

基于谐振腔增强型石墨烯光电探测器的设计及性能分析

梁振江 刘海霞 牛燕雄 尹贻恒

Design and performance analysis of microcavity-enhanced graphene photodetector

Liang Zhen-Jiang Liu Hai-Xia Niu Yan-Xiong Yin Yi-Heng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 138501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.138501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.138501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含有 AlGaAs 插入层的 InAs/GaAs 三色量子点红外探测器

Three-color InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector with AlGaAs inserting layer

物理学报.2016, 65(10): 108502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.108502>

基于高阻 ZnO 薄膜的光电导型紫外探测器

Photoconductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film

物理学报.2015, 64(19): 198501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198501>

基于垂直晶体管结构的低电压并五苯光电探测器

Low-voltage pentacene photodetector based on a vertical transistor configuration

物理学报.2015, 64(10): 108503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108503>

高速高饱和单行载流子光探测器的设计与分析

Design and analysis of high speed and high saturation uni-traveling-carrier photodetector

物理学报.2014, 63(20): 208502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208502>

基于内聚区模型的 InSb 面阵探测器分层研究

Delamination study of InSb infrared focal plane arrays using a cohesive zone model

物理学报.2014, 63(11): 118503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118503>

基于谐振腔增强型石墨烯光电探测器的设计及性能分析*

梁振江 刘海霞† 牛燕雄 尹贻恒

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

(2016年1月28日收到; 2016年3月27日收到修改稿)

提出了一种具有超薄有源层的谐振腔增强型石墨烯光电探测器的设计方法, 利用谐振腔结构可以将光场限制在腔内, 有效增强探测器的吸收. 通过研究谐振腔内光场谐振条件及谐振模式下探测器响应度增强的机理, 建立了驻波效应下谐振腔增强型石墨烯光电探测器光吸收模型, 仿真分析谐振腔反射镜反射率、谐振腔腔长对于腔内光场增强器件性能的影响. 理论分析表明, 谐振腔增强型石墨烯光电探测器在850 nm处响应度可达0.5 A/W, 相比无腔状态下提高了32倍; 半高全宽为10 nm. 采用谐振腔结构能够提高石墨烯光电探测器件的光电响应, 为解决光电探测器响应度与响应速度之间的相互制约关系提供了途径.

关键词: 谐振腔, 石墨烯光电探测器, 响应度, 波长选择性

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

DOI: 10.7498/aps.65.138501

1 引言

石墨烯光电探测器(graphene photodetectors, GPD)由于石墨烯有源层具有特殊的零带隙结构、室温下超高的电子迁移率(高于 $15000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、低于铜银的电阻率($10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$)等特性, 从而能够突破传统探测器的“长波限制”, 具有探测范围宽、响应速度快的特点^[1-6]; 另外, GPD易于单片集成且与硅工艺兼容, 这些特点使GPD在光纤通信领域有着极大的应用潜力. 随着石墨烯制备与转移技术的不断发展, 以化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)法^[7]和湿法^[8]为代表, 给GPD的发展带来了新的机遇和挑战. 目前, 对GPD的研究已经有很多报道, 但由于石墨烯在可见光至近红外波段的垂直吸收率仅为2.3%^[9,10](即吸收系数为 $6.8 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$), 极大地限制了GPD的响应度. 如2009年, Xia等^[11]制备的第一个GPD以石墨烯为有源区, SiO_2 为衬底, 得到的响应度仅为0.5 mA/W; 2010年, Mueller

等^[12]提出的非对称叉指电极(metal-graphene-metal, MGM)结构GPD, 采用MGM结构, 虽然解决了无源漏偏压条件下净光电流不为零的问题, 但得到的响应度也只有1.5 mA/W. 为保证GPD在可见光至近红外区域有良好的吸收, 必须增加石墨烯的厚度, 但这一条件会使石墨烯丧失作为二维平面材料具有的独特性质以及限制器件的高速光电响应. GPD器件以不足一个纳米厚度的石墨烯为有源区, 具有非常高的响应速度. 近年来, 为使GPD同时兼具高响应度与响应速度的特性, 研究者尝试了等离子体增强^[13-15]、波导集成^[16-18]和谐振腔增强^[19,20]等方法来达到增强光透射和吸收的作用, 从而有效提高具有超薄有源层的GPD的响应度. 如2012年, Fang等^[15]将高分子聚合物的纳米颗粒耦合到石墨烯表面, 在光照条件下, 通过表面等离子体效应增强局域电场, 器件的响应度达到了13 mA/W; 2013年, Gan等^[18]将石墨烯与硅波导集成, 利用瞬逝电场激发石墨烯中的光生载流子, 器件的响应度达到了100 mA/W, 但

