

石墨烯的三阶非线性和光双稳态调控特性

林洽武*, 周仁龙**, 杨飒, 刘丹, 李爽, 赵永明

广东第二师范学院物理与信息工程系, 广东 广州 510303

摘要 研究单层石墨烯的三阶非线性和光双稳态效应。通过理论分析和数值模拟, 改变单层三阶非线性石墨烯的费米能级、弛豫时间、双光子吸收系数及温度条件, 调制单层三阶非线性石墨烯光双稳态的阈值大小。单层三阶非线性石墨烯的费米能级越大, 温度越高, 则光双稳态的阈值越大; 双光子吸收系数越大, 双稳态的低阈值越大; 弛豫时间和双光子吸收系数会明显地改变石墨烯结构的光透射率, 而光透射率则对石墨烯材料自身温度不敏感。该结论可为设计各类微纳结构的光子器件如光开关和光传感等提供理论依据。

关键词 表面光学; 石墨烯表面等离子体; 三阶非线性效应; 光双稳态; 费米能级

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0624001

Third-Order Nonlinearity and Optical Bistability Regulation Characteristic of Graphene

Lin Qiawu*, Zhou Renlong**, Yang Sa, Liu Dan, Li Shuang, Zhao Yongming

*School of Physics and Information Engineering, Guangdong University of Education, Guangzhou,
Guangdong 510303, China*

Abstract In this study, the third-order nonlinearity and optical bistability effect of mono-layer graphene was investigated. Using theoretical analysis and numerical simulation, the threshold value of the optical bistability of mono-layer third-order nonlinearity graphene can be tuned by changing its Fermi energy, relaxation time, two-photon absorption coefficient, and temperature. We demonstrate that the larger Fermi energy level, the higher temperature and the larger threshold value of the optical bistability. Further, a higher two-photon absorption coefficient corresponds to a higher low threshold of the bistability. Moreover, the relaxation time and two-photon absorption coefficient can significantly alter the light transmissivity of the graphene structure, although the light transmissivity is insensitive to the temperature of the graphene material. Results offer a theoretical basis for designing nanophotonic devices with micro-nano structure such as optical switches and optical sensors.

Key words optics at surfaces; graphene surface plasmas; third-order nonlinear effect; optical bistability; Fermi energy

OCIS codes 240.6680; 230.4110; 160.4760; 240.4350

1 引 言

当光照射到物质时, 光与物质产生相互作用, 光波电磁场将对物质中的电子产生作用, 在外电场的作用下, 介质原子成为电偶极子。电偶极子将随光波电磁场的变化产生振荡。电极化强度产生极化场, 极化场发出次级辐射。当外界作用的光场较强时, 电偶极子的振荡不再与外电场呈线性关系, 产生的电磁振荡是非线性的。光与介质间会发生能量交换, 介质的物

理参量与光场强度有关, 因此会产生主动非线性光学效应。光学双稳态就是一种非线性光学效应。

光学双稳态是指一个特定的光学系统, 在给定的输入光强中存在着两种可能的输出光强, 其输入-输出光强关系类似磁滞回线^[1-2]。输出与输入光强呈 S 形曲线关系, 输出光强由输入光强的变化状态决定, 在输入光增强过程中, 输出光会跳跃到更高的值, 在输入光减小的过程中, 输出光会跳跃到更低的值。输出光强的这种不连续变化, 可以用输入光强

收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-11-25; 录用日期: 2019-12-02

基金项目: 广东省自然科学基金(2018A030313684)、广东省教育厅科研项目(2017KTSCX134)、广东省普通高校特色创新项目(2016KTSCX095)

* E-mail: linqiawu@163.com; ** E-mail: rlzhoupc@sina.com

来控制,这种跳跃可以作为光开关的两种状态。

光的双稳态被认为是非线性介质对光的一种反馈控制。近年来,研究人员主要研究如何缩小器件的结构尺寸、提高器件的开关速度和效率等。石墨烯的大非线性 Kerr 系数比传统的块体材料^[3-4]大几个数量级,同时石墨烯具有超快光响应、栅极可变电性^[5-6]及小尺寸的特点,故石墨烯成为了制作可调谐、低阈值光学器件的一种新材料,如基于石墨烯可制作超材料深度可调的调制器^[7]。利用石墨烯的非线性效应,可以实现光学双稳态,从而制作出晶体管^[8]、全光开关^[9]、光存储器^[10]等光通信器件,最终实现光信号的高速处理。

