第 38 卷第 1 期
2019 年 2 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 38, No. 1
February, 2019

文章编号: 1001 - 9014(2019)01 - 0091 - 06

DOI: 10.11972/j.issn.1001 - 9014.2019.01.015

Bernal - Stacked 双层石墨烯 1.06 μm 谐振增强型光电探测器设计方法

牛海莎[1], 祝连庆[1*], 刘凯铭[2]

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光点工程学院,北京 100192;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光点工程学院,北京 100191)

摘要: 石墨烯对光的吸收率较低,通过与光学谐振腔结合限制光场,可有效提高石墨烯探测器件对入射光的吸收. 以电磁场传输理论为基础,推导了双层石墨烯光学谐振腔中的光场分布,建立了谐振增强型光电探测器传输矩阵数理模型,对 *Bernal-Stacked* 双层石墨烯的谐振增强型光电探测器结构参数进行数值计算,并对探测器性能进行分析. 结果表明,设计的探测波长为 *1.06 μm* 谐振增强结构光电探测器,双层石墨烯的光吸收率达到 *96.78%*,大幅提升了对微弱光信号的探测能力.

关 键 词: 探测器; 双层石墨烯; 谐振增强; 电磁场传输理论

中图分类号: O43 **文献标识码:** J

Design method of Bernal-Stacked bilayer graphene 1.06 μm resonance-enhanced photodetector

NIU Hai-Sha[1], ZHU Lian-Qing[1*], LIU Kai-Ming[2]

(1. Institute of instrument science and photoelectric engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
2. Institute of instrument science and photoelectric engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Graphene has a low absorption rate of light. By combining with an optical resonant cavity to restrict the light field, the absorption rate of the graphene detector element can be effectively improved. Based on the theory of electromagnetic field transmission, the optical field distribution in the bilayer graphene optical resonator is deduced, a mathematical model for the transmission matrix of the resonant enhanced photodetector is established, and a resonant enhanced photodetector for the Bernal-Stacked bilayer graphene is established. The structural parameters are numerically calculated and the detector performance is analyzed. The results show that, the optical absorption rate of bilayer graphene reaches up to 96.78% for a 1.06 μm wavelength resonant enhanced photodetector, which greatly improves the detection ability of weak optical signals.

Key words: photodetector, bilayer graphene, resonance enhancement, electromagnetic field transmission theory

PACS: 85.60.Gz, 81.05.ue, 85.60.-q

引言

自从 2010 年 Geim K 和 Novoselov S 获得诺贝尔物理学奖表彰他们发现单层石墨烯[1]及其场效应特性后,以石墨烯为代表的二维材料已成为电子学、光电学、材料学以及学科交叉领域的研究热点.

收稿日期: 2018-04-11, **修回日期:** 2018-05-12 **Received date:** 2018-04-11, **revised date:** 2018-05-12

基金项目: 教育部"长江学者与创新团队发展计划"项目资助(IRT_16R07)

Foundation items: Project supported by Program for Changjiang Scholars and innovative Research Team in University(Grant No. IRT_16R07)

作者简介(Biography): 牛海莎(1984-),女,河北石家庄人,博士后,北京信息科技大学讲师,2008 年于武汉大学获得工学学士学位,2017 年于北京航空航天大学获工学博士学位,主要从事激光器自混合干涉效应的精密测量、光学器件设计研究工作. E-mail: niuhs@buaa.edu.cn

* **通讯作者(Corresponding author):** E-mail: zhulianqing@sina.com

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

石墨烯具有零带隙结构，已被发现具有超强导电性、高载流子迁移率、超宽光谱响应、光吸收饱和等性质[2]. 目前超级电容器[3]、太阳能电池[4]、铝铁电池[5]、光电晶体管和液晶器件[6]等领域已经开始试商用石墨烯材料. 在光电探测领域，石墨烯作为吸收层参与到光电探测器的研制与开发中，对于解决现有器件探测效率不足、微型化限制、超快响应等问题，具有显著的优势.

