda_0/4\sqrt{\epsilon_B}$, λ_0 为入射 THz 的中心波长, SiO₂ 的介电常数为 $\epsilon_A = 3.64$, 厚度为 $d_A = \lambda_0/4\sqrt{\epsilon_A}$, 间隔层的介电常数 $\epsilon_s = \epsilon_A$, 厚度为 $d_s = \lambda_0/2\sqrt{\epsilon_B}$.

3 计算结果及分析

首先我们研究了多层光学薄膜对石墨烯的光学吸收影响, 数值计算结果如图 2 所示. 赝磁场强度 $B_s = 0.306\text{T}$, 此时石墨烯的朗道能级 0—1 之间跃迁的能量约为 20 meV, 对应的 THz 波中心频率 $\nu_0 \approx 4.8 \text{ THz}$, 相应的中心波长 $\lambda_0 = 62.5 \mu\text{m}$. 由于石墨烯中的和 ± 1 能级之间的跃迁概率比其他的能级跃迁概率高, 且要求的掺杂浓度低, 因此我们将只讨论和 1 之间的能级跃迁. 具体的计算结果如

图2所示,带多层光学薄膜的石墨烯结构要比独立结构石墨烯结构的光学吸收增强了近3.94倍.这主要是由于光子晶体对特定波长的光波产生全反射效应,由此石墨烯与光子晶体构成了类似F-P光学微型腔.这样一来,光在光学腔中不断地发生反射,导致了光的局域化,从而增强了石墨烯的THz吸收^[40].

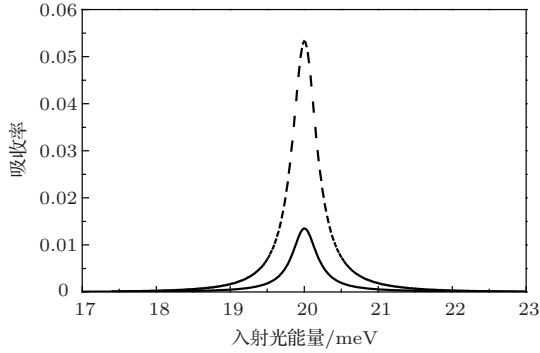


图2 存在光子晶体(虚线)与不存在光子晶体(实线)时石墨烯单层的光学吸收谱

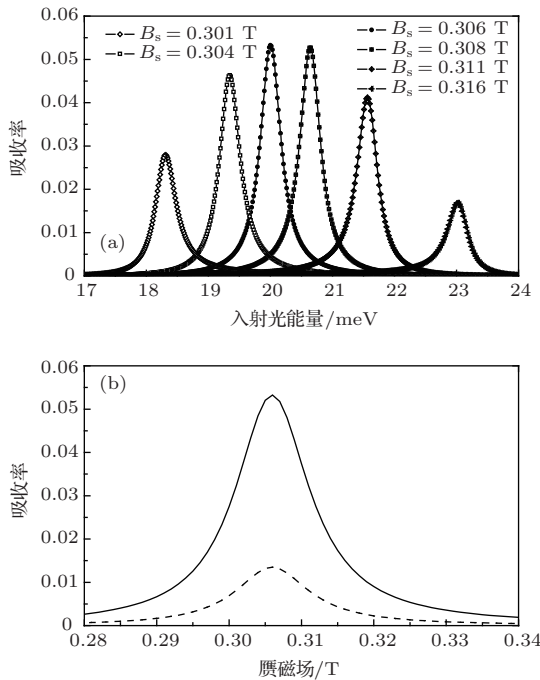


图3 不同赝磁场下石墨烯单层光子晶体复合结构THz吸收随入射光子能量变化情况;当入射光子能量为20 meV时,石墨烯单层光子晶体复合结构THz吸收随赝磁场变化情况

由方程(2)可知,石墨烯中的朗道能级能量间距正比于 $\sqrt{B_s}$.这样,石墨烯单层光子晶体复合结构的THz可以通过改变赝磁场也就是应变来调谐.具体的计算结果如图3所示.当赝磁场增大,朗道能级间距增加,吸收峰向高频方向移动.当赝

磁场从 $B_s = 0.301$ T变化到 $B_s = 0.316$ T时,吸收峰的中心光子能量从18.3 meV增加到23 meV(见图3(a)).不过由于光子晶体表面微腔的共振频率由间隔层厚度决定.只有当朗道能级间的THz波跃迁频率和光子晶体表面微腔相同时,这时光子晶体对THz吸收的增强效应最明显,这使得 $B_s = 0.306$ T时石墨烯对THz波的吸收最强.随着赝磁场偏离 $B_s = 0.306$ T,朗道能级间的光跃迁中心频率与光子晶体表面微腔的共振频率差距增大,THz的吸收减小(见图3(b)).这样,石墨烯中THz吸收可以用来检测石墨烯中赝磁场的大小或是用来制作应力传感器^[46].

