

基于导模共振效应提高石墨烯表面等离子体的局域特性

李志全 张明 彭涛 岳中 顾而丹 李文超

Improvement of the local characteristics of graphene surface plasmon based on guided-mode resonance effect

Li Zhi-Quan Zhang Ming Peng Tao Yue Zhong Gu Er-Dan Li Wen-Chao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 105201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.105201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.105201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹波段石墨烯等离子体的增益特性

[Gain characteristics of grapheme plasmain terahertz range](#)

物理学报.2016, 65(1): 015201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.015201>

高压空气环状感性耦合等离子体实验研究和参数诊断

[Experimental investigation and parameter diagnosis of air high-pressure ring-shaped inductively coupled plasma](#)

物理学报.2015, 64(17): 175201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.175201>

光抽运多层石墨烯太赫兹表面等离子体增益特性的研究

[Study on the gain characteristics of terahertz surface plasma in optically pumped graphene multi-layer structures](#)

物理学报.2014, 63(7): 075201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.075201>

氘在碳钨共沉积层中的滞留行为研究

[Deuterium retention in carbon-tungsten co-deposition layers prepared by RF magnetron sputtering](#)

物理学报.2013, 62(19): 195202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.195202>

N<sub>2</sub> 微空心阴极放电特性及其阴极溅射的 PIC/MC 模拟

[Simulation of N<sub>2</sub> microhollow cathode discharge and cathode sputtering by using a PIC/MC model](#)

物理学报.2013, 62(7): 075201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.075201>

# 基于导模共振效应提高石墨烯表面等离子体的局域特性\*

李志全<sup>1)†</sup> 张明<sup>1)</sup> 彭涛<sup>1)</sup> 岳中<sup>1)</sup> 顾而丹<sup>1)</sup> 李文超<sup>2)</sup>

1)(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

2)(东北大学秦皇岛分校控制工程学院, 秦皇岛 066004)

(2016年1月10日收到; 2016年3月3日收到修改稿)

本文构建了一种包含石墨烯和亚波长光栅的复合结构, 借助衍射光栅的导模共振效应, 在石墨烯表面激发高局域性表面等离子体激元, 研究了石墨烯与光栅结构对表面等离子体激元局域特性的影响规律, 并借助基于有限元法的COMSOL软件, 分析了缓冲层厚度、光栅周期、载流子迁移率和费米能级对石墨烯的表面电场、品质因子 $Q$ 和有效模式面积 $S_{\text{eff}}$ 的影响. 结果表明, 石墨烯表面等离子体激元的局域性在特定的参数点获得显著提高: 当 $\mu = 0.7 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 时, 品质因子达到最大值 $Q_{\text{max}} = 1793$ ; 当 $p = 235 \text{ nm}$ 或 $E_{\text{F}} = 0.72 \text{ eV}$ 时, 表面电场达到了入射光的3000倍以上. 强烈的局域性导致强烈的光-物质相互作用, 因而本文提出的复合结构可实现高灵敏度传感器和高效率的非线性光学设备, 极大地扩展了石墨烯在纳米光学领域中的应用.

**关键词:** 石墨烯, 表面等离子体, 亚波长衍射光栅, 导模

**PACS:** 52.25.-b, 52.40.Hf, 42.40.Lx, 42.79.Gn

**DOI:** 10.7498/aps.65.105201

## 1 引言

表面等离子体激元(surface plasmon polaritons, SPPs)是一种非辐射表面模式, 可突破衍射极限的限制, 将光控制在亚波长尺度内<sup>[1,2]</sup>. 激发与传播SPPs最常用的材料是金、银、铜、铝等金属<sup>[3]</sup>, 但是由于欧姆损耗和热辐射, 这些金属材料将产生严重的能量损耗. 石墨烯也可以支持SPPs的传播<sup>[4,5]</sup>, 并且同传统的金属材料相比, 石墨烯SPPs高度局域性和电可调节特性使其拥有更广阔的应用前景<sup>[6-10]</sup>.

对于石墨烯上SPPs传播的研究: 2009年, Jablan<sup>[11]</sup>首次对石墨烯SPPs的二维传输特性进行了理论研究, 分析了影响传输的声子散射因素; 2011年, Chen小组<sup>[12]</sup>利用光抽运单层石墨烯产生SPPs, Dubinov<sup>[13]</sup>完成了对光抽运SPPs的传播系数和吸收系数的研究; Vakil小组<sup>[14]</sup>通过电抽

运不同形状的石墨烯使产生的SPPs具有不同特性; 2012年来自西班牙的Chen<sup>[15]</sup>和来自美国的Fei<sup>[16]</sup>借助散射式红外近场显微镜, 首次直接观测到了石墨烯SPPs.

尽管石墨烯只有一个碳原子的厚度, 但是在THz和红外波段与光有很强的相互作用<sup>[17]</sup>, 这种作用使得石墨烯SPPs的共振峰值比传统二维电子系统大很多<sup>[18,19]</sup>. 研究表明, 即使是一片不做任何结构的单层石墨烯, 当有THz及红外波段的电磁波垂直照射时, 入射波与石墨烯相互作用产生SPPs<sup>[20]</sup>, 并且对各个频率点都有一定的吸收效果. 但是由于不具备频率选择而且共振幅度不大, 为了实现具有一定频率选择性或者光学性质的器件, 需要将石墨烯设计成一定的结构. 2011年, Long等<sup>[21]</sup>首次研究了THz波段石墨烯条带周期结构对SPPs共振的调控, 通过改变石墨烯周期条带的宽度和石墨烯费米能级来调节SPPs共振频率点.