石墨烯对光的吸收率与传统半导体材料相比较低，如单层的石墨烯吸收率仅为 2.3%，造成石墨烯光电探测器的量子效率低等问题. 为此，研究人员提出多种优化方法加以改进. 2010 年，Muller 等[7]提出构建非对称指叉电极型石墨烯光电探测器，将响应度从 0.5 mA/W 提高到 1.5 mA/W; 2012 年，Echtermeyer 等人[8]提出将石墨烯与等离子体结合，入射光被转化为等离子体振荡，从而在石墨烯的 P-N 结区域中产生电场的增强，将光电探测器的效率提高 20 倍; 2013 年，Wang 等人[9]提出将石墨烯集成到硅光波导上，利用波导吸收平行于石墨烯片的倏逝光，在 1.5 V 偏压下可以达到 130 mA/W 的响应度. 从结构设计上提升石墨烯光吸收率的方案中，谐振腔增强型结构可有效提高石墨烯材料的吸收率，提高光电探测器的响应度，同时拥有良好的波长选择性，可实现了量子效率和响应速度的解耦，在面向光子计算、通信传感领域的波分复用系统(WDM)中具有很大潜力. 2012 年，Engel 等人[10]首次利用微腔结构，将单层石墨烯嵌入用 Si_3N_4 和 Al_2O_3 做的薄膜中，用 Ag 和 Au 作为反射镜，可以得到 20 倍的光电流增强; 同年，Furchi 等人[11]利用布拉格反射镜(DBR)结构代替 Ag、Au 反射镜，并在腔中加入一层 Si_3N_4 缓冲层作为石墨烯吸收层载体，最终器件达到了 21 mA/W 响应度和 60% 以上的吸收率.

Bernal-Stacked 双层石墨烯(Bilayer Graphene，BLG)与单层石墨烯相比，不容易受到制备和运输过程中产生的结构缺陷影响[12]，而采用谐振腔增强型的结构可有效提高双层石墨烯的吸收率，提高石墨烯光电探测器的量子效率和响应度等性能. Liberato 等人[13]从理论上研究了双层石墨烯与微腔耦合的物理性质，但是，将双层石墨烯与光学器件结合的研究至今未见报道.

提出一种 Bernal-Stacked 双层石墨烯谐振增强型光电探测器的设计方法. 以 Bernal-Stacked 双层石墨烯的结构及电磁场传输特性为基础，采用传输矩阵法，得到光电探测器内部光场分布的传输矩阵; 以 1.06 μm 波长的光为例，采用 TiO_2，SiO_2 作为布拉格反射镜的材料，对双层石墨烯谐振腔型光电探测器的吸收率与腔长的关系和对入射光波长的选择作用进行分析，得到在顶/底镜对数分别为 3 和 8 的时候，可以使光电探测器的光吸收率达到 96.78%.

1 双层石墨烯的光吸收特性

通过理论推导双层石墨烯两侧电磁场分布，对双层石墨烯对光的吸收特性进行理论分析. 利用边界条件，将谐振腔内的双层石墨烯两侧的电磁场用传输矩阵来表征，并对传输矩阵进行求解，得到双层石墨烯的吸收率进行数值模拟研究. Bernal-Stacked 双层石墨烯谐振腔内的光传输示意图如图 1 所示.