* 北京市自然科学基金(批准号: 7152089)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuhx08@buaa.edu.cn

响应波长只在 1450—1590 nm 之间. 谐振腔增强型 GPD 通过将入射光限制在两反射镜构成的腔内, 发生多次反射产生干涉增强作用, 从而激发石墨烯产生更多的光生载流子, 提高器件的响应度. 另外, 谐振腔增强型 GPD 还具有在无偏压条件下工作、波长选择性以及易于与微电子电路集成等特性, 对于波分复用解复用 (wavelength division multiplexing, WDM) 系统具有重要意义^[20]. 2012 年, Engel 等^[19]首次将石墨烯晶体管与平面光学微腔进行整片集成, 采用 Ag, Au 金属反射镜分别作为顶层反射镜和底层反射镜, 石墨烯位于腔中心, 结果探测到的光电流增强了 20 倍. 然而 Ag, Au 金属反射镜会吸收部分的入射光, 产生额外的损耗. 同年, Furchi 等^[20]采用分布布拉格 (distributed bragger reflection, DBR) 反射镜替代金属反射镜, 通过在腔中加入一层 Si_3N_4 缓冲层, 使石墨烯处于腔内光场幅值最大的位置, 最终器件的响应度达到 21 mA/W. 但由于引入缓冲层, 增加了器件的工艺复杂度, 另外文中对谐振腔内光场谐振增强的机理、驻波效应并没有深入的探讨研究, 以及缺少对谐振腔腔长这一结构参数的定性定量分析. 对于谐振腔增强型 GPD, 国内外有关其增强机理的分析以及器件结构的优化设计的报道并不多见.

本文提出了一种具有超薄有源层的谐振腔增强型 GPD 光电探测器的设计方法. 采用 DBR 反射镜构成谐振腔, 利用入射光在腔内的谐振效应增强器件的吸收, 提高响应度; 分析了谐振腔反射镜反射率、谐振腔腔长结构参数对于器件响应度的影响, 并对驻波效应、腔内光场谐振条件及谐振模式下响应度增强的机理进行了阐述.

2 理论分析及模型的建立

2.1 理论分析

入射光在构成谐振腔的两个反射镜之间来回反射的过程中会引起反射相移, 当光波在腔内来回反射一次所引起的总相移为 π 的偶数倍时, 会产生谐振效应, 光场增强, 通过光波多次穿过有源层, 从而增强器件的吸收, 提高响应度. 谐振条件方程为

$$\lambda_c = \frac{4nL\pi}{2m\pi - \phi_t - \phi_b}, \quad (1)$$

其中 λ_c 为谐振波长; n 为折射率; L 为谐振腔腔长; ϕ_t, ϕ_b 分别为光波在顶层和底层反射镜反射时所引起的反射相移; m 为整数.

由 (1) 式可知, 当入射光波与谐振腔模式相匹配, 才能在腔内产生谐振增强作用, 由此可通过对谐振波长的设计使器件具有特定的波长选择性, 因此在设计时需重点对谐振腔结构参数进行调控, 以达到对特定波长的光有明显响应度增强的目的.