\* 河北省百人计划(批准号: 4570018)和河北省自然科学基金(批准号: F2014501150)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

美国 Xia 等 [22] 实现了石墨烯纳米盘型周期阵列对 SPPs 的调控, 并且通过在石墨烯下面加缓冲层的方法实现了石墨烯堆叠层数的增加. 但是, 将石墨烯加工成微纳米结构的光刻过程会严重降低石墨烯的载流子迁移率 [23,24], 导致 SPPs 的传播损耗增加、品质因子降低, 因此将石墨烯加工成周期结构无法显著提高 SPPs 的共振强度. 复合结构中的光栅结构用来完成入射光和 SPPs 的相位匹配, 当光栅结构所产生的某一衍射波与石墨烯支持的表面等离子体模式位相匹配时, 表面等离子体共振现象就发生了. 而导模共振 [25] 指的是对于入射光频率或者入射角等物理参数的一个微小改变, 而引起衍射波电磁场发生突变导致能量重新分布的现象. 其作用是在特定的频率点处, 极大地增强光栅衍射场的强度.

本文提出的石墨烯/缓冲层/光栅复合结构借助导模共振效应, 在单层连续的石墨烯表面激发 SPPs, 通过保持石墨烯的结构完整性极大地保持了石墨烯本身的高载流子迁移率; 采用基于有限元法的 COMSOL 软件, 在频域模块内对缓冲层厚度  $T_2$ 、光栅周期  $p$ 、载流子迁移率  $\mu$ 、费米能级  $E_F$  进行参数化扫描; 研究了不同参数对石墨烯 SPPs 的作用规律, 找到满足导模共振条件的参数组合, 从而全面提高石墨烯 SPPs 的局域特性.

## 2 结构与理论研究

### 2.1 石墨烯/缓冲层/光栅复合结构

石墨烯/缓冲层/光栅复合结构如图 1 所示, 最上面的薄层为石墨烯, 厚度为 0.5 nm; 最下面一层为  $\text{SiO}_2$  构成的亚波长衍射光栅, 其中光栅周期为  $p$ , 光栅脊宽度为  $w$  ( $w = 0.5p$ ), 凹槽深度为  $T_1$ ; 中间的是由低折射率绝缘材料填充的缓冲层, 厚度为  $T_2$ . 竖直方向, 衍射波因为全反射作用局域在缓冲层; 水平方向, 衍射波来回反射形成稳定的驻波场. 缓冲层的加入会改变石墨烯下层介质的有效介电常数 ( $\epsilon_{r2}$ ), 为光栅导模电磁场提供传播空间, 有利于降低 SPPs 的传播损耗、提高 SPPs 的品质因子 [26].

入射光为 X-偏振光 (偏振方向与光栅脊方向垂直), 以 Y 轴负方向对复合结构进行垂直照射, 要在石墨烯表面产生 SPPs, 入射场必须满足相位匹

配方程 [27]:

$$\text{Re}(k_g) - \frac{2\pi}{c} f_0 \sin \theta = \frac{2\pi}{\eta p}, \quad (1)$$

其中,  $k_g$  为 SPPs 波矢,  $p$  为光栅周期,  $f_0$  为共振频率,  $\eta$  为无量纲常数, 和介质的介电常数以及绝缘层的厚度有关. 对于垂直入射的情况 ( $\theta = 0$ ), 上述方程可简化为

$$\text{Re}(k_g) = \frac{2\pi}{\eta p}, \quad (2)$$

根据 (2) 式, 共振频率  $f_0 = (c/2\pi)\text{Re}(k_g)$  可得

$$f_0 = \frac{e}{\sqrt{2\pi}\hbar} \sqrt{\frac{E_F}{\eta\epsilon_0(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})p}}. \quad (3)$$

该式即为激发石墨烯 SPPs 所需的共振条件.

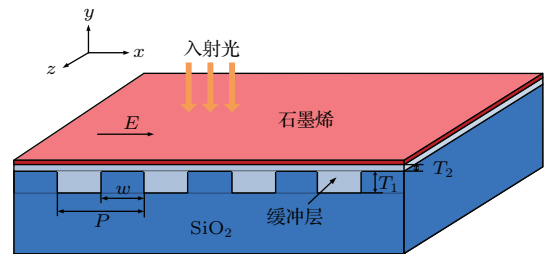


图 1 (网刊彩色) 光栅-绝缘层-石墨烯复合结构图  
Fig. 1. (color online) The diagram of raster-insulator-graphene composite structure.

### 2.2 石墨烯的电导率

石墨烯的光学特性是研究石墨烯表面等离子体激元的基础, 主要通过电导率和等效介电常数描述. 太赫兹和远红外波段电导率可以近似用 Drude 模型表示 [28]:

$$\sigma_{\text{total}}(\omega) = \frac{iD}{\pi(\omega + i\tau^{-1})}, \quad (4)$$

式中,  $\omega$  为入射光角频率;  $D = e^2 E_F / \hbar^2$ ,  $e$  表示元电荷,  $E_F$  为费米能级,  $\tau^{-1} = ev_F^2 / \mu E_F$ ,  $\tau$  指的是载流子弛豫时间,  $v_F$  为费米速度,  $\mu$  为载流子迁移率.