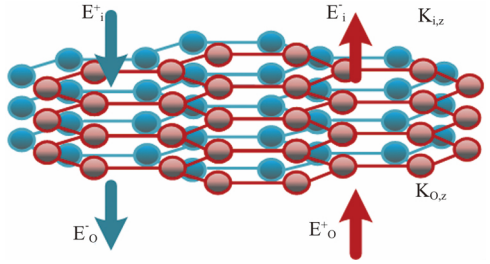


图 1 双层石墨烯光传输示意图

Fig. 1 Schematic of light transmission in bilayer graphene

$E_{i(o)}$ 为石墨烯两侧的电场，$H_{i(o)}$ 为石墨烯两侧的磁场，可分别表示为[14]：

$$\begin{aligned} E_i &= \left(E_i^+ e^{ik_{i,z}z} + E_i^- e^{-ik_{i,z}z}\right) e_x \\ E_o &= \left(E_o^+ e^{ik_{i,z}z} + E_o^- e^{-ik_{i,z}z}\right) e_x \\ H_i &= \frac{k_{i,x}}{\omega\mu_0}\left(E_i^+ e^{ik_{i,z}z} + E_i^- e^{-ik_{i,x}z}\right) e_y \\ H_o &= \frac{k_{i,x}}{\omega\mu_0}\left(E_o^+ e^{ik_{i,z}z} + E_o^- e^{-ik_{i,x}z}\right) e_y \end{aligned} \quad , \quad (1)$$

其中 μ_0 表示真空磁导率，k 表示波数. 电磁场边界条件:

$$\begin{aligned} n \times \left(E_i - E_o\right) &= 0 \\ n \times \left(H_i - H_o\right) &= \sigma E_o \end{aligned} \quad . \quad (2)$$

电导率 $\sigma = \pi e^2/h$ 为双层石墨烯电导率，e 和 h 分别为电子常量和普朗克常数. 将公式(1)代入式(2)中可以得出:

$$E_i^+ + E_i^- = E_o^+ + E_o^-$$

$$k_{i,z}\left(E_i^+ + E_i^-\right) = \left(k_{o,z} + \omega\mu_0\sigma\right) E_o^+ - \left(k_{o,z} - \omega\mu_0\sigma\right) \quad . \quad (3)$$

转换到实际结构当中，利用 $k_{i(o),z} = n_{i(o),z}k_0$，将公式(3)化成:

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\begin{pmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{pmatrix} = \frac{1}{2n_i}\begin{pmatrix} n_i + n_o + Z_0\sigma & n_i - n_o + Z_0\sigma \\ n_i - n_o - Z_0\sigma & n_i + n_o - Z_0\sigma \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} E_o^+ \\ E_o^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} E_o^+ \\ E_o^- \end{pmatrix} \quad . \quad (4)$$

则双层石墨烯传输矩阵 M_g 的表达式为:

$$M_g = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{2n_i}\begin{pmatrix} n_i + n_o + Z_0\sigma & n_i - n_o + Z_0\sigma \\ n_i - n_o - Z_0\sigma & n_i + n_o - Z_0\sigma \end{pmatrix} \quad , \quad (5)$$

其中真空阻抗 $z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$,$n_{1/2}$为双层石墨烯与顶(底)镜间的材料折射率.

当双层石墨烯处于谐振腔中时的传输矩阵如图 2 所示. 其 $M_1(x)$ 和 $M_2(L-x)$ 分别表示光在上层介质和下层介质中的传输矩阵. 顶、底镜传输矩阵传输矩阵 M_t 和 M_b 的方程分别为 $\frac{1}{1-R_t}\begin{pmatrix} -1 & -\sqrt{R_t} \\ \sqrt{R_t} & 1 \end{pmatrix}$和 $\frac{1}{1-R_b}\begin{pmatrix} -1 & -\sqrt{R_b} \\ \sqrt{R_b} & 1 \end{pmatrix}$,其中 R_t 和 R_b 分别表示顶镜和底镜的反射率; 双层石墨烯的传输矩阵方程为 M_g; $M_1(x)$ 和 $M_{2(L-x)}$ 分别为光在上缓冲介质层和下缓冲介质层的传输矩阵; 综上得到双层石墨烯谐振增强型光电探测器的传输矩阵 M 的方程为:

$$M = M_t M_1(x)\, M_g M_2(L-x)\, M_b$$

$$= \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{2n_1 - \sqrt{1-R_t}}\begin{pmatrix} -1 & -\sqrt{R_t} \\ \sqrt{R_t} & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} e^{-ik_1 x} & 0 \\ 0 & e^{ik_1 x} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n_1 + n_2 + Z_0\sigma & n_1 - n_2 + Z_0\sigma \\ n_1 - n_2 - Z_0\sigma & n_1 + n_2 - Z_0\sigma \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} e^{-ik_2(L-x)} & 0 \\ 0 & e^{ik_2(L-x)} \end{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{1-R_b}}\begin{pmatrix} -1 & -\sqrt{R_b} \\ \sqrt{R_b} & 1 \end{pmatrix} \quad , \quad (6)$$

其中 $k_1 = \frac{2n_1\pi}{\lambda}$和 $k_2 = \frac{2n_1\pi}{\lambda}$分别为双层石墨烯两侧介质层的波数. 进一步可以求得双层石墨烯在谐振腔内的反射率为 R、透射率为 T,分别为:

$$R = |M_{21}/M_{11}|^2 \quad T = |1/M_{11}|^2 \quad . \quad (7)$$

因此,双层石墨烯谐振腔增强型光电探测器的吸收率 A 可表示为:

$$A = 1 - R - T \quad . \quad (8)$$

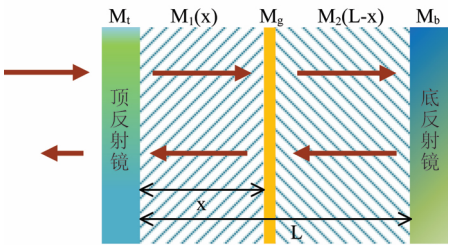


图 2　谐振腔内光传输矩阵示意图
Fig. 2　Schematic transfer matrix of an optical cavity

2　石墨烯光电探测器模型的建立

2.1　分布式布拉格反射镜材料及设计

常见的反射膜一般为金属反射膜或介质反射膜,但金属反射膜会在部分波段对光产生吸收,且反射率不易控制,不适宜作为顶反射镜材料; 另一方面微谐振腔设计中底反射镜反射率需要达到 99% 以上的高反射率,故选取介质反射膜的分布式布拉格反射镜(DBR)结构,谐振腔增强型光电探测器的基本结构图如图 3 所示.

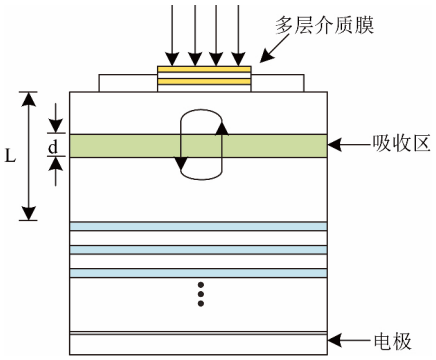


图 3　谐振腔增强型光电探测器结构示意图
Fig. 3 The Structure diagram of a resonant cavity enhanced photodetector

量子效率是光电探测器的重要指标,量子效率越高说明光电探测器的性能越好. 谐振腔石墨烯光电探测器的量子效率表达为[15]:

$$\eta = \frac{(1 + R_b e^{-ad})(1 - R_t)(1 - e^{-ad})}{1 - 2\sqrt{R_t R_b}e^{-ad}\cos(2\beta L + \phi_t + \phi_b) + R_t R_b e^{-ad}} \quad , \quad (9)$$

其中 R_t,R_b 为前文提到的顶镜和底镜反射率; α 为双层石墨烯对于 1.06 μm 光吸收率; d 和 L 分别是双层石墨烯厚度和谐振腔腔长; Φ_t 和 Φ_b 分别表示光在顶镜和底镜反射时产生的相移. $2BL + \Phi_b + \Phi_b$ 表示光电探测器中整体产生的相移.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据式(9),可得光电探测器量子效率与顶镜底镜反射率的关系,如图4所示. 指示箭头表明随着底镜反射率的提高,器件量子效率与峰值不断提高.