2.2 模型建立

谐振腔增强型 GPD 的设计结构如图 1(a) 所示, 图 1(b) 为二维结构图. 本文采用 SiO_2 与 Si 两种半导体材料周期性交替组合而成四分之一波长堆栈 (quarter waves tacks, QWS's)^[21] 构成 DBR 反射镜, 由于 SiO_2/Si 具有很高的相对折射率, 实现反射镜高反射率所需要生长的 SiO_2/Si 薄膜层数较少, 从而能降低器件的工艺复杂度、串联电阻以及制造成本^[22]. 图 1(b) 中 L 为谐振腔腔长, 整个器件以 SiO_2 为衬底. 谐振腔增强型 GPD 的响应度是评价其性能的重要指标. 当光波在谐振腔内来回反射时, 两个相向传播的光波会相互叠加形成驻波, 由于石墨烯厚度只有纳米级别, 其光学厚度不到一个驻波周期, 当有源层处于波腹和波节不同位置时, 器件的吸收分别达到最大与最小. 驻波效应^[23]改变了石墨烯有源层的有效吸收, 如图 2 所示, 可以看出, 有源层的有效吸收随厚度的变化发生了改变, 单层石墨烯 (厚度为 0.3 nm) 在波腹处的有效吸收系数增大了一倍. 因此在计算器件响应度时必须考虑驻波效应. 令入射光从空气界面垂直入射, 在谐振条件下器件响应度的表达式为

$$R = e \left[1 + R_b e^{-\left(1 \pm \frac{\sin(\beta d)}{\beta d}\right) \alpha d} \right] (1 - R_t) \times \frac{\left[1 - e^{-\left(1 \pm \frac{\sin(\beta d)}{\beta d}\right) \alpha d} \right]}{h\nu \left[1 - \sqrt{R_t R_b} e^{-\left(1 \pm \frac{\sin(\beta d)}{\beta d}\right) \alpha d} \right]^2}. \quad (2)$$

通过对有源层吸收一个光子产生载流子数目的计算得到光生载流子电荷量, 再与入射光子的能量进行相比可得到响应度 R . 上式中 α 为石墨烯有源层吸收系数, β 为传输常数, d 为石墨烯有源层厚度, R_t 和 R_b 分别为顶层和底层 DBR 反射镜反射率, e 为单位电荷量, h 为普朗克常量, ν 为入射光频率.

由于石墨烯具有独特的零带隙特性, 可以对任意波段进行响应, 其中波长为 850 nm 的光波常用于低损耗多模光纤数据连接系统^[24], 因此本文重点针对 850 nm 的响应度增强进行结构优化设计, 并分析谐振腔反射镜反射率 R_t 与 R_b 、谐振腔腔长

L 对于器件响应度的影响, 最终提出对谐振腔增强型 GPD 的设计要求.

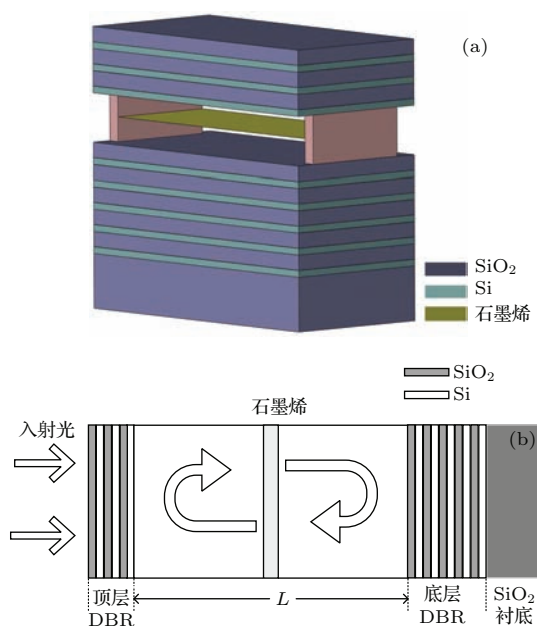


图1 (网刊彩色) 谐振腔增强型 GPD 的结构示意图 (a) 三维结构图; (b) 二维结构图 (图中光从空气界面垂直入射到 GPD 上)

Fig. 1. (color online) Schematic illustration for microcavity-enhanced graphene photodetector: (a) Three dimension structure, (b) 2D structure (normal incidence light is from air interface to GPD in this picture).

