

doi: 10.3788/gzxb20174607.0727002

含石墨烯二维金属结构中的自发辐射研究

任昊, 王胜, 王丽华, 许杰, 黄志祥, 吴先良

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

摘 要: 研究原子在金属结构中的自发辐射时引入单层石墨烯薄膜, 利用石墨烯特殊的光电特性来调控原子的自发辐射率. 推导了局态密度与自发辐射率的格林函数表示形式, 并结合频域有限差分方法进行数值模拟. 分析结果表明: 随着化学势的增大, 自发辐射波峰出现蓝移现象, 且自发辐射率波峰得到增强, 理论上实现了原子自发辐射率峰值位置与幅度的调制. 研究结果可以为新型纳米器件及光电子设备的制造和优化提供参考.

关键词: 量子光学; 自发辐射; 频域有限差分方法; 表面等离子共振; 格林函数; 石墨烯; 化学势

中图分类号: O441.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)07-0727002-8

Study on the Spontaneous Emission in a Two-dimensional Metal Structure with Graphene

REN Hao, WANG Sheng, WANG Li-hua, XU Jie, HUANG Zhi-xiang, WU Xian-liang

(Key Laboratory of intelligent Computing & Signal Processing, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: The monolayer graphene film was employed in the metal structures when researching the spontaneous emission of atoms. The spontaneous emission of atoms was controlled by the special photoelectric properties of graphene. The local density of electromagnetic states was numerically calculated with the electric dyadic Green's function through the finite-difference frequency-domain method. The results show that with the increase of chemical potential, spontaneous emission peak appears blue shift phenomenon and the spontaneous emission are enhanced. The tunability of the peak position and amplitude of the spontaneous emission of the atoms is theoretically achieved. The theoretical results can be used as references for the fabrication and optimization of novel nano-devices and optoelectronic devices.

Key words: Quantum optics; Spontaneous emission; Finite-difference frequency-domain method; Surface plasmon resonance; Green's function; Graphene; Chemical potential

OCIS Codes: 270.5580; 240.6680; 160.4236; 160.3918

0 引言

自发辐射光的控制一直都是量子光学领域的一项重点, 原子自发辐射率的提高对于发光二极管、太阳能电池等光学设备的研究与制备有着重要的意义. Purcell 首先发现磁偶极子在共振的电子设备中的衰减率比在自由空间的衰减率有所提高, 并预言处于激发状态的原子或者分子所处的外部环境能够调制其自发辐射率^[1], 其实质是通过改变原子跃迁频率附近的局态密度来增强或抑制自发辐射. 随后关于如何对原子或者分子的自发

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61471001, 51277001, 61601166), 安徽自然科学基金(No. KJ2015A202)和安徽高校自然科学研究重大项目(No. KJ2017ZD51, KJ2017ZD02) 资助

第一作者: 任昊(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与电磁波. Email: 410736009@qq.com

通讯作者: 黄志祥(1978—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为纳米技术. Email: zxhuang@ahu.edu.cn

导 师: 吴先良(1958—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为数字光信息处理及数字全息术. Email: xlwu@ahu.edu.cn

收稿日期: 2017-02-17; **录用日期:** 2017-04-13

<http://www.photon.ac.cn>

辐射进行控制得到了越来越多科学工作者的关注. 当半导体发射源与金属平板的表面等离极化激元 (Surface Plasmon Polariton, SPP) 耦合时, 其局域态密度会发生改变^[2-3]. 由表面等离子激元耦合而增强的自发辐射已经在量子阱激光器中得到论证^[4-5]. 然而, 金属的性质与结构决定了自发辐射率的波峰位置与大小.

石墨烯是指单层石墨层片, 厚度约为 0.335 nm, 仅有一个原子尺寸厚, 是由杂化的碳原子紧密排列而成的蜂窝状晶体结构. 自 2004 年英国曼彻斯特大学物理学家康斯坦丁·诺沃肖洛夫等通过简单胶带粘撕法得到高品质的石墨烯之后^[6], 在材料、物理、化学、力学等学科引起了广泛的关注和讨论. 尤其是石墨烯特殊的光电特性, 使得石墨烯可以构建在太赫兹波到近红外光谱的高度集成表面 SPP 器件平台的材料^[7]. SPP 是在金属与介质表面传输的电磁波, 与传统的金属 SPP 相比, 石墨烯 SPP 具有很大的优点^[8]. 首先, 石墨烯 SPP 工作在太赫兹到近红外光谱上, 这个范围的光谱在通信、医疗等领域具有广泛的应用^[9-10]; 其次, 石墨烯的光电特性可以通过门电路或者化学掺杂的方法灵活调节. 通过加电压、化学掺杂等方法改变石墨烯载流子的浓度, 从而改变石墨烯的费米能级, 即可以利用不同的化学势来调节自发辐射率波峰的位置.