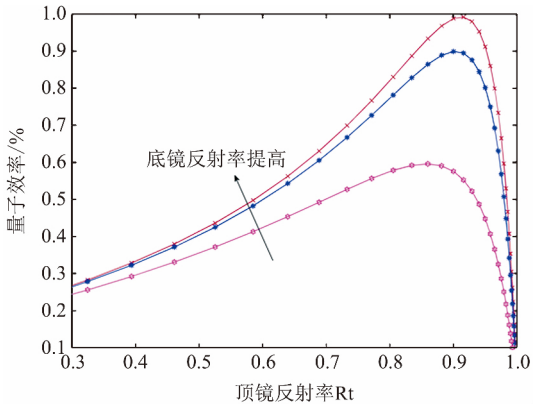


图4 探测器量子效率与顶反射镜反射率的关系

Fig. 4 The relationship between quantum efficiency and top reflector reflectivity

从公式(9)及图4探测器量子效率分析得到,从单纯数据角度底镜的反射率 R_b 越高越好,而顶反射镜的反射率 R_t 存在最优值. 当顶镜达到很高的反射率后,入射光波将被大部分反射,从而难以进入腔内与双层石墨烯吸收层相作用,使得器件整体性能快速下降. 对于顶、底反射镜膜系的设计参考标准有两点: 中心波长 λ_0 处的反射率以及反射谱宽度 $\Delta\lambda$. 顶、底反射镜镀膜一般会选用如 Ta_2O_5/SiO_2 [16]、Si_3N_4/SiO_2、TiO_2/SiO_2 等两种折射率相差较大的材料周期性交替组合而成的四分之一波长堆栈,这样可使所生长的半导体薄膜层数减少.

2.2 谐振增强型双层石墨烯探测器优化结构

选取折射率相差较大的 TiO_2 [17]、SiO_2 [18] 组合,考虑顶镜和底镜的反射率 R_t,R_b,用传输矩阵法计算得到它们在不同对数时候反射率的值. 图5表示了不同对数的 TiO_2/SiO_2 对作为顶镜和底镜的反射率.

在顶底反射镜设计上通过遍历的方式找到最佳对数搭配,计算结果如图6所示. 顶部反射镜 TiO_2/SiO_2 层对数存在最优解3对; 底部反射镜 TiO_2/SiO_2 层对数对应的探测器吸收率峰值随对数增加而增加,当底镜对数大于7时,吸收率超过94%,且在此之后吸收率峰值随对数增加而增加的程度大幅减少. 平衡工艺复杂度,选择8对的 TiO_2/SiO_2 构成底部反射镜.

从图6可以发现,探测器吸收率与图4所示的量子效率曲线有着一致的变化规律. 包围双层石墨烯的介质材料为 Al_2O_3 [19],即令 $n = n_1 = n_2$,基底为Si基底. 双层石墨烯微谐振腔光电探测器模型如图7所示.