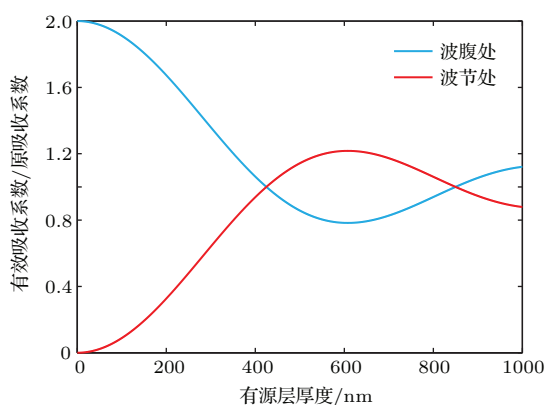


图2 (网刊彩色) 驻波效应下石墨烯有源层的有效吸收与厚度的关系

Fig. 2. (color online) The relationship of graphene active layer's effective absorption and thickness under the standing wave effect.

3 仿真结果与讨论

在设计谐振腔型 GPD 时, 主要分析谐振腔结构对于腔内光场谐振增强的影响, 重点考虑谐振腔反射镜反射率和谐振腔腔长两个参数. 根据 (1) 和

(2) 式, 这两个参数直接影响光波在腔内的总相移, 从而影响器件的谐振波长和响应度. 本文以单层石墨烯为有源层, 以 850 nm 为入射光波长作为初始条件, 仿真模拟得到最佳结构.

3.1 谐振腔反射镜反射率对谐振腔增强型 GPD 响应度的影响

选取 SiO_2 与 Si 作为构成 DBR 反射镜的半导体材料, 根据 QWS's 原理, 将 SiO_2 层与 Si 层的物理厚度分别设置为 140 nm 和 62 nm, 并组成 SiO_2/Si 薄膜, 采用光学传输矩阵法来计算不同薄膜层数的 DBR 反射镜反射率. 图 3 展示了在谐振条件下器件响应度与两个谐振腔反射镜反射率变化的关系, 图 4(a) 展示了在不同 SiO_2/Si 薄膜层数下顶层和底层反射镜反射率随波长的变化关系.

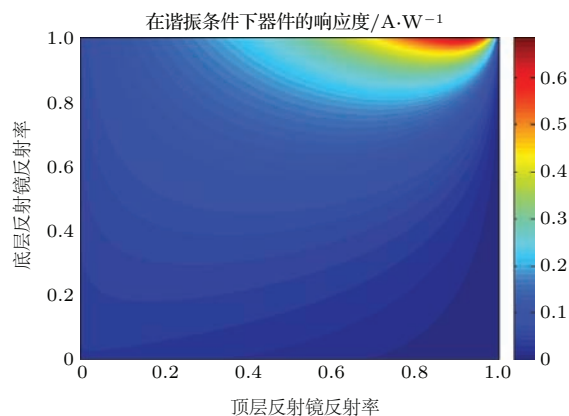


图3 (网刊彩色) 谐振条件下器件响应度与谐振腔反射镜反射率的关系

Fig. 3. (color online) The relationship of the device's responsibility and cavity mirrors' reflectivity under the resonance condition.

由图 3 可知, 随着顶层和底层反射镜反射率的同步增大, 器件的响应度也随着增大, 在两反射镜反射率均接近 1 时出现最大值. 在谐振腔增强型光电探测器反射镜的实际设计中, 常将底层反射镜反射率设置为 1, 底层反射镜反射率越高, 越多的光波返回腔内, 从而增强器件的吸收; 而顶层反射镜是部分透射的, 在底层反射镜反射率一定的情况下, 随着顶层反射镜反射率的增加, 响应度先增加后减小, 在顶层反射镜接近 1 时, 响应度为零, 这与实际情况也吻合. 当顶层反射镜反射率为 1 时, 入射光波全部被反射, 没有光波进入腔内, 响应度自然为零. 通过图 3 对顶层及底层反射镜反射率的扫描, 得到这两个参量之间的最佳匹配关系, 即当顶

层及底层反射镜反射率分别为91.0%和99.8%时,得到最大响应度0.68 A/W. 由图4(b)可知,当顶层和底层反射镜分别由三层和五层SiO₂/Si薄膜组成时,可得到最接近优化值的反射率97.0%和99.8%,最终器件响应度为0.50 A/W,当不采用谐振腔时,即 R_t 与 R_b 分别为0,由于没有谐振腔,并不会产生驻波增强效应,因此无腔情况下器件响应度为 $R = e(1 - e^{-\alpha d})/h\nu$. 通过计算可得,在850 nm处,无腔情况下器件响应度仅为0.0154 A/W. 以上理论分析表明,采用谐振腔与无腔相比,器件响应度能够提高32倍.