石墨烯单层光子晶体复合结构的THz吸收同样也可以通过改变间隔层厚度来调控.当赝磁场 $B_s = 0.306$ T时吸收率随光子能量和间隔层厚度变化情况如图4所示.由于石墨烯单层光子晶体复合结构所构成的表面微腔的共振频率由微腔光学长度也就是间隔层的光程所决定.因而改变间隔层厚度将改变表面微腔的共振频率,从而改变石墨烯的THz吸收.对于 $B_s = 0.306$ T,只有当间隔层厚度大约为20 μm 时,THz的吸收达到最大.而当间隔层厚度增大或减小时,朗道能级间的光跃迁中心频率与光子晶体表面微腔的共振频率差距增大,THz的吸收迅速减小.当间隔层厚度小于15 μm 或大约28 μm 时,石墨烯的THz吸收小于0.01.

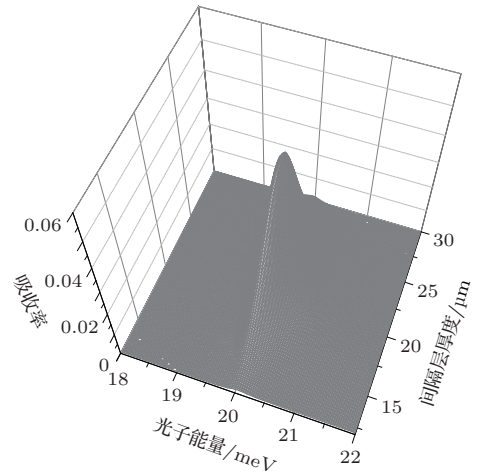


图4 吸收率随光子能量和间隔层厚度变化情况

4 结 论

研究了石墨烯光子晶体复合结构在应力赝磁场作用下的THz吸收.由于应力赝磁场的存在使得石墨烯中电子出现朗道能级,而朗道能级间的光

学跃迁将对 THz 波呈现出一个较强的吸收. 而光子晶体和石墨烯形成了表面微腔结构使得石墨烯对 THz 波的吸收比无光子晶体时增强了将近四倍, 且可以通过应力/磁场和改变间隔层厚度来调控石墨烯的 THz 吸收. 只有当朗道能级间的跃迁频率与光子晶体表面微腔特征频率共振时石墨烯对 THz 波的吸收达到最大. 本研究将为基于石墨烯的 THz 探测器及传感器的制作提供理论指导.