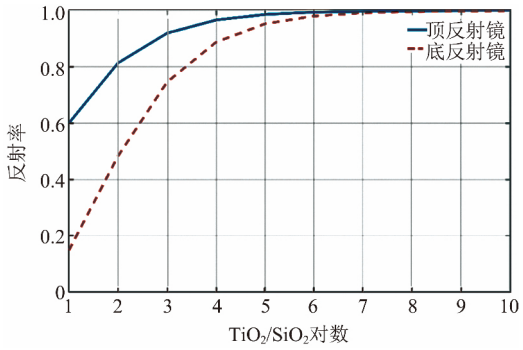


图5 TiO_2/SiO_2 对数与反射率的关系

Fig. 5 The relationship between TiO_2/SiO_2 pairs and reflectivity

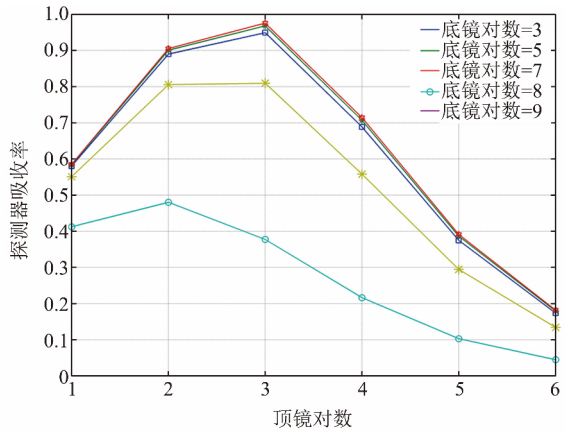


图6 顶/底反射镜对数与探测器吸收率变化关系

Fig. 6 The relationship between the pairs of the top/bottom mirror and the absorption rate of the photodetector

3 计算结果与分析

针对以上提出的顶底镜模型优化结构,进一步分析双层石墨烯谐振增强型光电探测器性能与腔长之间的关系. 在入射波长 $\lambda_i = 1.06$ μm、顶/底为3/8对配合下,AL_2O_3 介质腔腔长 $L = \lambda_i/2n = 318.2$ nm、双层石墨烯位置为 $x = L/2 = 159.1$ nm 时,可取得最高96.78%的器件吸收率. 为获得腔长 L 对双层石墨烯吸收的影响,对 L 从0至两倍等效波长 $2\lambda_i/n$ 进行遍历,并取等效腔长的倍数作为横坐标,得到如图8(a)所示的腔长与探测器吸收率变化关系. 可以看到在等效0.5倍波长和1.5倍波长腔条件下,探测器吸收率均达到最大值96.78%,即腔长 L 在谐振位置处的变化对吸收率最大值没有影响,且当腔

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

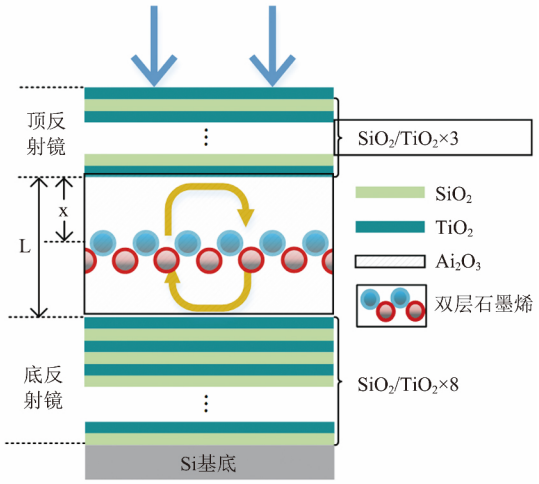


图 7　双层石墨烯微谐振腔光电探测器模型

Fig. 7　Schematic drawing of a bilayer graphene-based integrated microcavity photodetector

长为半波长整数倍时，应表现有吸收增强效应. 但从图 8(a) 中只看到半波长和 1.5 倍波长时的吸收峰，缺少一倍波长处的吸收峰. 在本文的默认条件 $x = 0.5$ L 下，双层石墨烯吸收层始终位于 AL_2O_3 腔的中心位置，则会出现一倍波长腔 $Ln/\lambda_i = 1$ 时，双层石墨烯位置正处于腔内谐振波节时的吸收峰消失现象. 如图 8(b) 所示，在波长 1.06 μm 处，红色曲线表示双层石墨烯谐振增强型探测器峰值吸收率为 96.78%，比蓝色虚线表示的单层石墨烯吸收率提高了 42 倍.

通过以上分析，谐振腔长及顶镜对数变化所引起的石墨烯光电探测器吸收性能波动明显，这意味着器件设计与加工制程中需在精度分配上有所取舍. 对不同等效波长的探测器吸收率输出光谱，选取了图 8(a) 所示 0.5 和 1.5 倍波长位置进行计算，得到等效半波长腔长下的探测器全半高宽为 11.22 nm，等效 1.5 倍波长腔长下的探测器全半高宽为 6.66 nm. 可见提高腔长虽对吸收峰无影响，但可进一步收窄吸收光谱宽度，增强吸收滤波效果.