### 2.3 石墨烯 SPPs 的传播条件与色散关系

SPPs 是一种沿着媒质交界面传播的表面波, 分为 TM 模式和 TE 模式. 不同于传统的金属二维电子气模型 (只能支持 TM 模式), 石墨烯独特的带隙结构使其能够支持两种 SPPs 模式 [29], 并且和石墨烯电导率虚部有关,  $\text{Im}(\sigma_{\text{total}}) > 0$  和  $\text{Im}(\sigma_{\text{total}}) < 0$  分别对应 TM 模式和 TE 模式. 这两种模式的频率范围分别为:  $0 < \hbar\omega / E_F <$

1.667(TM 模式) 和  $1.667 < \hbar\omega/E_F < 2$  (TE 模式). 由于石墨烯 SPPs 的主要工作范围在频率相对较低的太赫兹和远红外波段, 因此本文将 TM 模式作为研究重点, 其色散关系为<sup>[27]</sup>

$$\varepsilon_{r1}(k_g^2 - \varepsilon_{r1}k_0^2)^{-1/2} + \varepsilon_{r2}(k_g^2 - \varepsilon_{r2}k_0^2)^{-1/2} = \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (5)$$

其中,  $k_0 = \omega/c$  为真空中波数,  $k_g$  为石墨烯表面波的波数,  $\varepsilon_{r1}$  和  $\varepsilon_{r2}$  分别为石墨烯上层和下层介质的相对介电常数. 由于  $k_g \gg k_0$ , 所以色散关系可以简化为

$$k_g(\omega) = \frac{\pi\hbar^2\varepsilon_0(\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2})}{eE_F}\omega(\omega + i\tau^{-1}), \quad (6)$$

如图 2 所示,  $k_g$  和  $k_0$  分别是石墨烯 SPPs 和自由空间电磁波的传播常数, 随着频率的升高,  $k_g$  和  $k_0$  的差值迅速增大.

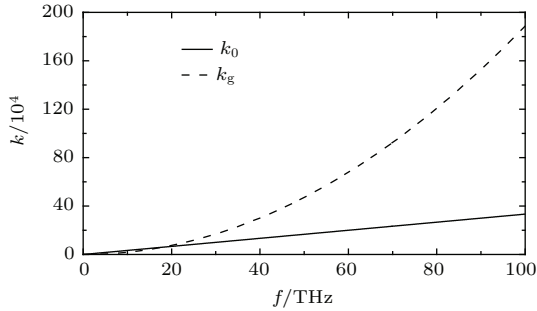


图 2 石墨烯 SPPs 与自由空间电磁波色散关系

Fig. 2. Dispersive curves of SPPs in graphene and electromagnetic wave in free space.

## 2.4 SPPs 局域特性描述

SPPs 的局域特性分为时间局域性和空间局域性, 分别用品质因子 ( $Q$ ) 和有效模式面积 ( $S_{\text{eff}}$ ) 描述<sup>[30]</sup>.

1)  $Q$  值与 SPPs 的传播损耗有关, 入射光的光栅衍射场与石墨烯表面模式耦合形成共振, 复合结构内储存能量和损耗能量的比值等于频域内共振模式的中心频率与模式频率半高宽的比值:

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = 2\pi f \frac{E_{\text{stored}}}{E_{\text{loss}}}, \quad (7)$$

其中,  $f$  为共振频率,  $\Delta f$  为峰值半高宽,  $E_{\text{stored}}$  表示共振腔内储存的电场能,  $E_{\text{loss}}$  表示损耗的电场能.  $Q$  值越高, 表示复合结构的损耗越小, 储存能量的能力越强.

2)  $S_{\text{eff}}$  描述的是电场能量空间分布的集中性. 当整个复合结构中的电场能量以最高的电场能量

面密度分布时, 所占模式面积的大小成为有效模式面积:

$$S_{\text{eff}} = \frac{\int \varepsilon(r) |E(r)|^2 d^2r}{\max[\varepsilon(r) |E(r)|^2]}, \quad (8)$$

其中,  $\varepsilon(r)$  和  $E(r)$  分别表示复合结构  $r$  点处的相对介电常数和电场强度; 而  $\varepsilon(r)|E(r)|^2$  表示  $r$  点的电场能量密度; 积分区域是图 1 中复合结构的  $X$ - $Y$  面.  $S_{\text{eff}}$  越小, 表示该模式下电磁场的空间局域性越高.

3) 石墨烯的表面电场也可以反映 SPPs 的局域特性. 石墨烯 SPPs 局域特性提高的过程, 也是入射光电磁场的分布空间被压缩的过程, 因而石墨烯的表面电场随局域特性的增大而增大. 本文借助 COMSOL 软件的二维截点功能, 直接对石墨烯薄层表面的电场进行分析. 为了便于研究电场的变化情况, 将石墨烯表面的电场  $E_x$  用入射光电场  $E_{\text{in}}$  进行归一化 ( $E_x/E_{\text{in}}$ ).

## 2.5 参数设置

数值仿真环节采用 COMSOL4.4 的频域分析模块, 利用参数化扫描功能分析石墨烯的表面电场  $E_x/E_{\text{in}}$ 、品质因子  $Q$ 、有效模式面积  $S_{\text{eff}}$  随复合结构内缓冲层厚度  $T_2$ 、光栅周期  $p$ 、载流子迁移率  $\mu$ 、费米能级  $E_F$  的变化规律. 为了体现各个参数对 SPPs 局域性的作用特点, 当所研究的参数变化时, 其他参数取默认值, 其中缓冲层厚度  $T_2 = 10$  nm, 载流子迁移率  $\mu = 0.5$  m<sup>2</sup>/(V·s), 光栅周期  $p = 200$  nm, 费米能级  $E_F = 0.6$  eV.

1) 石墨烯是一种从石墨中剥离出来的单层碳原子面材料, 模拟过程中认为其厚度为  $\Delta = 0.5$  nm.