目前,石墨烯在微纳结构中神奇的物理特性引起了许多研究者的关注,同时石墨烯表面等离子体波和表面等离子体波导的特性^[11]也受到关注。石墨烯优秀的光学性质^[12-13],例如强光与石墨烯的相互作用,特别是外电场对石墨烯电导率的可调性等,可以为研究调谐光学传感器^[14]、超材料^[15-16]、太赫兹吸收器^[17]等开辟新的可能性。基于石墨烯的传感特性^[18],光纤温度传感器^[19]、湿度传感器^[20]等也被重视,同时可以用实验来操纵太赫兹辐射^[21-23]。利用石墨烯优异的三阶非线性光学性质,可以制作锁模激光器^[24]和光学限幅器^[25],实现在石墨烯和 Kerr 型非线性衬底界面处的反射光双稳态^[26],并且

实验证明了石墨烯纳米材料中的全光学切换^[27]。Peres 等^[28]发现,在空气中的单层石墨烯在 THz 频率范围存在三阶非线性效应及光双稳态。最近部分专家正在研究关于对称双层电介质中夹杂非线性石墨烯片的光学双稳态现象^[29]。

和传统的金属材料相比,石墨烯的费米能级(可通过外电压或掺杂浓度调节)能够调制石墨烯的三阶非线性和双稳态,因而能够实现石墨烯的三阶非线性和双稳态效应的外调制。本文仅讨论单层石墨烯多层介质结构的三阶非线性和其双稳态效应。通过理论分析和数值模拟,改变单层三阶非线性石墨烯的费米能级、弛豫时间、双光子吸收系数及温度等条件,能够调制石墨烯光双稳态的阈值大小。单层三阶非线性石墨烯的费米能级越大,温度越高,反应弛豫时间越小,则光双稳态的阈值越大;双光子吸收系数越大,双稳态的低阈值越高;同时发现反应弛豫时间和双光子吸收系数会明显地改变双稳态的透射率,而透射率则对温度不敏感。这为设计各类微纳结构的光子器件如光开关、光存储、光放大、光传感^[30-31]等新型石墨烯非线性光电器件提供理论依据。

2 理论模型分析

不考虑外磁场对单层石墨烯片的作用,单层三阶非线性石墨烯片的总电导率 σ 可写为

$$\sigma = \frac{ie^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})} \left\{ \frac{E_F}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp \left(-\frac{E_F}{k_B T} \right) + 1 \right] \right\} + \frac{ie^2}{4\pi \hbar} \ln \left| \frac{2E_F - (\omega + i\tau^{-1})\hbar}{2E_F + (\omega + i\tau^{-1})\hbar} \right| - i \frac{3e^2 (ev_F)^2}{32\pi \hbar^2 E_F \omega^3} (1 + \alpha_T), \quad (1)$$

其中,在不考虑单层石墨烯片的非线性效应时,线性电导率 σ_0 可以表示为

$$\sigma_0 = \frac{ie^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})} \left\{ \frac{E_F}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp \left(-\frac{E_F}{k_B T} \right) + 1 \right] \right\} + \frac{ie^2}{4\pi \hbar} \ln \left| \frac{2E_F - (\omega + i\tau^{-1})\hbar}{2E_F + (\omega + i\tau^{-1})\hbar} \right|, \quad (2)$$

单层非线性效应石墨烯片的三阶非线性电导率 $\sigma'^{[3,21]}$ 可以表示为

$$\sigma' = -i \frac{3e^2 (ev_F)^2}{32\pi \hbar^2 E_F \omega^3} (1 + \alpha_T), \quad (3)$$

式中: α_T 是双光子吸收系数; ω 是入射光的圆频率; e 是电子电荷量; k_B 是玻尔兹曼常数; T 是温度; \hbar 是约化普朗克常数; τ 是声子和电子相互作用的弛豫时间; E_F 是单层石墨烯的费米能级; v_F 是电子的费米速率, $v_F = 10^6$ m/s。