本文利用频域有限差分 (Finite-Difference Frequency-Domain, FDFD) 方法^[11], 求解二维非均匀环境下电磁问题的并矢格林函数, 研究了石墨烯加在金属板上对自发辐射率的影响. 根据 Kubo 公式, 得到石墨烯的介电常量与电导率. 改变化学势的大小^[12], 从而改变自发辐射率峰值的位置, 并与未加石墨烯的结构相比较, 发现自发辐射率有了很大的提升并实现了波峰位置可调谐.

1 石墨烯的光电特性

石墨烯的能带结构特点以及极薄的结构尺寸, 导致其具有显著的电场效应和霍尔效应. 理想的石墨烯是零带隙的二维半导体结构, 它的电导率受到电场或磁场偏置的控制. 理论和实验数据表明, 在电磁光谱中, 石墨烯具有二维复电导率即

$$\sigma_c = \sigma_r + j\sigma_i \quad (1)$$

式中, σ_r 分 σ_i 别表示石墨烯电导率的实部与虚部. 石墨烯的电导率与工作频率 ω , 化学势 μ_c , 温度 T 和带电粒子散射率 Γ 有关. 计算石墨烯的电导率公式来自 Kubo 方程^[13], 其表达式为

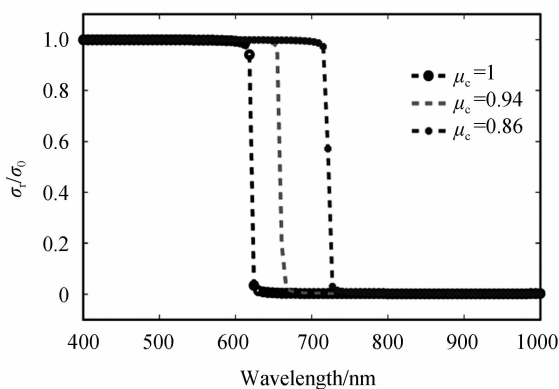
$$\sigma_c(\mu_c(E_0)) = \frac{je^2(\omega - j2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \times \left[\frac{1}{(\omega - j2\Gamma)^2} \int_0^\infty \epsilon \left(\frac{\partial f_d(\epsilon)}{\partial \epsilon} - \frac{\partial f_d(-\epsilon)}{\partial \epsilon} \right) d\epsilon - \int_0^\infty \frac{f_d(-\epsilon) - f_d(\epsilon)}{(\omega - j2\Gamma)^2 - 4(\epsilon/\hbar)^2} d\epsilon \right] \quad (2)$$

式中, $f_d(\epsilon) = (e^{(\epsilon - \mu_c)/k_B T} + 1)^{-1}$ 为费米-狄拉克分布, ϵ 为入射波的能量, $\hbar = h/2\pi$ 约化普朗克常量, e 为电荷, k_B 是玻尔兹曼常量. 石墨烯的电导率分为两部分, 式(2)中第一项为带内电子-光子作用下的散射分布, 第二项为带间电子传输分布. 带内部分和带间部分公式^[13]可以简化为

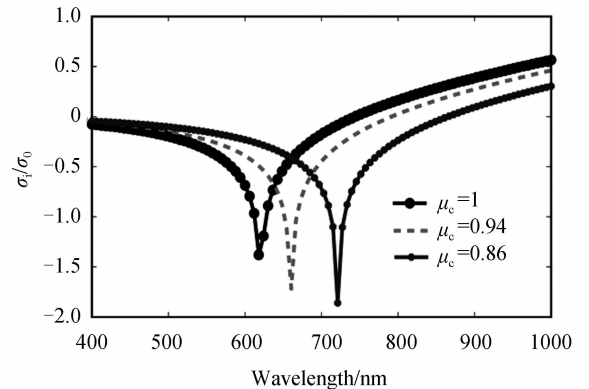
$$\sigma_{d, \text{intra}} = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi\hbar^2 (\omega - j2\Gamma)} \left(\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right) \quad (3)$$

$$\sigma_{d, \text{inter}} \approx \frac{-je^2}{4\pi\hbar} \ln \left(\frac{2|\mu_c| - (\omega - j2\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega - j2\Gamma)\hbar} \right) \quad k_B T \ll |\mu_c| \quad (4)$$

式中, 石墨烯电导率带内部分的虚部符号为负号, 带间部分的虚部符号为正号. 当频率 $\omega \ll 2\mu_c/\hbar$ 时, 带间部分可以忽略, 带内部分占主导部分; 然而当 $\epsilon \approx 2\mu_c/\hbar$ 时, 带间部分的作用不能忽略^[14]. 根据式(3)、(4)得石墨烯电导率的实部和虚部随化学势 μ_c 和温度 T 的变化如图 1 所示. 图中的入射波波长为 400 nm 至 1 000 nm.