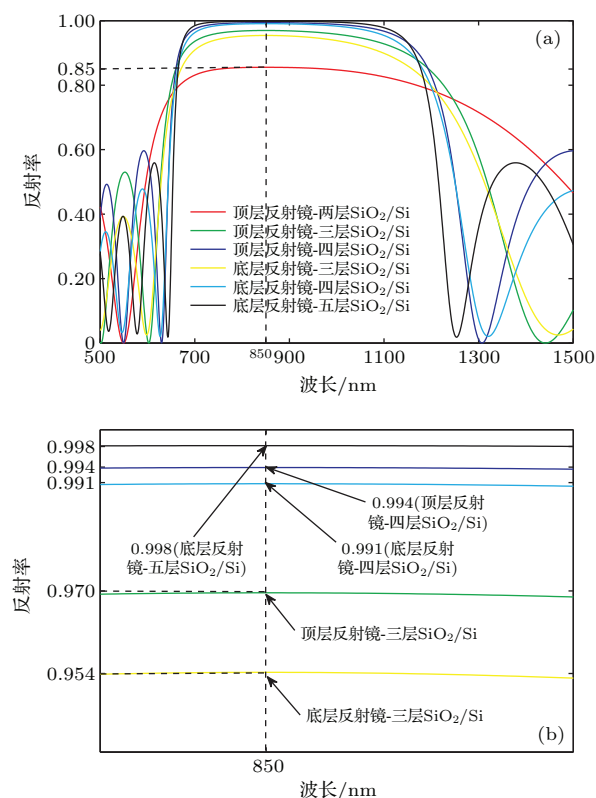


图4 (网刊彩色) 不同SiO₂/Si薄膜层数下顶层和底层反射镜反射率与波长的关系; (b) 为(a)的局部放大图

Fig. 4. (color online) The relationship between top mirror and bottom mirror's reflectivity with wavelength under different SiO₂/Si thin films condition; figure (b) is the partial enlarged drawing of figure (a).

3.2 谐振腔腔长 L 对谐振腔增强型GPD响应度的影响

在光通信及光信息处理领域,光电探测器的窄带高速特性尤其重要,响应度谱线的半高全宽(full width at half maximum, FWHM)是其中一项重要指标. 腔长 L 的改变使器件总相移发生直接变化,而总相移的变化将直接影响器件的FWHM,因而

合理设计 L 对提升器件的FWHM有着重要作用. 图5展示了在850 nm处,器件响应度与 L 的关系. 从图中可知,在 L 从0—1000 nm变化过程中,分别在 $L = 0$, $L = 425$ nm, $L = 850$ nm处器件响应度达到最大值0.5 A/W,而这三个位置分别为半谐振波长的0, 0.5和1倍,器件响应度在 L 为半谐振波长的整数倍时达到最大的周期性变化主要是由于改变腔长引起器件总相移变化的缘故. 图6展示了在不同 L 情况下总相移与波长的变化关系;图7展示了在不同 L 条件下器件响应度随波长变化的关系. 从图6可以发现,在入射光为850 nm处三条总相移曲线的总相移分别是0, 2π , 4π ,均为 π 的偶数倍,满足谐振条件进而使得响应度达到最大. 随着 L 的增大,曲线两端的变化幅度越来越大,而在850 nm附近有近似单调递增的线性变化,相应斜率却在减小. 由图7可知, L 引起总相移这种规律性的变化对应器件响应度在850 nm处FWHM的