在含有三阶非线性效应的单层石墨烯片的多层介质复合结构中,入射光的传输和反射如图 1(a)所示。光从介质 1 入射到介质 2 表面,再从介

质 4 透射出来。该复合结构能够用于研究单层石墨烯的可调三阶非线性效应和双稳态效应。和传统的金属材料相比,石墨烯可以通过改变外电压或石墨烯的掺杂浓度来改变单层石墨烯片的费米能级,进而调制石墨烯的三阶非线性效应和双稳态效应。

首先选择坐标系,以水平向左方向为 x 轴正方向,竖直向下为 z 轴正方向, y 轴垂直纸面向外, o 点位于图中心。研究 TE 模电磁波在石墨烯多层结构中的传播特性,TE 模电磁波在介质和石墨烯中的传输方程如下。

电磁波在入射介质层 1 中的传播方程为

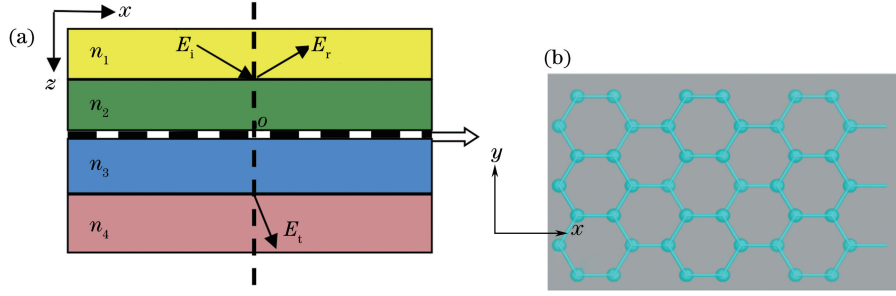


图 1 含有三阶非线性石墨烯片的多层介质复合结构。(a)入射光、反射光及透射光方向示意图；
(b)图中的坐标 xy 位置有重叠,图的位置需调整。

Fig. 1 Multi-layer medium composite structure with third order nonlinear graphene sheet. (a) Schematic of incident light, reflection light, and transmission light direction; (b) structure of mono-layer third order nonlinear graphene

$$E_{1y} = E_i \exp\{i[k_{1z}(z + d_2) + k_x x]\} + E_r \exp\{-i[k_{1z}(z + d_2) - k_x x]\}, \quad (4)$$

$$H_{1x} = -\frac{k_{1z}}{\mu_0 \omega} E_i \exp\{i[k_{1z}(z + d_2) + k_x x]\} + \frac{k_{1z}}{\mu_0 \omega} E_r \exp\{-i[k_{1z}(z + d_2) - k_x x]\}, \quad (5)$$

$$H_{1z} = -\frac{k_x}{\mu_0 \omega} E_i \exp\{i[k_{1z}(z + d_2) + k_x x]\} + \frac{k_x}{\mu_0 \omega} E_r \exp\{-i[k_{1z}(z + d_2) - k_x x]\}; \quad (6)$$

经第 1 层介质到第 2 层介质,在第 2 层介质中的传播方程为

$$E_{2y} = A \exp[i(k_{2z}z + k_x x)] + B \exp[-i(k_{2z}z - k_x x)], \quad (7)$$

$$H_{2x} = -\frac{k_{2z}}{\mu_0 \omega} A \exp[i(k_{2z}z + k_x x)] + \frac{k_{2z}}{\mu_0 \omega} B \exp[-i(k_{2z}z - k_x x)], \quad (8)$$

$$H_{2z} = -\frac{k_x}{\mu_0 \omega} A \exp[i(k_{2z}z + k_x x)] + \frac{k_x}{\mu_0 \omega} B \exp[-i(k_{2z}z - k_x x)]; \quad (9)$$

在第 3 层介质中的传播方程为

$$E_{3y} = C \exp[i(k_{3z}z + k_x x)] + D \exp[-i(k_{3z}z - k_x x)], \quad (10)$$

$$H_{3x} = -\frac{k_{3z}}{\mu_0 \omega} A \exp[i(k_{3z}z + k_x x)] + \frac{k_{3z}}{\mu_0 \omega} D \exp[-i(k_{3z}z - k_x x)], \quad (11)$$

$$H_{3z} = -\frac{k_x}{\mu_0 \omega} C \exp[i(k_{3z}z + k_x x)] + \frac{k_x}{\mu_0 \omega} D \exp[-i(k_{3z}z - k_x x)]; \quad (12)$$