4　结论

以 Bernal-Stacked 双层石墨烯吸收率理论为基础，建立了双层石墨烯的电导率模型，根据微腔中双层石墨烯电磁场响应及边界条件，得到双层石墨烯在存在上下介质层下的传输矩阵方程，建立谐振增强型双层石墨烯光电探测器的传输矩阵模型. 结论表明，该结构可以在 1.06 μm 波段处得到了 42 倍于传统单层石墨烯吸收率的谐振增强效果. 该设计方

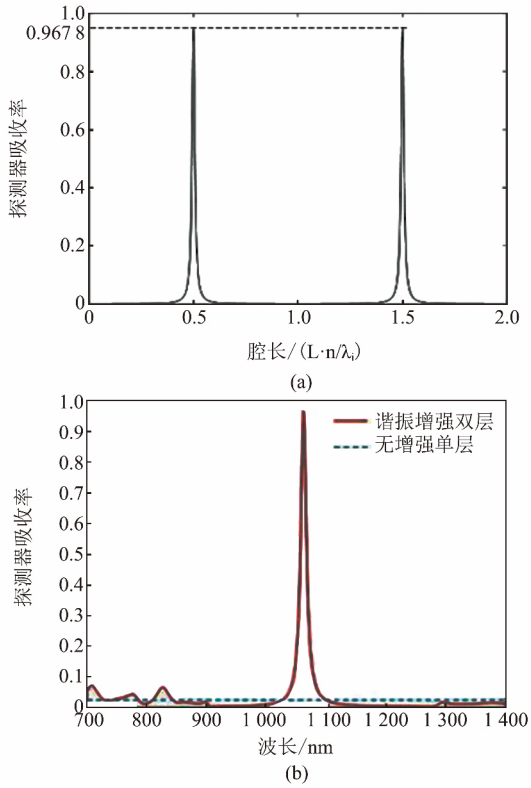


图 8　谐振增强型双层石墨烯探测器性能分析(a) 腔长与谐振增强型双层石墨烯探测器吸收率关系; (b) 谐振增强型双层石墨烯探测器吸收率($L = \lambda_i/2n_1$) 及无谐振增强下单层石墨烯吸收率光谱图

Fig. 8　Performance of the bilayer graphene-based integrated microcavity photodetector (a) Absorbance of the detector as a function of cavity length (b) Absorbance spectra of BLG in proposed cavity and free standing graphene

法可普遍适用于二维材料光电探测器的设计，且该谐振增强结构可实现良好的波长选择性，结合两者优势可在微弱光检测、超快光处理等领域产生深远影响.

References

[1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S, *et al*. Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, **5696**(306) : 666-669.

[2] Novoselov K S, Fal'Ko V I, Colombo L, *et al*. A roadmap for graphene [J]. *Nature*, 2012, **490**(7419) : 192.

[3] Yoo J J, Balakrishnan K, Huang J, *et al*. Ultrathin Planar Graphene Supercapacitors [J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(4) : 1423-7.

[4] Zhang L, Ding Z C, Tong T, *et al*. Tuning the work functions of graphene quantum dot-modified electrodes for polymer solar cell applications. [J]. *Nanoscale*, 2017, **9**(10) : 3524.