2) 材料折射率: 光栅结构为二氧化硅  $n_{\text{SiO}_2} = 1.5$ , 为突出其他参数对 SPPs 局域特性的影响效果, 仿真过程中将石墨烯悬空, 绝缘材料设为空气  $n_{\text{air}} = 1.0$ . 对于石墨烯, 利用以下公式计算<sup>[1]</sup>:

$$n_g = \sqrt{1 + i \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \Delta \omega}}, \quad (9)$$

其中,  $\varepsilon_0$  为真空中介电常数,  $\sigma$  为 Drude 模型计算的石墨烯电导率,  $\omega$  为入射光角频率.

3) 网格划分: 选取自由剖分四面体网络, 并且设置最大单元格尺寸, 用来限制边界上四面体网格的最大尺寸, 不同的材料选择不同的限制条件. 石墨烯 0.1 nm; SiO<sub>2</sub>、缓冲层部分都设置为 6 nm.



### 3 结果分析与参数优化

#### 3.1 基模与高阶模

图3分别是基模和高阶模所对应的共振峰及其电场分布情况. 其中缓冲层厚度  $T_2 = 10$  nm, 载流子迁移率  $\mu = 0.5 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 光栅周期  $p = 200$  nm, 费米能级  $E_F = 0.6$  eV. 复合结构在入射光的照射下产生了尖锐的共振峰, 并且在石墨烯表面

形成局域电场.

共振条件下:  $Y$  方向上, 电场  $E_x$  严格局域在石墨烯薄层上;  $X$  方向上,  $E_x$  呈周期性变化, 而且无论是基模还是高阶模, 交界处都会产生相位为  $\pi$  的相位突变. 由于在基模处能够形成尖锐的共振峰, 并且其电场强度远高于高阶模, 因此为了充分提高 SPPs 的局域特性, 本文将基模作为研究重点, 忽略高阶模的作用.

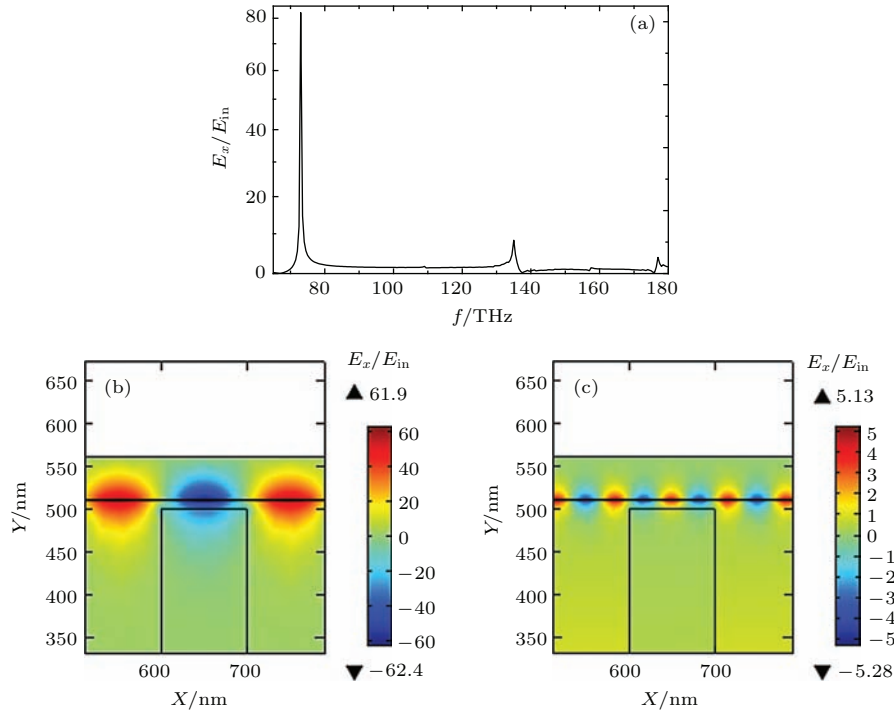


图3 (网刊彩色) 基模与高阶模的共振峰及其电场分布 (a) 基模与高阶模所对应的共振峰; (b) 基模电场分布; (c) 高阶模电场分布

Fig. 3. (color online) Formant and electric field distribution of the fundamental and high-order mode: (a) Formant of the fundamental and high-order mode; (b) electric field distribution of fundamental mode; (c) electric field distribution of high-order mode.

#### 3.2 缓冲层厚度

图4为不同的  $T_2$  所对应的电场-频率关系. 其中载流子迁移率  $\mu = 0.5 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 光栅周期  $p = 200$  nm, 费米能级  $E_F = 0.6$  eV. 随着  $T_2$  的增大, 共振峰蓝移, 峰值高度逐渐下降. 这是因为随着石墨烯和光栅结构的距离  $T_2$  的增大, 周期波导对石墨烯的调制作用逐渐下降.

虽然石墨烯表面电场有所降低, 但是其 SPPs 的品质因子反而有一定程度的提高. 当  $T_2$  为 5 nm 时, 峰值高度为 87, 品质因子  $Q = 246$ , 而当  $T_2$  增大到 40 nm 时, 峰值高度下降到 35, 品质因子却提高到 269. 缓冲层的加入为 SPPs 提供传播空间, 尽

量避免 SPPs 的电磁场与光栅结构重叠, 在一定程

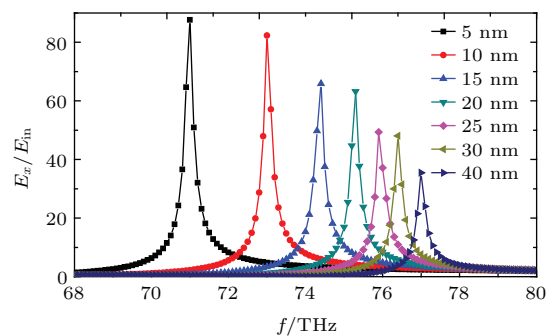


图4 (网刊彩色) 不同的缓冲层厚度下的共振峰  
Fig. 4. (color online) The formant under different thicknesses of buffer layer.