在第 4 层介质中的传播方程为

$$E_{4y} = E_t \exp\{i[k_{4z}(z - d_3) + k_x x]\}, \quad (13)$$

$$H_{4x} = -\frac{k_{4z}}{\mu_0 \omega} E_t \exp\{-i[k_{4z}(z - d_3) + k_x x]\}, \quad (14)$$

$$H_{4z} = -\frac{k_x}{\mu_0 \omega} E_t \exp\{i[k_{4z}(z - d_3) + k_x x]\}. \quad (15)$$

式中: $k_x = k_0 \sqrt{\epsilon_1} \sin \theta$, θ 是入射角, $k_{jz} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_j - k_x^2}$, $j = 1, 2, 3, 4$; μ_0 是真空磁导率; E_r 是反射光场; d_2 是介质层 2 的厚度, d_3 是介质层 3 的厚度; A, B, C, D 是方程组的四个未知系数。

根据电磁场边界条件,可以得到出射光场与入射光场之间的关联函数:

$$\Pi = \frac{1}{8} \left\{ \left(1 + \frac{k_{2z}}{k_{1z}}\right) \left[\left(1 - \frac{k_{3z}}{k_{2z}}\right) \Gamma + \Xi \right] \exp(-ik_{2z}d_2) + \left(1 - \frac{k_{2z}}{k_{1z}}\right) \left[\left(1 + \frac{k_{3z}}{k_{2z}}\right) \Gamma - \Xi \right] \exp(ik_{2z}d_2) \right\}, \quad (16)$$

其中,

$$\Gamma = \left(1 + \frac{k_{4z}}{k_{3z}}\right) \exp(-ik_{3z}d_3) + \left(1 - \frac{k_{4z}}{k_{3z}}\right) \exp(ik_{3z}d_3), \quad (17)$$

$$\Xi = 2 \frac{k_{3z}}{k_{2z}} \left(1 + \frac{k_{4z}}{k_{3z}}\right) \exp(-ik_{3z}d_3) - \frac{\mu_0 \omega}{k_{2z}} \left(\sigma_0 + \frac{1}{4} \sigma' |E_t|^2 | \Gamma|^2 \right) \Gamma, \quad (18)$$

$$|E_i|^2 = |E_t|^2 + |\Pi|^2. \quad (19)$$

推导出 TE 模电磁波在石墨烯多层结构中的传播方程,得到了入射光和透射光之间的关系。该关系用关联函数 Π 表示,该关联函数能够体现出射光与入射光振幅之间的关系,为研究单层石墨烯的非线性效应和光学双稳态现象提供了数学函数表达式。在基于石墨烯的双稳态器件中,通过改变外加电压或单层石墨烯的掺杂浓度,可以改变石墨烯中的费米能级。探讨石墨烯中的费米能级、石墨烯本身电偶极矩对电磁场的反应弛豫时间、单层三阶非线性石墨烯的双光子吸收系数及石墨烯的温度变化,进而研究对单层三阶非线性石墨烯复合结构的光传输的影响,从而实现费米能级、温度、弛豫时间及双光子吸收对单层石墨烯非线性效应和光双稳态的可控制。

3 数值模拟和结果分析

3.1 单层三阶非线性石墨烯的费米能级对光双稳态的影响

研究光从介质入射,通过石墨烯层,考虑石墨烯

的三阶非线性效应出现光双稳态情况。通过改变石墨烯的费米能级,研究费米能级对光双稳态的影响。所采用的介质结构层的参数:二氧化硅(SiO_2)的介电常数为 $\epsilon_1 = 1.25$,聚乙烯的相对介电常数为 $\epsilon_2 = 2.25$, $\text{N}_4(\text{CH}_2)_6$ 的相对介电常数为 $\epsilon_3 = 2.75$, SiO_2 的介电常数 $\epsilon_4 = 1.25$;入射角 $\theta = 75^\circ$,入射波长 $\lambda = 100 \mu\text{m}$;石墨烯的弛豫时间 $\tau = 100 \times 10^{-13} \text{ s}$,介质层厚度 $d_2 = d_3 = 4 \mu\text{m}$,单层三阶非线性石墨烯的双光子吸收系数 $\alpha_T = 0$,石墨烯的温度 $T = 300 \text{ K}$ 。通过数值计算,图 2(a)对比了存在和不存在三阶非线性效应石墨烯时的出射光与入射光的关系。在单层石墨烯中,光入射后,随着入射光振幅的变化,会出现光双稳态。在不存在三阶非线性效应的单层石墨烯中,出射光振幅与入射光振幅成正比,不会出现光双稳态。当存在石墨烯三阶非线性效应时,费米能级能够改变光双稳态的阈值,如图 2(b)所示。当石墨烯的费米能级越大,光双稳态的高(H点)、低(L点)阈值的入射光场越大,如图 2(c)所示。从图 2(d)可知,费米能级对光双稳态的最大透射率影响很小,在一定入射光场的条件下,最大透射率接近 1。