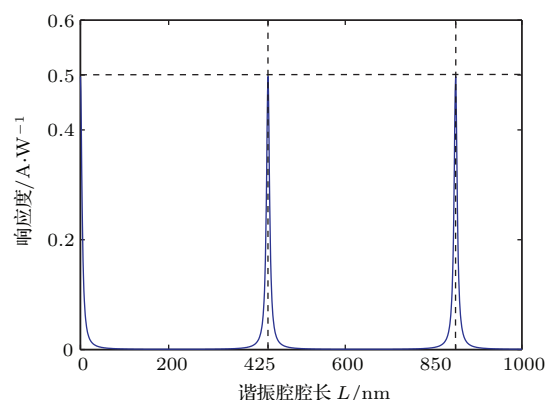


图5 (网刊彩色) 入射光为850 nm时器件响应度与 L 的关系

Fig. 5. (color online) The relationship of the device's responsivity and L when the incidence light's wavelength is 850 nm.

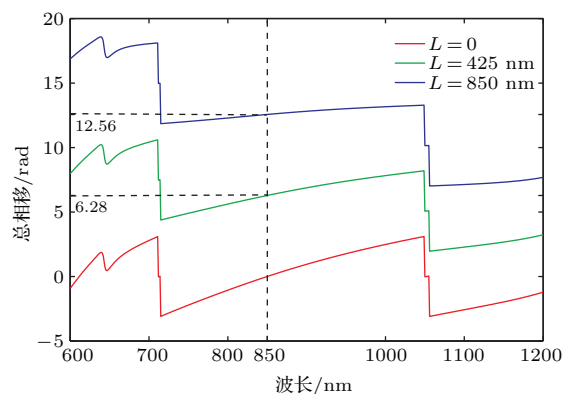


图6 (网刊彩色) 不同 L 情况下总相移与波长的关系

Fig. 6. (color online) The relationship of the total phase shifting and wavelength when L differs.

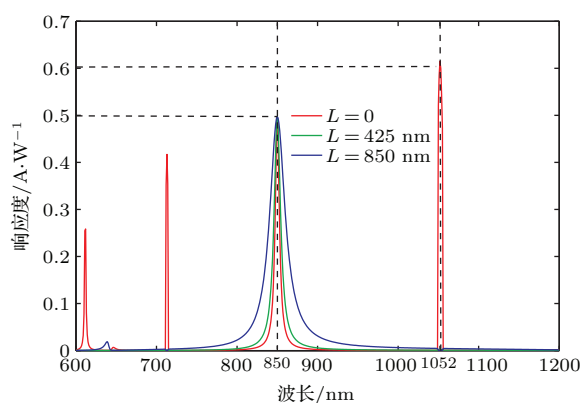


图7 (网刊彩色) 不同 L 情况下器件响应度与波长的关系
Fig. 7. (color online) The relationship of device's responsivity and wavelength when L differs.

变化, 其中 $L = 0$ 时, FWHM 为 6 nm 最小, 随着 L 增大, FWHM 增大; 并且在响应度曲线两端出现波动, 在 $L = 0$ 时, 波动最大, 在 1052 nm 处还出现 0.6 A/W 的极值, 主要是因为将 L 设置为 0 时, 谐振腔反射镜引起的相移变化在总相移中占主导地位.

表1 不同波长对应的优化参数及性能分析

Table 1. Optimized parameters and performance analysis of different wavelengths.

谐振波长/nm	d_{Si} /nm	d_{SiO_2} /nm	R_t /%	R_b /%	L /nm	响应度/ $\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$	FWHM/nm
850	62	140	97.0	99.8	425	0.5	10
1310	96	215	85.5	99.8	655	0.96	30
1550	113	255	95.0	99.8	775	1.12	20

4 结 论

通过建立驻波效应下谐振腔增强型石墨烯光电探测器的光吸收模型, 对谐振条件方程和响应度方程进行了数值分析. 结果表明, 驻波效应下石墨烯有源层的有效吸收系数在波腹处相比无腔环境下扩大了一倍, 谐振腔腔长和谐振腔上下反射镜反射率直接影响光波在腔内折返一次的总相移, 而总相移的变化改变了器件响应度谱线的 FWHM. 通过协调谐振腔腔长、谐振腔反射镜反射率和入射波长三者之间的关系, 可使器件具有波长选择性. 理论分析中, 分析了谐振腔反射镜 R_t 和 R_b 、谐振腔腔长 L 对于谐振腔增强型 GPD 响应度的影响, 给出谐振腔增强型 GPD 器件在不同输入波段的最优结构参数及其性能评估. 具体针对波长 850 nm 的入射光, 最终器件响应度达到 0.5 A/W, FWHM 为 10 nm, 表现出高响应度和窄带性. 在实际应用中,