[5] Jung S C, Kang Y J, Yoo D J, *et al*. Flexible Few-Layered Graphene for the Ultrafast Rechargeable Aluminum-Ion Bat-

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

tery [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2016, **120** (25).
[6] Zhou Peng, Wei Hong-Qiang, SUN Hai-Tao, *et al*. High-k gate oxides integration of graphene based infrared detector [J]. J. Infrared Millim. Waves, (周鹏,魏红强,孙清清,等. 石墨烯基红外探测器的高k栅氧集成. 红外与毫米波学报), 2012, **31**(2): 118-121.
[7] Mueller T, Xia F, Avouris P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications [J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(5): 297-301.
[8] Echtermeyer T J, Britnell L, Jasnos P K, *et al*. Strong plasmonic enhancement of photovoltage in graphene. [J]. *Nature Communications*, 2011, **2**(1): 458.
[9] Wang X, Cheng Z, Xu K, *et al*. High-responsivity graphene/silicon-heterostructure waveguide photodetectors [J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(11): 888-891.
[10] Engel M, Steiner M, Lombardo A, *et al*. Light – matter interaction in a microcavity-controlled graphene transistor [J]. *Nature Communications*, 2012, **3**(2): 906.
[11] Furchi M, Urich A, Pospischil A, *et al*. Microcavity-integrated graphene photodetector [J]. *Nano Lett*, 2012, **12** (6): 2773-2777.
[12] Zeng L, Xie C, Tao L, *et al*. Bilayer graphene based surface passivation enhanced nano structured self-powered near-infrared photodetector [J]. *Optics Express*, 2015, **23** (4): 4839-46.
[13] Liberato S D. Perspectives for gapped bilayer graphene polaritonics [J]. Physics, 2015, 92.
[14] LI Jia- Bin, LIU Hong- Xia, WU Lei. The photoelectric property of graphene modified by boron and nitrogen atoms from density functional theory calculation [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (李佳斌,刘红侠,吴磊. 第一性原理计算硼和氮原子对石墨烯光电性能的调制. 红外与毫米波学报), 2018, **37**(1): 25-29.
[15] Xu Shicai, Studies of Graphene on Preparation, Characterization, Optoelectronic Properties and Applications [D], Shandong Normal University, (许士才. 石墨烯的制备、表征及光电性质应用研究. 山东师范大学), 2014.
[16] Vincenti M A, De C 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.
[17] T. Siefke, S. Kroker, K. Pfeiffer, *et al*. . Materials pushing the application limits of wire grid polarizers further into the deep ultraviolet spectral range, Adv. Opt. Mater. 2016, **4**: 1780-1786.
[18] L. Gao, F. Lemarchand, M. Lequime. Refractive index determination of SiO_2 layer in the UV/Vis/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and bilayer designs, J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public. 2013, 8: 13010.
[19] R. Boidin, T. Halenkovi c, V. Nazabal, *et al*. . Pulsed laser deposited alumina thin films, Ceramics International. 2016, **42**: 1177-1182.

(上接第67页)

[7] Xu, Jiangtao, et al. "A Global Shutter High Speed TDI CMOS Image Sensor With Pipelined Charge Transfer Pixel." IEEE Sensors Journal 18.7 (2018): 2729-2736.
[8] G Lepage, J Bogaerts, and G Meynants, "Time-Delay-Integration Architectures in CMOS Image Sensors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 56, pp. 2524-2533, 2009.
[9] Kawai N, Kawahito S. Noise analysis of high-gain, low-noise column readout circuits for CMOS image sensors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2004, 51(2): 185-194.
[10] Yu, Hang, et al. "An 8-stage time delay integration CMOS image sensor with on-chip polarization pixels." Circuits and Systems (ISCAS), 2015 IEEE International Symposium on. IEEE, 2015.
[11] Yu, Hang, et al. "An Antivibration Time-Delay Integration CMOS Image Sensor With Online Deblurring Algorithm." IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn. 26.8 (2016): 1544-1554.
[12] Yin, Chin, et al. "A 32-stage 15-b digital time-delay integration linear CMOS image sensor with data prediction switching technique." IEEE Transactions on Electron Devices 64.3 (2017): 1167-1173.
[13] Nie, Kaiming, Jiangtao Xu, and Zhiyuan Gao. "A 128-stage CMOS TDI image sensor with on-chip digital accumulator." IEEE Sensors Journal 16.5 (2016): 1319-1324.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net