(a) The real part varies with μ_c



(b) The imaginary part varies with μ_c

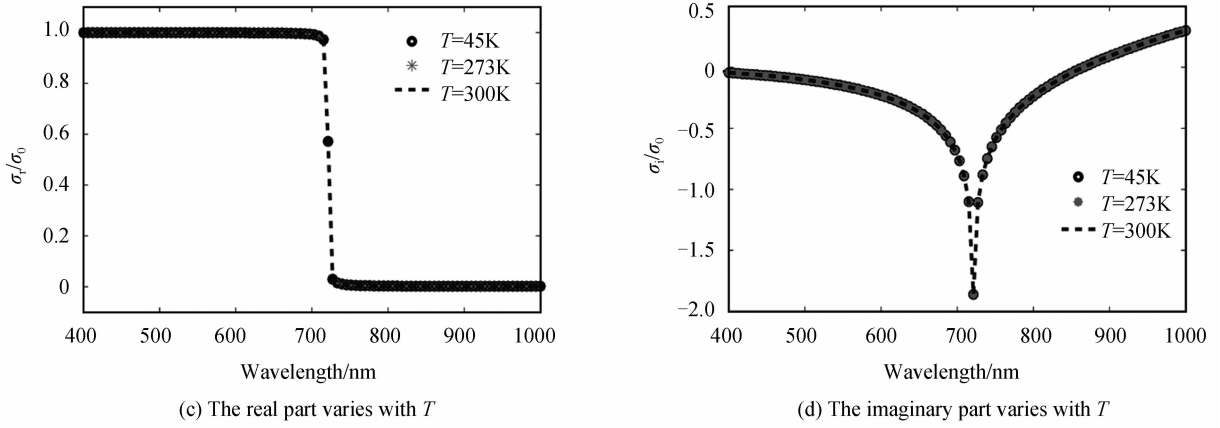


图 1 石墨烯电导率变化趋势

Fig. 1 The change trend of the graphene conductivity

在图 1(a)、(b)中, $T=300\text{ K}$, 当 μ_c 从 0.86 eV 增大到 1 eV 时, 石墨烯电导率的频率蓝移, 跃变位置也发生偏移. 在图 1(c)、(d)中, $\mu_c=0.86\text{ eV}$ 时温度从 45 K 上升到 300 K , 电导率虚部变化不明显.

在对自发辐射率的研究中, 可将石墨烯的电导率等效为复相对介电常量, 即

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 + j\sigma_c / \omega\epsilon_0 d \quad (5)$$

ϵ_0 表示真空中的介电常量, d 表示石墨烯的等效厚度. 基于石墨烯的多层薄膜结构介电常量表达式^[15]为

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{d_2}{d_1 + d_2} / \epsilon_2 + \frac{d_1}{d_1 + d_2} / \epsilon_1 \right)^{-1} \quad (6)$$

式中, d_1 、 d_2 分别表示上下两层石墨烯的等效厚度. 根据式(6), 得出石墨烯复介电常量的实部与虚部随化学势 μ_c 和层厚 d 的变化如图 2 所示.