度上降低了传播损耗. 为了在保持一定电场强度的情况下提高品质因子, 令  $T_2 = 10$  nm.

### 3.3 载流子迁移率

载流子迁移率  $\mu$  是指载流子 (电子和空穴) 在单位电场作用下的平均漂移速度, 是反映石墨烯导电

电能力的重要参数 [20]. 在一定的电场强度下, 载流子运动的越快, 迁移率越大. SPPs 的近场增强特性与局域特性在很大程度上取决于载流子迁移率的大小. 图 5 为不同载流子迁移率下的共振峰和 SPPs 的局域特性. 其中缓冲层厚度  $T_2 = 10$  nm, 光栅周期  $p = 200$  nm, 费米能级  $E_F = 0.6$  eV.

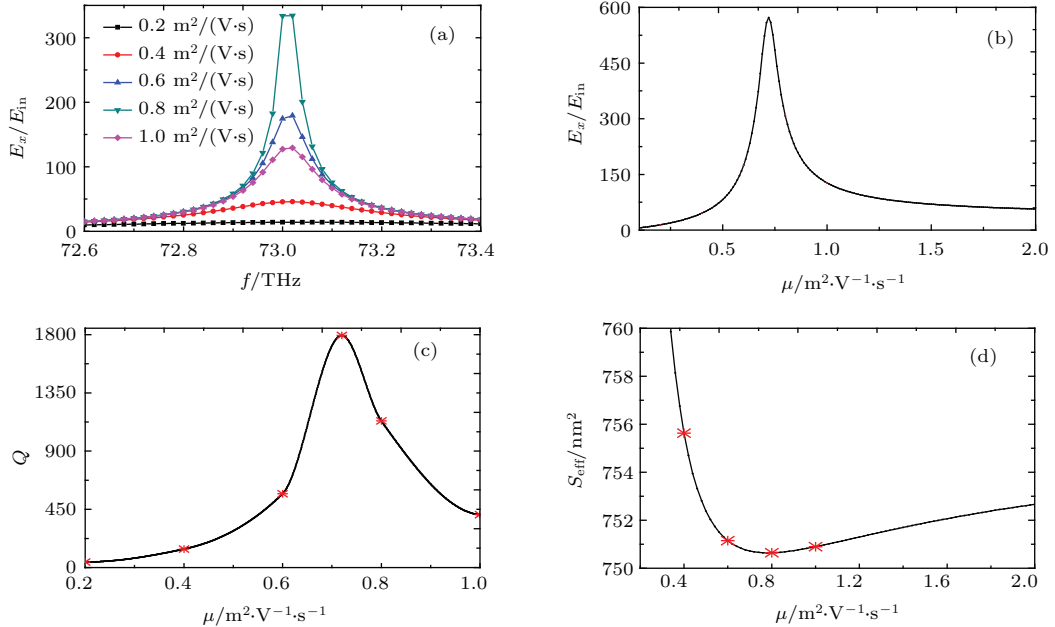


图 5 (网刊彩色) 不同载流子迁移率下的共振峰与局域特性 (a) 不同的迁移率下的电场-频率关系; (b) 共振峰的峰值随迁移率的变化关系; (c) 共振峰品质因子随迁移率变化关系; (d) 光栅复合结构内等效模场面积与迁移率的对应关系. 图 (c) 和图 (d) 中的星号为模拟结果, 而对应的曲线分别是根据 (7) 式, (8) 式的计算结果

Fig. 5. (color online) The formant and local characteristics of different carrier mobility: (a) Relationship between the frequency and electric field under different carrier mobility; (b) relationship between the peak of the formant and carrier mobility; (c) scaling of the quality factor with respect to carrier mobility; (d) scaling of the mode area with respect to carrier mobility. The asterisks in figure (c) and (d) are simulation results, while the corresponding curves are calculation results from equation (7), (8).

载流子迁移率的变化并不会改变共振频率 ( $f = 7.3$  THz), 只会改变共振峰的峰值, 说明共振频率  $f_0$  和  $\mu$  无关. 值得注意的是, SPPs 的近场增强和表面局域特性, 在特定的迁移率下  $Q$  值获得显著提升. 如图 5 (b) 所示,  $\mu = 0.7$   $m^2/(V \cdot s)$ , 品质因子  $Q_{max} = 1793$ ,  $E_x/E_{in} = 572$ . 在共振频率固定时, 提高石墨烯 SPPs 品质的有效方法是控制石墨烯的质量, 使迁移率处于最佳值.

### 3.4 光栅周期

光栅周期可显著影响 SPPs 的共振频率与电场强度. 图 6 为不同光栅周期下 SPPs 的频率特性与局域特性. 其中缓冲层厚度  $T_2 = 10$  nm, 载流子

迁移率  $\mu = 0.5$   $m^2/(V \cdot s)$ , 费米能级  $E_F = 0.6$  eV. 图 6 (a) 中, 共振频率  $f_0$  随着  $p$  的增加而显著降低. 当  $p = 235$  nm 时, 表面电场最强,  $E_x$  达到入射场  $E_{in}$  的 3154 倍.

### 3.5 费米能级

石墨烯相对于贵金属的最大优势在于其超宽、超快的电可调特性. 费米能级的高速调制通过场效应管完成 [31], 栅极电压的改变会影响石墨烯的载流子浓度, 进而改变  $E_F$ . 图 7 为石墨烯表面电场、SPPs 品质因子、有效模场面积与费米能级的对应关系. 其中缓冲层厚度  $T_2 = 10$  nm, 载流子迁移率  $\mu = 0.5$   $m^2/(V \cdot s)$ , 光栅周期  $p = 200$  nm.