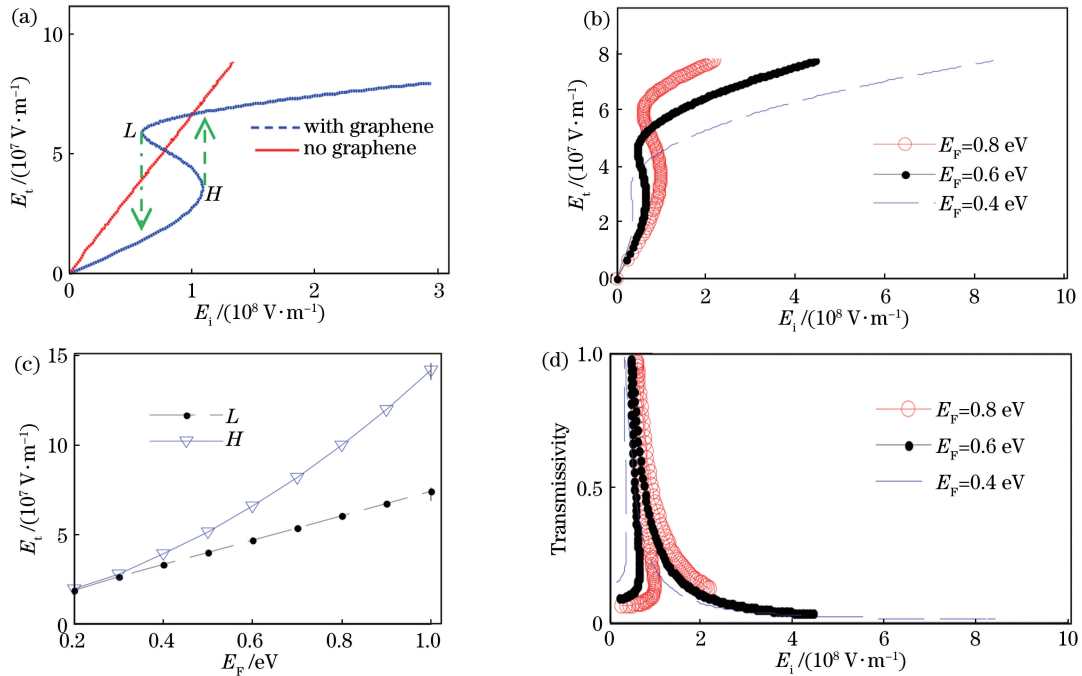


图 2 光双稳态随费米能级的变化关系。(a)存在三阶非线性石墨烯与不存在三阶非线性石墨烯时的入射光振幅与透射光振幅的关系;(b)入射光振幅与透射光振幅的关系;(c)费米能级对双稳态阈值的影响;(d)透射率与入射光振幅的关系
Fig. 2 Optical bistability varies with Fermi energy. (a) Relation between amplitude of incident light and the amplitude of transmission light whether the graphene exists third-order nonlinearity or not; (b) relation between amplitude of incident light and amplitude of transmission light; (c) influence of Fermi energy on optical bistability threshold; (d) relation between transmissivity and amplitude of incident light

通过数值模拟发现,石墨烯的三阶非线性效应能改变光双稳态的阈值,故在基于石墨烯的双稳态器件中,改变外加电压或单层石墨烯的掺杂浓度,可以改变石墨烯中的费米能级,因而,改变电压的大小,可以得到合适的高阈值和低阈值,优化双稳态的设置。