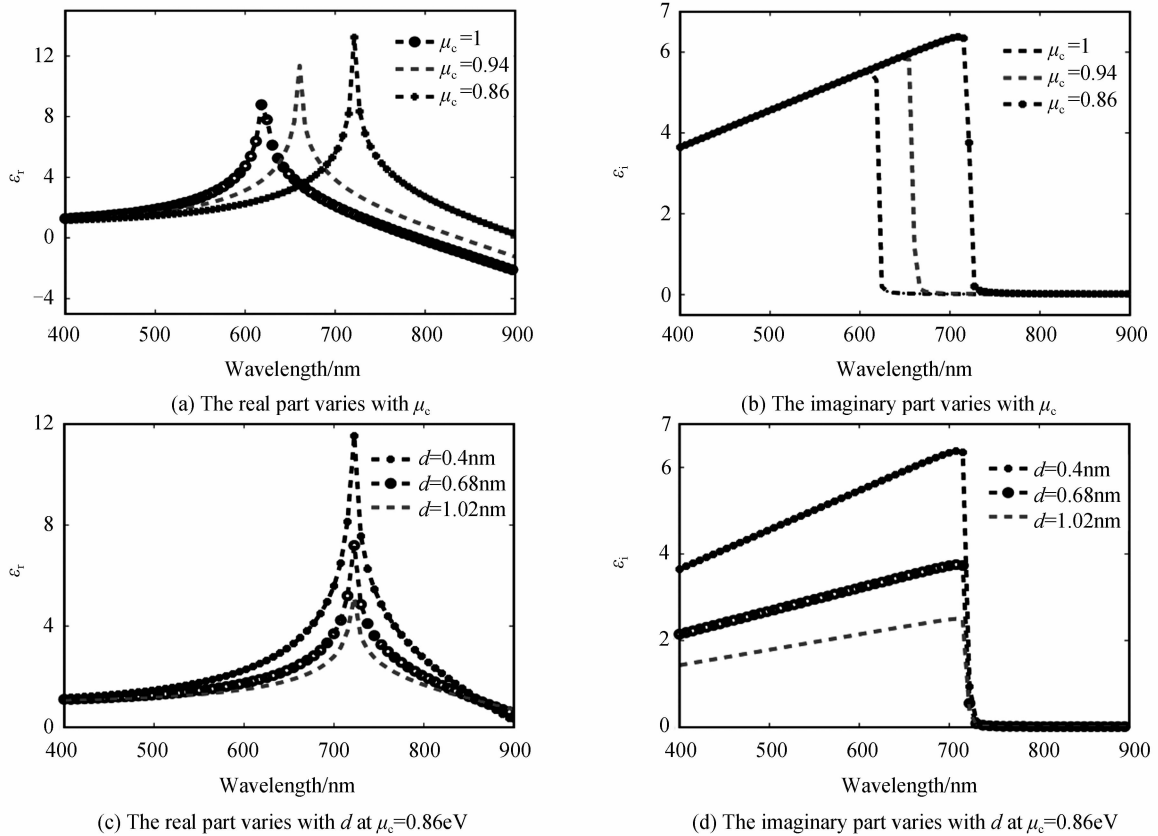


图 2 石墨烯介电常量变化趋势

Fig. 2 The change trend of graphene dielectric constant

从图 2(a)、(b)可知, 改变化学势 μ_c 的大小, 石墨烯介电常量的实部和虚部会随之发生变化. 从图 2(c)、

(d)可知,石墨烯的层厚 d 从 0.4nm 增加到 1.02 nm,其介电常量的实部和虚部值变小,峰值位置没有发生改变.因而,改变石墨烯的层厚,不会影响设计结构的光吸收和频率峰位置.综上所述,在室温下,可以固定石墨烯的等效层厚为 0.4 nm,在金属板中加入单层石墨烯薄膜,利用其光电特性,对自发辐射率峰值位置以及大小进行调节.

2 理论基础

根据电磁场的真空涨落理论,在非均匀介质中的原子或分子会自发的向外辐射光子.一个位于 r_0 二能级系统的原子,其跃迁偶极距和跃迁频率分别为 p 和 ω_0 ,由费米黄金定则可知,原子的自发辐射率 (Spontaneous Emission Rate, SER)^[16] 可以表示为

$$\gamma(r_0, \omega_0) = \frac{\pi\omega_0}{\epsilon_0 \hbar} \sum_k (p \cdot (u_k u_k^*)) \cdot p \delta(\omega_k - \omega_0) \quad (7)$$

式中 $u_k(r_0, \omega_0)$ 是光子在非均匀介质中的标准正交的本征模,使用本征函数展开技术,电并矢格林函数可以表示为正交本征模的集合,即

$$\text{Im}[\overline{G}(r, r', \omega_0)] = \frac{\pi c^2}{2\omega_0} \sum_k u_k(r, \omega_k) u_k^*(r', \omega_k) \delta(\omega_k - \omega_0) \quad (8)$$

将式(8)带入式(7),可得自发辐射率为

$$\gamma(r_0, \omega_0) = \frac{2\omega_0^2}{\epsilon_0 \hbar c^2} [p \cdot \text{Im}[\overline{G}(r_0, r_0, \omega_0)] \cdot p] \quad (9)$$

当量子系统的跃迁为无定向的偶极子且介质是各向同性的,则取各个方向的平均值,得到

$$\gamma(r_0, \omega_0) = \frac{2\omega_0^2 |p|^2}{3\epsilon_0 \hbar c^2} \text{Im}\{\text{Tr}[\overline{G}(r_0, r_0, \omega_0)]\} \quad (10)$$

平均后的局域态密度为

$$\rho(r_0, \omega_0) = \frac{2\omega_0}{\pi c^2} \text{Im}\{\text{Tr}[\overline{G}(r_0, r_0, \omega_0)]\} = \sum_k |u_k|^2 \delta(\omega_k - \omega_0) \quad (11)$$

为了计算自发辐射的增强幅度,引入标准化的 SER

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{\rho(r_0, \omega_0)}{\rho_0(r_0, \omega_0)} = \frac{\text{Im}\{\text{Tr}[\overline{G}(r_0, r_0, \omega_0)]\}}{\text{Im}\{\text{Tr}[\overline{G}_0(r_0, r_0, \omega_0)]\}} \quad (12)$$

\overline{G}_0 表示自由空间中的格林函数.

自由空间的电并矢函数可以表示成三个方向的叠加,形式为

$$\overline{G}_0(r, r') = G_x(r, r') \overline{a}_x + G_y(r, r') \overline{a}_y + G_z(r, r') \overline{a}_z \quad (13)$$

其中各个方向的分量都满足波动方程

$$\nabla \times \nabla \times G_\xi(r, r') - k_0^2 G_\xi(r, r') = \overline{a}_\xi \delta(r - r') \quad (14)$$

式中 $\overline{a}_\xi \delta(r - r')$, $\xi = x, y, z$ 表示位于的分别沿着方向极化的狄拉克点源,为自由空间的波数.对于 z 不变的二维问题,这里可以看成是一个线源,而二维电并矢格林函数可以简化为

$$\overline{G}_0(r, r') = \begin{vmatrix} G_{xx} & G_{yx} & 0 \\ G_{xy} & G_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & G_{zz} \end{vmatrix} \quad (15)$$