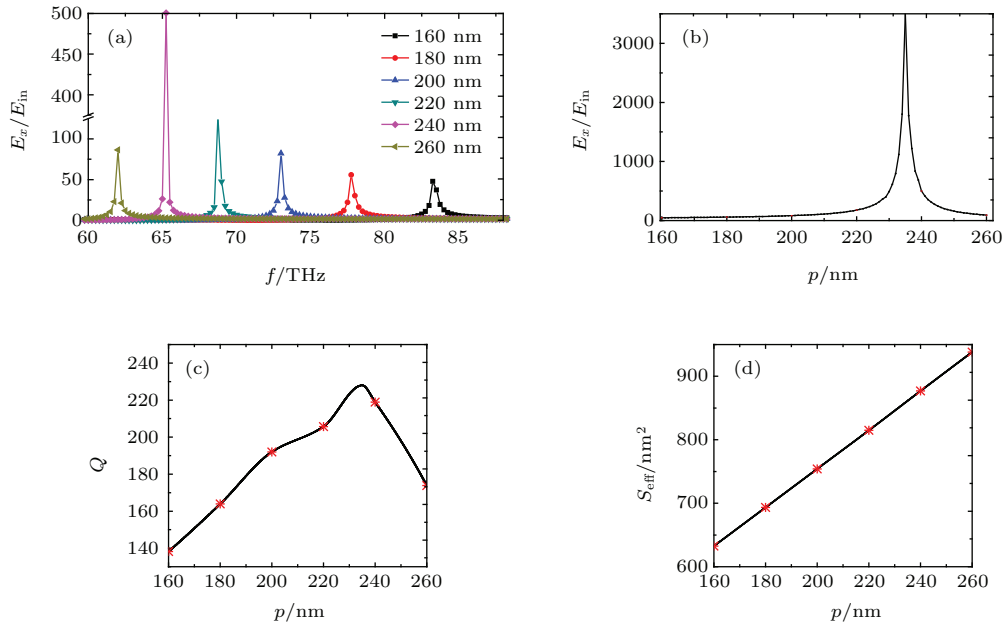


图6 (网刊彩色) 不同光栅周期下的SPPs频率特性与局域特性 (a) 电场-频率关系; (b) 共振峰峰值与光栅周期的关系曲线; (c) 共振峰品质因子与光栅周期的关系; (d) 光栅复合结构内等效横场面积与光栅周期的关系  
 Fig. 6. (color online) The formant and local characteristics of different grating periods. (a) Relationship between the frequency and electric field under different grating periods; (b) relationship between the peak of the formant and grating periods; (c) relation between the quality factor and the grating periods; (d) relationship between the mode area and the grating periods.

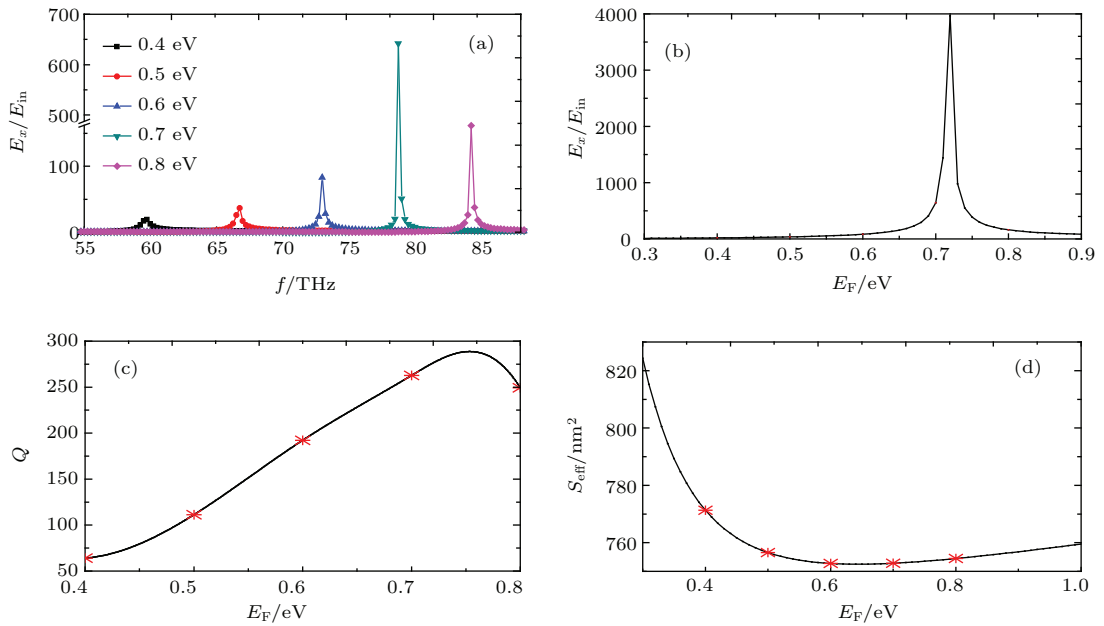


图7 (网刊彩色) 不同费米能级下石墨烯SPPs的频率特性和局域特性 (a) 不同费米能级下的共振峰; (b) 共振峰峰值与费米能级关系曲线; (c) 共振峰品质因子随费米能级变化曲线; (d) 光栅复合结构内等效模场面积与费米能级的对应关系。图(c)和图(d)中的星号为模拟结果, 而对应的曲线分别是根据(7)式, (8)式计算的结果  
 Fig. 7. (color online) The formant and local characteristics of different Fermi levels: (a) Relationship between the frequency and electric field under different Fermi levels; (b) relationship between the peak of the formant and Fermi levels; (c) scaling of the quality factor with respect to Fermi levels; (d) scaling of the mode area with respect to Fermi levels. The asterisks in figure (c) and (d) are simulation results, while the corresponding curves are calculation results from equation (7), (8).