波动越大代表干扰越大, 在这里选择 L 为 425 nm 作为谐振腔腔长, FWHM 为 10 nm.

3.3 最优结构参数及对应的性能评估

通过上述的讨论, 对 850, 1310, 1550 nm 常用通信波段做了分析, 如表 1 所列, 具体针对 850 nm, 最终设计的谐振腔增强型 GPD 器件的结构参数为 $d_{\text{Si}} = 62$ nm, $d_{\text{SiO}_2} = 140$ nm, 并分别采用三层、五层 SiO_2/Si 薄膜构成谐振腔顶层、底层反射镜, 使得 $R_t = 97.0\%$, $R_b = 99.8\%$, 谐振腔腔长 $L = 425$ nm, 最终器件响应度为 0.5 A/W, 且 FWHM 为 10 nm. 本文给出驻波效应下的最大响应度, 对于谐振腔内的光场分布, 可通过采用光学矩阵传输法 $A = 1 - R - T$ (A 表示吸收率, R , T 分别表示总传输矩阵的反射率和透射率)^[23] 求解吸收率, 从而计算出腔内有源层最大吸收的位置, 具体将另撰文详解.

也可通过采用外加偏压的方式, 加快载流子的迁移速度, 使产生更多光生载流子, 从而提高响应度, 但由于石墨烯与电极接触形成的高串联电阻却阻碍了响应度的提高, 测量值与理论值会存在一定误差, 因此在采用外加偏压方式时需对偏压大小进行定量分析. 理论分析表明, 通过谐振腔将入射光波限制在腔内, 发生多次反射穿过石墨烯有源层, 可增强 GPD 探测器的吸收.

参考文献

- [1] Yin W H, Han Q, Yang X H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 248502 (in Chinese) [尹伟红, 韩勤, 杨晓红 2012 物理学报 **61** 248502]
- [2] Geim A K, Novoselov K S 2007 *Nat. Mater.* **6** 183
- [3] Wallace P R 1947 *Phys. Rev.* **71** 622
- [4] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [5] Phaedon A 2010 *Nano Lett.* **10** 4285

- [6] Zhang Q H, Han J H, Feng G Y, Xu Q X, Ding L Z, Lu X X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 214209 (in Chinese) [张秋慧, 韩敬华, 冯国英, 徐其兴, 丁立中, 卢晓翔 2012 物理学报 **61** 214209]
- [7] Gao L, Guest J R, Guisinger N P 2010 *Nano Lett.* **10** 3512
- [8] Reina A, Son H, Jiao L Y, Fan B, Dresselhaus M S, Liu Z F, Kong J 2008 *J. Phys. Chem. C* **112** 17741
- [9] Zeng C, Guo J, Liu X M 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 121103
- [10] Chen Y L, Feng X B, Hou D D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 187301 (in Chinese) [陈英良, 冯小波, 侯德东 2013 物理学报 **62** 187301]
- [11] Xia F N, Mueller T, Lin Y M, Valdes-Garcia A, Avouris P 2009 *Nat. Nanotechnol.* **4** 839
- [12] Mueller T, Xia F, Avouris P 2010 *Nat. Photon.* **4** 297
- [13] Liu Y, Cheng R, Liao L, Zhou H L, Bai J W, Liu G, Liu L X, Huang Y, Duan X F 2011 *Nat. Commun.* **2** 579
- [14] Yu W J, Liu Y, Zhou H L, Yin A X, Li Z, Huang Y, Duan X F 2013 *Nature Nanotechnol.* **8** 952
- [15] Fang Z Y, Liu Z, Wang Y M, Pulickel M A, Peter N, Naomi J H 2012 *Nano Lett.* **12** 3808
- [16] Fromherz T, Mueller T 2013 *Nat. Photon.* **7** 892
- [17] Wang X M, Cheng Z Z, Xu K, Tsang H K, Xu J B 2013 *Nature Photon. SI* **7** 888
- [18] Gan X T, Shiue R J, Gao Y D, Meric I, Heinz T F, Shepard K, Hone J, Assefa S, Englund D 2013 *Nat. Photon.* **7** 883
- [19] Engel M, Steiner M, Lombardo A, Ferrari A C, Lohneysen H V, Avouris P, Krupke R 2012 *Nat. Commun.* **3** 906
- [20] Furchi M M, Urich A, Pospischil A, Lilley G, Unterrainer K, Detz H 2012 *Nano Lett.* **12** 2773
- [21] Zhou Y 2009 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [周勇 2009 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [22] Schaub J D, Li R, Campbell J C, Schow C L, Neudeck G W, Denton J 1999 *Photon. Technol. Lett.* **11** 1647
- [23] Ferreira A, Peres N M R, Ribeiro R M, Stauber T 2012 *Phys. Rev. B* **85** 115438
- [24] Pepeljugoski P, Kuchta D, Kwark Y, Pleunis P, Kuyt G 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 717