求解 G_{zz} 可通过 E_z 场满足的标量波动方程实现^[17],即

$$\begin{cases} \nabla^2 E_z + k_0^2 E_z = -j\omega\mu_0 J_z = -\delta \\ \delta = \delta(x-x')\delta(y-y') \\ E_z = E_z(x, y) \end{cases} \quad (16)$$

类似地, G_{xx} 和 G_{yy} 可以通过 H_z 的场求得,其满足的标量波动方程为

$$\nabla^2 H_z + k_0^2 H_z = \frac{\partial J_x}{\partial y} = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial \delta}{\partial y} \quad (17)$$

$$\nabla^2 H_z + k_0^2 H_z = \frac{\partial J_y}{\partial x} = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial \delta}{\partial x} \quad (18)$$

式中的 $\frac{\partial \delta}{\partial y}$ 和 $\frac{\partial \delta}{\partial y}$ 分别表示沿 x 方向和沿 y 方向的偶极子源,通过求解式(17)、(18),即可得到 H_z 的值. G_{xx} 是由 x 方向极化的偶极子源产生的电场 E_x ,即

$$G_{xx} = E_x = \frac{1}{k_0^2} \left(j\omega\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial y} - \delta \right) \quad (19)$$

同理可得 G_{yy} 为

$$G_{yy} = E_y = \frac{1}{k_0^2} \left(j\omega\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial x} - \delta \right) \quad (20)$$

由上述分析可知,求解格林函数的问题最终还要回归到求解赫姆赫兹方程.实际应用中光波段材料具有色散特性,而 FDFD 方法的特点是可直接利用实验得到的复介电常量,该方法非常适用于色散媒质的电磁仿真^[18],正因如此,本文采用 FDFD 方法来数值离散赫姆赫兹方程.对于具体二维自发辐射问题,主要计算步骤如下:首先利用 FDFD 方法求解赫姆赫兹方程,得到介质中的场,然后利用场与格林函数间的转换关系,得到具体的数值格林函数.在模拟过程中,涉及到截断边界,在此本文采用的是基于复坐标拉伸完全匹配^[19-21].

3 数值算例及结果分析

3.1 FDFD 算法验证

为了验证 FDFD 算法的准确性,首先考虑二维线源辐射问题.结果如图 3、4 所示,图中线源的位置为 $x=0, y=0$,图 3 表示 y 方向极化的偶极子源产生的 E_y 场的虚部,图 4 表示 z 方向极化的偶极子源产生的 E_z 场的虚部.结果显示基于 FDFD 方法的数值结果与解析解吻合较好,验证了 FDFD 方法的有效性.

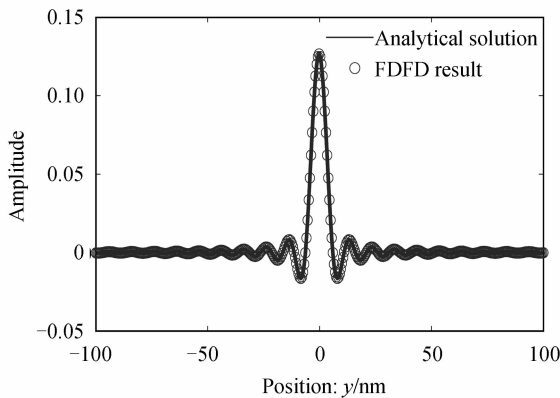


图 3 由 y 方向极化的偶极子源产生的电场虚部
Fig. 3 The imaginary part of electric field generated by an y -polarized dipole source

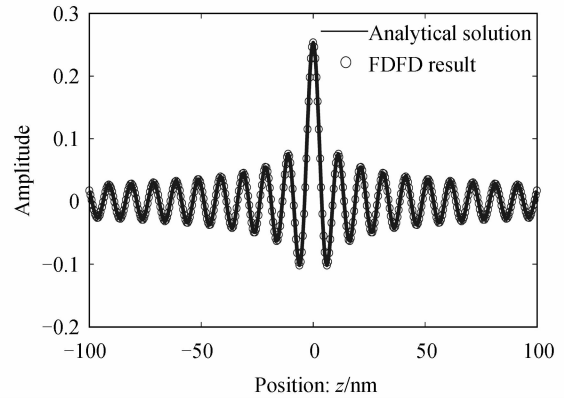


图 4 由 z 方向极化的偶极子源产生的电场虚部
Fig. 4 The imaginary part of electric field generated by an z -polarized dipole source