图 7(a) 中  $E_F$  增加, 共振峰  $f_0$  蓝移, 并且  $E_F$  每增加 0.1 eV,  $f_0$  的增量超过 5 THz, 充分体现出  $E_f$  的宽光谱调制能力. 费米能级可以极大地增强石墨烯表面电场:  $E_F = 0.72$  eV 时, SPPs 的激发使得石墨烯的表面电场增强达到入射光的 3968 倍, 品质因子达到最大值  $Q_{\max} = 276$ , 同时有效模式面积达到最小值  $(S_{\text{eff}})_{\min} = 752.8 \text{ nm}^2$ . 在复合结构的几何参数(缓冲层厚度  $T_2$ , 光栅周期  $p$ ) 与石墨烯的质量(载流子迁移率  $\mu$ ) 确定的情况下, 通过改变外加电场, 可以显著增加石墨烯的表面电场强度, 全面提高 SPPs 的局域特性.

## 4 结 论

本文借助基于有限元法的 COMSOL 软件, 对石墨烯 SPPs 的激发和调制过程进行了深入研究. 结果表明: 入射光通过光栅结构产生的衍射场, 能够在石墨烯表面产生 SPPs, 并且借助导模共振效应, 增加光栅衍射效率以及衍射场强度, 全面提高 SPPs 的局域特性. 缓冲层厚度  $T_2$ 、载流子迁移率  $\mu$ 、光栅周期  $p$  和费米能级  $E_f$  都能够对 SPPs 的局域特性产生影响: 1)  $T_2$  的增加会降低石墨烯的表面电场 ( $E_x/E_{\text{in}}$ ), 但是会使 SPPs 的  $Q$  值获得一定提高, 由于增加 SPPs 的局域特性需要提高  $Q$  值并且保持一定的表面电场强度, 因此本文中的  $T_2 = 10 \text{ nm}$ ; 2)  $\mu$  能够在不改变共振频率  $f_0$  的情况下, 显著提高 SPPs 的品质因子 ( $\mu = 0.7 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  时,  $Q_{\max} = 1793$ ); 3)  $p$  与  $E_F$  的微小改变会使 SPPs 共振峰大范围移动, 并且在最优值点, 石墨烯表面电场获得极大增强 ( $p = 235 \text{ nm}$  时,  $E_x/E_{\text{in}} = 3154$ ;  $E_F = 0.72 \text{ eV}$  时,  $E_x/E_{\text{in}} = 3968$ ). 强局域光场促使石墨烯在太赫兹波段产生更多、更强的非线性光学效应, 因此本文提出的复合结构将使石墨烯在非线性和光学领域更具应用潜力.

## 参考文献

- [1] Xu H J 2013 *M. S. Dissertation* (Nanjing: Southeast University) (in Chinese) [徐红菊 2013 硕士学位论文(南京: 东南大学)]
- [2] Liu J L 2010 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [刘建龙 2010 博士学位论文(哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [3] Li S J, Gan S, Mu H R, Xu Q Y, Qiao H, Li P F, Xue Y Z, Bao Q L 2014 *New Carbon Mater.* **29** 329 (in Chi-

- nese) [李绍娟, 甘胜, 沐浩然, 徐庆阳, 乔虹, 李鹏飞, 薛运周, 鲍桥梁 2014 新型炭材料 **29** 329]
- [4] Wang B, Zhang X, Yuan X, Teng J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 131111
- [5] Liu Q Y, Zhang Y P, Zhang H Y, Lü H H, Li T T, Ren G J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 075201 (in Chinese) [刘亚青, 张玉萍, 张会云, 吕欢欢, 李彤彤, 任广军 2014 物理学报 **63** 075201]
- [6] Liu P Q, Valmorra F, Maissen C, Faist J 2015 *Optica* **2** 135
- [7] Wang W, Leung K K, Fong W K, Wang S F, Hui Y Y, Lau S P P, Surya C 2012 *Proc. SPIE* **8470** 84700E
- [8] Nasari H, Abrishamian M S 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 1
- [9] Gerber J A, Samuel B, O'Callahan B T, Raschke M B 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 055502
- [10] Wu H Q, Linghu C Y, Lv H M, Qian H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 098106
- [11] Jablan M, Buljan H, Soljacic M 2009 *Phys. Rev. B* **80** 245435
- [12] Chen P, Alù A 2011 *ACS Nano* **5** 5855
- [13] Dubinov A A, Aleshkin V Y, Mitin V 2011 *J. Phys. Condens. Matter* **23** 145302
- [14] Vakil A, Engheta N 2011 *Science* **332** 1291
- [15] Chen J, Badioli M, Alonso-Gonzalez P, Thongrattanasiri S, Huth F, Osmond J, Spasenović M, Centeno A, Pesquera A, Godignon P, Elorza A Z, Camara N, García de Abajo F G, Hillenbrand R, Koppens F H L 2012 *Nature* **487** 77
- [16] Fei Z, Rodin A S, Andreev G O, Bao W, McLeod A S, Wagner M, Zhang L M, Zhao Z, Thiemens M, Dominguez G, Fogler M M, Castro Neto A H, Lau C N, Keilmann F, Basov D N 2012 *Nature* **487** 82
- [17] Zhang K B, Zhang H, Cheng X L 2016 *Chin. Phys. B* **25** 037104
- [18] Batke E, Heitmann D, Tu C W 1986 *Phys. Rev. B* **34** 6951
- [19] Wu S Q, Liu J S, Wang S L, Hu B 2013 *Chin. Phys. B* **22** 104207
- [20] Tae K J, Jaehyeon K, Hongkyw C, Choon-Gi C, Sung-Yool C 2012 *Nanotechnology* **23** 132
- [21] Long J, Baisong G, Jason H, Caglar G, Michael M, Zhao H, Hans A B, Xiaogan L, Alex Z, Shen Y R, Wang F 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 630
- [22] Yan H, Li X, Chandra B, Tulevski G, Wu Y, Freitag M, Zhu W, Avouris P, Xia F 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 330
- [23] Zheyu F, Sukosin T, Andrea S, Zheng L, Lulu M, Yumin W, Pulickel M A, Peter N, Naomi J H, Javier G D A 2013 *ACS Nano* **7** 2388
- [24] Fang Z, Wang Y, Schlather A E, Zhang L, Pulickel M A, Abajo F J G D, Peter N, Xing Z, Naomi J H 2014 *Nano Lett.* **14** 299
- [25] Priambodo P S 2003 *Dissertation Abstracts International* **26** 203
- [26] Zhao Y, Chen G, Tao Z, Zhang C, Zhu Y 2014 *Rsc Adv.* **4** 26535
- [27] Gao W, Shu J, Qiu C, Xu Q 2012 *ACS Nano* **6** 7806
- [28] Nikitin A Y, Guinea F, Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L 2011 *Phys. Rev. B* **84** 3239