参考文献

- [1] Jacobsen R H, Mittleman D M, Nuss M C 1996 *Opt. Lett.* **21** 2011
- [2] Shen Y C, Lo T, Taday P F, Cole B E, Tribe W R, Kemp M C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 241116
- [3] Jeon T I, Grischkowsky D 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 3032
- [4] Markelz A G, Roitberg A, Heilweil E J 2000 *Chem. Phys. Lett.* **320** 42
- [5] Yoneyama H, Yamashita M, Kasai S, Kawase K, Ito H, Ouchi T 2008 *Opt. Commun.* **281** 1909
- [6] Chen D P, Xing C F, Zhang Z, Zhang C L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024202 (in Chinese)[陈大鹏邢春飞张峥张存林 2012 物理学报 **61** 024202]
- [7] Li Z Y, Yao J Q, Xu D G, Zhong K, Wang J L, Bing P B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 054207
- [8] Liu H C 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 1507
- [9] Levine B F J 1993 *Appl. Phys.* **74** R1
- [10] Goldberg A, Choi K K, Cho E 2005 *Infrared Phys. & Tech.* **47** 91
- [11] Graf M, Scarlari G, Hofstetter D, Faist J, Beere H, Linfield E, Ritchie D, Davies G 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 475
- [12] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J, Cao J C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4068
- [13] Cao J C 2006 *Physics* **35** 953 (in Chinese) [曹俊诚 2006 物理 **35** 953]
- [14] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsova A A 2004 *Science* **306** 666
- [15] Novoselov V S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D 2005 *Nature* **438** 197
- [16] Zhang Y B, Tan Y W, Stormer H L, Kim P 2005 *Nature* **438** 201
- [17] Katsnelson M I, Novoselov K S, Geim A K 2006 *Nature Physics* **2** 620
- [18] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, Ferrari A C 2010 *Nature Photonics* **4** 611
- [19] Wang X, Zhi L J, Mullen K 2008 *Nano Lett.* **8** 323
- [20] Zhu X L, Yan W, Jepsen P U, Hansen O, Mortensen N A, Xiao S S 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 131101
- [21] Pomar J L G, Alexey Y N, Luis M M 2013 *ACS Nano* **7** 4988
- [22] Eric S M, Luis E F F T 2012 *Phys. Rev. B* **86** 125449
- [23] Calvo H L, Pablo M P P, Roche S, Torres L E F F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 253506
- [24] Song Y, Wu H C 2013 *J. Phys. : Condens. Matter* **25** 355301
- [25] Liang S J, Sun S, Ang L K 2013 *Carbon* **61** 294
- [26] Peres N M R, Ribeiro R M, Neto A H C 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 055501
- [27] Zhang Z Z, Chang K, Peeters F M 2008 *Phys. Rev. B* **77** 235411
- [28] Chang K, Liu J, Xia J B, Dai N 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181906
- [29] Liu J T, Su F H, Wang H, Deng X H 2011 *EPL* **95** 24003
- [30] Wu H Q, Linghu C Y, Lü H M, Qian H C 2013 *Physics B* **22** 097304
- [31] Liu J T, Huang J H, Xiao W B, Hu A R, Wang J H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 177202
- [32] Ju L Geng B, Horng J, Girit C, Martin M, Hao Z, Bechtel H A, Liang X A, Zettl Y, Shen R, Wang F 2011 *Nature Nanotechnology* **6** 630
- [33] Ren L, Zhang Q, Yao J, Sun Z, R. K, Zheng Y, Nanot S, Jin Z, Kawayama I, Tonouchi M, Tour J M, Kono J 2012 *Nano Lett.* **7** 3711
- [34] Lee S H, Choi M, Kim T T, Lee S, Liu M, Yin X, Choi H K, Lee S S, Choi C G, Choi S Y, Zhang X, Min B 2012 *Nature Materials* **11** 936
- [35] Rodriguez B S, Yan R, Kelly M M, Fang T, Tahy K, Hwang W S, Jena D, Liu L, Xing H G 2012 *Nature Communications* **3** 780
- [36] Zuo Z G, Wang P, Ling F R, Liu J S, Yao J Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 097304
- [37] Zhang Y P, Zhang H Y, Yin Y H, Liu L Y, Zhang X, Gao Y, Zhang H Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 047803 (in Chinese)[张玉萍, 张洪艳, 尹贻恒, 刘陵玉, 张晓, 高营, 张会云 2012 物理学报 **61** 047803]
- [38] Thongrattanasiri S, Koppens F H L, de Abajo F J G 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 047401.
- [39] Ferreira A, Peres N M R, Ribeiro R M, Stauber T 2012 *Phys. Rev. B* **85** 115438
- [40] Liu J T, Liu N H, Li J, Li X J, Huang J H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 052104
- [41] Peres N M R, Bludov Y V 2013 *EPL* **101** 58002
- [42] Guinea F, Katsnelson M I, Geim A K 2010 *Nature Physics* **6** 30
- [43] Levy N, Burke S A, Meaker K L, Panlasigui M, Zettl A, Guinea F, Castro Neto A H, Crommie M F 2010 *Science* **329** 544
- [44] Iyengar A, Wang J H, Fertig H A, Brey L 2007 *Phys. Rev. B* **75** 125430.
- [45] Mele E J, Král P, Tománek D 2000 *Phys. Rev. B* **61** 7669
- [46] Zhao J, Zhang G Y, Shi D X 2013 *Chin. Phys. B* **22** 057701

Terahertz absorption of graphene enhanced by one-dimensional photonic crystal*

Xie Ling-Yun¹⁾²⁾ Xiao Wen-Bo³⁾ Huang Guo-Qing¹⁾ Hu Ai-Rong¹⁾ Liu Jiang-Tao^{1)4)†}

1) (*Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

2) (*School of Physics and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China*)

3) (*Key Lab of Non destructive Test (Ministry of Education), Nanchang Hang Kong University, Nanchang 330063, China*)

4) (*Nanoscale Science and Technology Laboratory, Institute for Advanced Study, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

(Received 8 October 2013; revised manuscript received 10 November 2013)

Abstract

The terahertz (THz) radiation absorption of graphene layers in a pseudomagnetic field, prepared on top of a one-dimensional photonic crystal (1DPC), is investigated theoretically. Discrete Landau levels can be found in graphene in a pseudomagnetic field. Strong THz transitions may be found between the discrete Landau levels. The THz absorption of graphene can also be tuned by varying either pseudomagnetic field or the distance between the graphene and the 1DPC.

Keywords: graphene, photonic crystal, terahertz radiation, pseudomagnetic field

PACS: 78.67.Wj, 42.70.Qs, 95.85.Fm

DOI: [10.7498/aps.63.057803](https://doi.org/10.7498/aps.63.057803)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10904059, 11364033), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant Nos. 20122BAB212003, 20132BAB202003), the Scientific Research Foundation of the Education Department of Jiangxi Province, China (Grant No. GJJ13005), and the Open Fund of the State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics (Grant No. IOSKL2012KF14).

† Corresponding author. E-mail: jtliu@semi.ac.cn