3.2 结构仿真与理论验证

图 5 为金双板纳米结构,平板宽 w_1 为 100 nm,长 w 为 40 nm,板间距为 d ,原子位于一对平板组成的腔

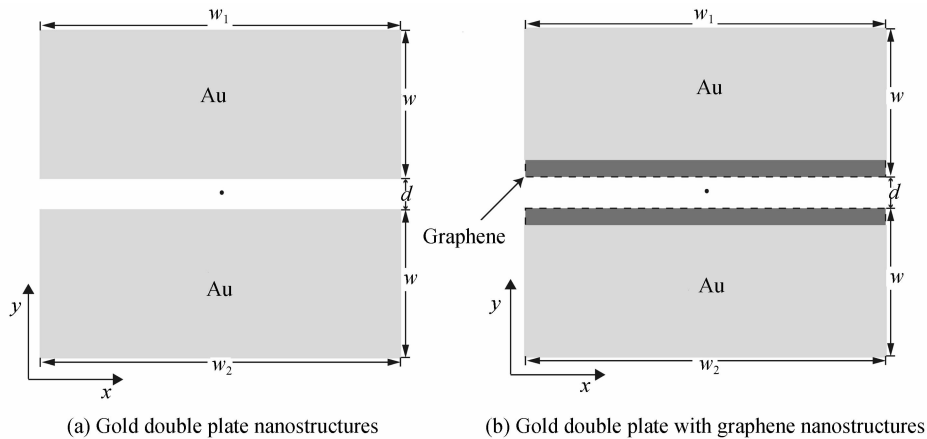


图 5 金属板的纳米结构图
Fig. 5 Model for the nanopatterned metal plate structures

的中心处.图 5 (a)表示没有考虑石墨烯时的平板结构,图 5 (b)表示在图 5 (a)的基础上加了厚度为 0.4 nm 的单层石墨烯.

为研究不同结构对自发辐射的影响,图 6 给出了原子在含石墨烯金属单双板结构下自发辐射率对比曲线图.从图 6 可知当石墨烯化学势为、 $d=10$ nm 时,双板中自发辐射率达到 1 600,单板中的自发辐射率为 250.双板结构下的原子自发辐射率与单板相比显著提高,当原子靠近金属板的时候自发辐射逐渐增强.

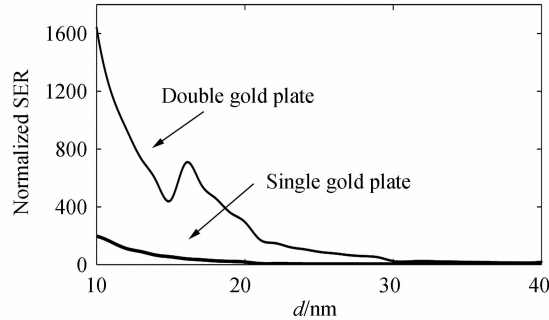


图 6 金单板和双板加石墨烯不同距离 d 下的自发辐射(跃迁波长为 545 nm)

Fig. 6 The normalized SER as a function of the distance between the atoms and the gold plates with graphene(the transition frequency of the atom is set to be 545 nm)

由图 6 的结果发现不同的金属结构对自发辐射有较大的影响,但由于金属结构的局限性,很难实现自发辐射率在不同频段的自由调节,因此利用石墨烯薄膜特殊的光电特性调节自发辐射的大小和波峰位置.图 7 给出了含石墨烯双层金属板结构在不同化学势下对自发辐射率的影响,其中图 7 中的插图原子在不含石墨烯金属双板时自发辐射率.由图 7 插图可知,在不含石墨烯金属双板时的自发辐射率波峰在 380 左右,当跃迁波长为 600~800 nm 时,其自发辐射率较低.在结构中加入石墨烯后,一方面自发辐射率波峰得到很大的增强,这主要是因为石墨烯与金板之间发生了耦合,产生了表面等离子共振.当化学势时,在跃迁波长为 545 nm 波峰达到 1 550 左右,在不含石墨烯金属双板时的自发辐射率波峰在 400 左右.说明介质-石墨烯-金属的结构产生的表面等离极化激元的束缚性比仅有介质-金属的结构产生的表面等离极化激元好.另一方面在化学势由增加到时,自发辐射率的峰值发生蓝移,其原因是石墨烯特殊的光电特性改变了金属与石墨烯分界面处的表面等离子体的谐振频率,导致自发辐射率波峰位置发生变化.

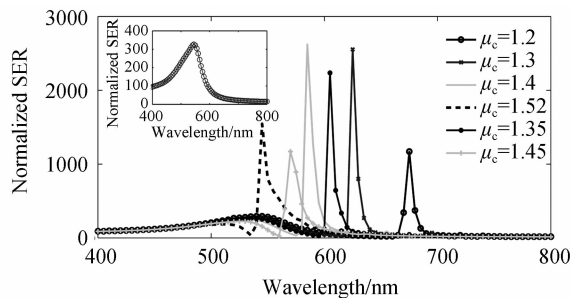


图 7 未含石墨烯与加石墨烯结构下的自发辐射率(插图表示未加石墨烯金属双板时的自发辐射率)

Fig. 7 The normalized SER as a function of the transition wavelength for gold plate and gold plate with graphene (the iconography shows the SER of the non-graphene metal double plate)

根据现有的技术石墨烯载流子的浓度可以达到 10^{14} cm^{-2} [22-23] 此时对应的化学势约为 1.17 eV,本文在理论上分析了化学势在 1.35~1.5 eV 时石墨烯对自发辐射的影响,考虑到现有的技术,图 8 给出化学势在 0.92~1 eV 时石墨烯对自发辐射的影响,插图为石墨烯实部随化学势变化趋势图.此时,在 700~800 nm 波段,自发辐射的增强主要和石墨烯-金属间的耦合有关,自发辐射率波峰变化趋势与石墨烯实部随化学势变化趋势相似,它们都随着化学势的减小而增大.