Design and performance analysis of microcavity-enhanced graphene photodetector^{*}

Liang Zhen-Jiang Liu Hai-Xia[†] Niu Yan-Xiong Yin Yi-Heng

(School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 28 January 2016; revised manuscript received 27 March 2016)

Abstract

There is an increasing interest in graphene photodetector for its applications, because graphene has rich optical and electronic properties, including zero band gap, high mobility and special optical absorption properties. A design of microcavity-enhanced photodetector based on ultra-thin graphene is proposed in this paper: detector absorption can be effectively improved by confining the light field in the microcavity. Through studying the light field resonant condition in the microcavity and enhanced mechanism of detector responsivity under resonant mode, the light absorption model of a microcavity-enhanced graphene photodetector under standing wave effect is established; it is analyzed that the influences of microcavity mirror reflectivity and length on detector performance are increased by light field. Further the optimal structure parameters and performance evaluations of microcavity-enhanced graphene photodetector at different incident wavelengths are demonstrated. Theoretical analysis shows that under the standing wave effect the effective absorption coefficient of monolayer graphene at the antinode is one multiple enlargement compared with no cavity; the microcavity length and topbottom mirror reflectivity directly affect the optical total phase during light folding back at one time in the microcavity, and the shift of the total optical phase changes the full width at half maximum (FWHM) of the responsivity of the microcavity-enhanced graphene photodetector. Through coordinating the relations among the microcavity length and reflectivities of two mirrors and the incident wavelength, it can be realized that the photodetector has a good characteristic of wavelength selectivity. At a nominal operating wavelength of 850 nm, the presented microcavity-enhanced graphene photodetector can reach a responsivity of 0.5 A/W, 32-fold increase compared with monolayer graphene photodetector with no cavity and FWHM can reach 10 nm, indicating that the designed photodetector has a high responsivity and a good characteristic of narrowband. As for the application in the practical engineering, through adopting bias on the two sides of graphene in the cavity to speed up the migration velocity of the photon-generated carrier, more photon-generated carriers are produced to increase the photodetector responsivity. However, the increased level of photodetector responsivity will be impeded actually on account of the high contact resistance between graphene and electrode, and the measured value will not equal the theoretical value, so the quantitative analysis on the value of the bias should be carried out. Through combining the microcavity with graphene the incident light can be confined to reflect multiple times between two mirrors in the microcavity to improve the graphene absorption, and then make the microcavity-enhanced graphene photodetector responsivity improved. Our approach can be used to improve the optical response of graphene photodetector, and provides a way to solve the trade-off between photodetector responsivity and response speed.

Keywords: cavity, graphene photodetector, responsibility, wavelength selectivity

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

DOI: 10.7498/aps.65.138501

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 7152089).

[†] Corresponding author. E-mail: liuhx08@buaa.edu.cn