- [29] Yang X X, Kong X Q, Dai Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 106801 (in Chinese) [杨晓霞, 孔祥天, 戴庆 2015 物理学报 **64** 106801]  
 [30] Xu P P 2014 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang

- University) (in Chinese) [许培鹏 2014 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]  
 [31] Zhu Y, Bai H, Huang Y 2015 *Synthetic Met.* **204** 57

# Improvement of the local characteristics of graphene surface plasmon based on guided-mode resonance effect\*

Li Zhi-Quan<sup>1)†</sup> Zhang Ming<sup>1)</sup> Peng Tao<sup>1)</sup> Yue Zhong<sup>1)</sup> Gu Er-Dan<sup>1)</sup> Li Wen-Chao<sup>2)</sup>

1) (*Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China*)

( Received 10 January 2016; revised manuscript received 3 March 2016 )

## Abstract

Graphene is a one-atom-thick planar sheet of  $sp^2$ -bonded carbon atoms that are densely packed in a honeycomb crystal lattice. Graphene has been found to support plasmons in a wide range from infrared to terahertz. The confinement of plasmons in graphene is stronger than that on metallic surface. Moreover, the plasmon properties can be dynamically adjusted by doping or grating graphene. In this study, a composite structure comprised of graphene and subwavelength grating is proposed. Highly confined plasmons in graphene are excited by using a diffraction grating with guided mode resonance effect. The wave vector of plasmonic wave in graphene is far larger than that of light in vacuum. To excite plasmons in graphene with a freespace optical wave, their large difference in wave vector must be overcome. Optical gratings are widely used to compensate for wave vector mismatches. A diffraction wave generated by the grating structure can overcome the large wave vector difference and excite surface plasmons. The guided-mode resonance can greatly enhance the intensity of the diffraction field and the coupling efficiency between graphene and incident light. When the phase matching between illuminating wave and a guide mode supported by grating is achieved, guided-mode resonance effect occurs. A nearly 100% diffraction efficiency peak in the reflection or transmission spectrum occurs at a certain wavelength.

In this study, the influences of graphene and grating structure on the local characteristics (the surface electric field  $E_x/E_{in}$ , quality factor  $Q$ , and effective mode area  $S_{eff}$ ) of surface plasmons are investigated. The effects of the structural parameters (the thickness of the buffer layer  $T_2$ , the grating period  $p$ , the carrier mobility  $\mu$ , and the Fermi level  $E_F$ ) on localization properties are analyzed by the finite element method (COMSOL). The results reveal that the localizations of the surface plasmons in the graphene surface is significantly improved at the certain parameters. 1) The increase of  $T_2$  will reduce the intensity of electric field on graphene ( $E_x/E_{in}$ ), but the quality factor will obtain a certain increase. The excitation of highly confined SPPs needs to improve  $Q$  and keep the intensity of  $E_x/E_{in}$ , so in this study  $T_2 = 10$  nm. 2) By adjusting  $\mu$  the quality factor of SPPs can be improved significantly without changing the resonance frequency ( $\mu = 0.7$  m<sup>2</sup>(V·s),  $Q_{max} = 1793$ ). 3) Small changes in  $p$  and  $E_F$  will make the resonance peak shift obviously, and the electric field on graphene is greatly enhanced ( $p = 235$  nm,  $E_x/E_{in} = 3154$ ;  $E_F = 0.72$  eV, and  $E_x/E_{in} = 3968$ ). Strong localization leads to strong light-matter interaction, and thus the proposed structure has the potential to be used as sensors with high sensitivity and high-efficiency nonlinear optical devices, greatly expanding the application of graphene in nano optics.

**Keywords:** graphene, surface plasmon, subwavelength grating, guided mode

**PACS:** 52.25.-b, 52.40.Hf, 42.40.Lx, 42.79.Gn

**DOI:** 10.7498/aps.65.105201

\* Project supported by the "100 Talents Project" of Hebei Province, China (Grant No. 4570018) and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2014501150).

† Corresponding author. E-mail: lzq54@ysu.edu.cn