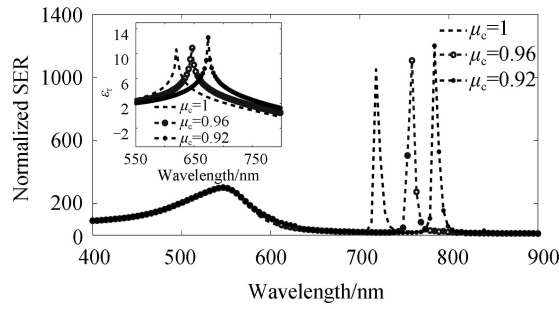


图8 含石墨烯结构下的自发辐射率(插图表示石墨烯介电常量实部随 μ_c 变化)

Fig. 8 The normalized SER as a function of the transition wavelength for gold plate with graphene (the iconography shows graphene dielectric constant real part varies with μ_c)

为进一步研究其内在物理机理,本文给出了在波长为 545 nm 时,两种结构下的电场虚部的分布.图 9(a)、(b)分别为图 5 中结构一、结构二的 $\text{Im}(E_y)$ 分布,图 9(c)、(d)分别为金属单板无石墨烯和含石墨烯结构 $\text{Im}(E_y)$ 分布.从图中可以观察到,在石墨烯与金板分界面处,由于金与石墨烯间发生了耦合,激发了表面等离子共振,从而增强了电场 $\text{Im}(E_y)$.

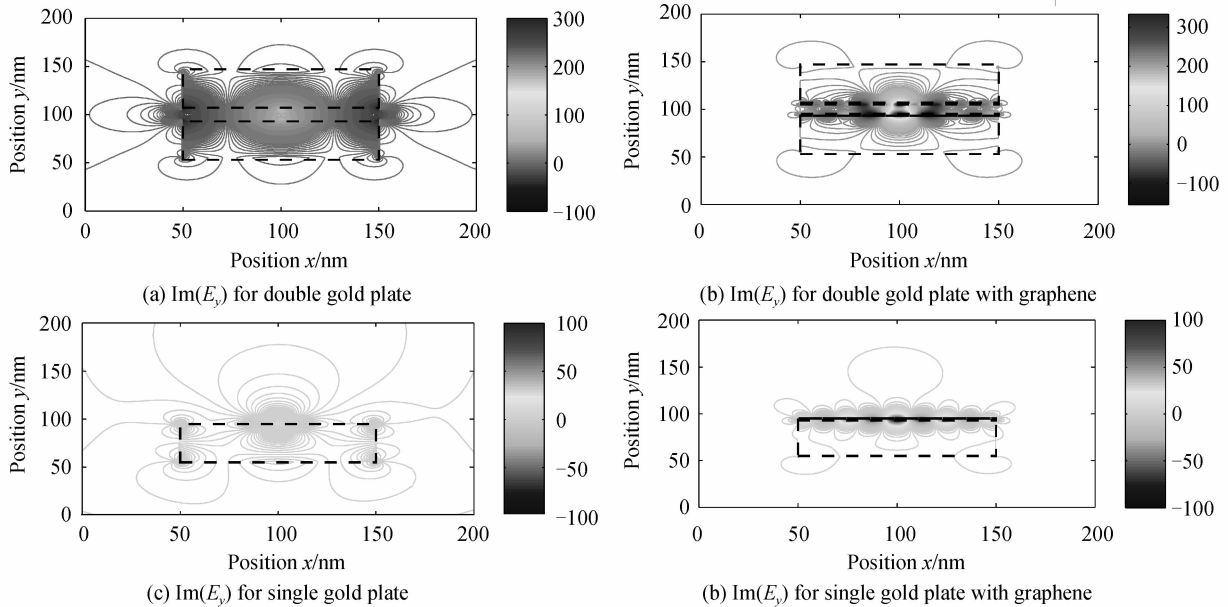


图9 不同结构下的 $\text{Im}(E_y)$ 分布图(跃迁波长为 545 nm)

Fig. 9 Distribution of $\text{Im}(E_y)$ under different structures (the transition frequency of the atom is set to be 545 nm)

4 结论

利用石墨烯特殊的光电特性,采用高效的 FDFD 算法模拟了石墨烯对自发辐射率峰值以及位置的影响.结果表明因石墨烯与金板在分界面上发生耦合,产生表面等离子共振,极大增强了自发辐射率.同时,通过调节石墨烯化学势的大小,可以改变分界面表面等离子谐振频率,从而使得自发辐射率峰值的位置发生改变.论文的结果可以为新型纳米器件和光电子设备的加工与制造提供理论基础.

参考文献

- [1] GAO Yong-yi, ZHONG Hui, ZHOU Ren-long, *et al.* Plasma resonance and optical forces between two ellipsoidal silver nanowires[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1331-1334.
高永毅,钟慧,周仁龙,等.基于表面等离子共振效应的椭圆柱银纳米线的光力研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1331-1334.
- [2] NEOGI A, LEE C W, EVERITT O H, *et al.* Enhancement of spontaneous recombination rate in a quantum well by resonant surface plasmon coupling[J]. *Physical Review B*, 2002, **66**(15): 153305.
- [3] SUN G, KHURGIN J B, SOREF R A. Surface plasmon-assisted laser cooling of solids[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **98**(17): 177401.

- [4] OKAMOTO K, NIKI I, SHVARTSER A, *et al.* Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaN quantum wells[J]. *Nature Materials*, 2004, **3**(6): 601-605.
- [5] WALTHER C, SCALARI G, AMAMTI M I, *et al.* Microcavity laser oscillating in a circuit-based resonator[J]. *Science*, 2010, **327**(14): 1495-1497.
- [6] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, **306**(5696): 666-669.
- [7] YIN Wei-hong, HAN Qin, YANG Xiao-hong. The progress of semiconductor photoelectric devices based on graphene[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(24): 245802.
尹伟红, 韩勤, 杨晓红. 基于石墨烯的半导体光电器件研究进展[J]. *物理学报*, 2012, **61**(24): 245802.
- [8] SHENG Shi-wei, LI Kang, KONG Fan-min, *et al.* Tooth-shaped plasmonic filter based on graphene nanoribbon [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(10): 108402.
盛世威, 李康, 孔繁敏. 基于石墨烯纳米带的齿形表面等离子体激元滤波器的研究[J]. *物理学报*, 2015, **64**(10): 108402.
- [9] XIE Ling-yun, XIAO Wen-bo, HUANG Guo-qing, *et al.* Terahertz absorption of graphene enhanced by one-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(5): 057803.
谢凌云, 肖文波, 黄国庆, 等. 光子晶体增强石墨烯 THz 吸收[J]. *物理学报*, 2014, **63**(5): 057803.
- [10] LIU Yan-qing, ZHANG Yu-ping, ZHANG Hui-yun, *et al.* Study on the gain characteristics of terahertz surface plasma in optically pumped graphene multi-layer structures [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(7): 075201.
刘亚青, 张玉萍, 张会云, 等. 光抽运多层石墨烯太赫兹表面等离子体增益特性的研究[J]. *物理学报*, 2014, **63**(7): 075201.
- [11] RAO V, HUGHES S. Numerical study of exact Purcell factors in finite-size planar photonic crystal waveguides[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(14): 1587-1589.
- [12] SIMSEK E. Graphene in layered medium applications[J]. *Optical Technology Letters*, 2013, **55**(10): 2293-2296.
- [13] HANSON G W. Dyadic green's and guided surface wave for a surface conductivity model of graphene [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103**(6): 064302-064302.
- [14] VAHID N, MOHAMMAD S, OMAR M, *et al.* Wideband modeling of graphene using the finite-difference time-domain method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, **61**(12): 6107-6114.
- [15] XU Jie, ZHOU Li, HUANG Zhi-xiang *et al.* Study on the absorbing properties of critically coupled resonator with graphene[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(23): 238103.
徐杰, 周丽, 黄志祥, 等. 含石墨烯临界耦合谐振器的吸收特性研究[J]. *物理学报*, 2015, **64**(23): 238103.
- [16] NOVOTNY L. Principles of nano-optics[M]. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [17] QI Jian-nan, HUANG Zhi-xiang, WANG Han-lin, *et al.* Systematic study of FDFD method for spontaneous emission in a two-dimensional environment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 116002.
齐剑南, 黄志祥, 王翰林, 等. 基于频域有限差分法的二维自发辐射特性研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 116002.
- [18] CHEW W C. Waves and fields in inhomogeneous media[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [19] BERENGER J P. Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 1996, **127**(2): 363-379.
- [20] CHEN X W, CHOY W C H, LIANG C J, *et al.* Modifications of the exciton lifetime and internal quantum efficiency for organic light-emitting devices with a weak/strong microcavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(22): 221112.
- [21] CHEW W C, JIN J M, MICHIELSSEN E. Complex coordinate stretching as a generalized absorbing boundary condition[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1997, **15**(6): 363-369.
- [22] EFETOV D K, KIM P. Controlling electron-phonon interaction in graphene at ultrahigh carrier densities [J]. *Physical Review Letters*, 2010, **105**(25): 256805.
- [23] CHEN C, PARK C, BOUDOURIS B W, *et al.* Controlling inelastic light scattering quantum pathways in graphene [J]. *Nature*, 2011, **471**(7341): 617-620.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61471001, 51277001, 61601166), the Natural Science Foundation of Anhui Province (Nos. KJ2015A202) and the Scientific Research Foundation of the Higher Education Institutions of Anhui Province, China (Nos. KJ2017ZD51, KJ2017ZD02)