3.2 石墨烯的弛豫时间对光双稳态的影响

在含单层三阶非线性石墨烯的多层介质层中,多层介质复合结构层的参数: $\epsilon_1 = 1.25, \epsilon_2 = 2.25, \epsilon_3 = 2.75, \epsilon_4 = 1.25$;入射角 $\theta = 75^\circ$, 波长 $\lambda = 100 \mu\text{m}$;费米能级 $E_F = 0.8 \text{ eV}$, 介质层厚度 $d_2 = d_3 = 4 \mu\text{m}$, 双光子吸收系数 $\alpha_T = 0$, 石墨烯的温度 $T = 300 \text{ K}$ 。考虑单层三阶非线性石墨烯本身电偶极矩对电磁场的反应有一定的弛豫时间, 弛豫时间

会对光双稳态造成影响。通过数值计算,图 3(a)给出光双稳态随弛豫时间的变化情况,当弛豫时间较短时,不存在光双稳态。从图 3(b)可得,弛豫时间越大,光双稳态的阈值越低,高阈值点 H 处的入射光振幅随弛豫时间变化较小,低阈值点 L 处的入射光振幅随弛豫时间变化较大。从图 3(c)、(d)可知,弛豫时间不但影响光双稳态的阈值,还影响光的透射率,弛豫时间越大,透射率峰值越大。在基于石墨烯的双稳态器件中,考虑石墨烯本身电偶极矩能够影响电磁场的反应弛豫时间,弛豫时间又能够影响光双稳态的阈值,进而影响光的透射率,故可通过改变石墨烯本身电偶极矩对电磁场的反应弛豫时间来优化双稳态的设置。

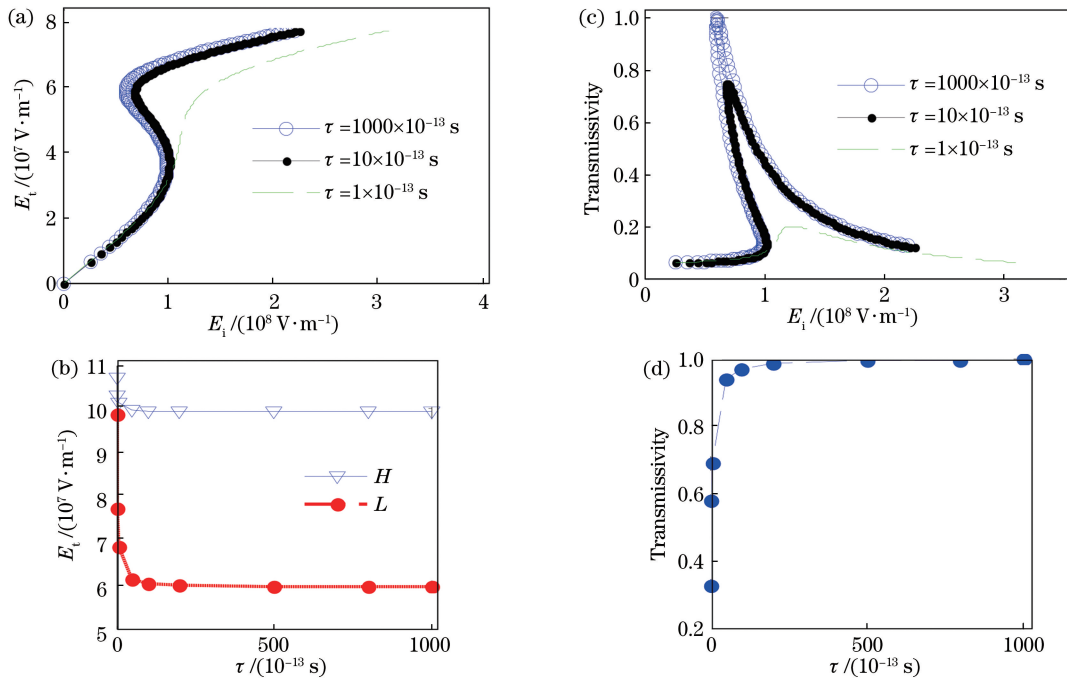


图 3 弛豫时间对光双稳态的影响。(a)入射光振幅与透射光振幅的关系;(b)光双稳态的阈值随弛豫时间的影响;(c)透射率与入射光振幅的关系;(d)弛豫时间对透射率的影响

Fig. 3 Optical bistability varies with delay time. (a) Relation between amplitude of incident light and amplitude of transmission light; (b) influence of optical bistability threshold on delay time; (c) relation between transmissivity and amplitude of incident light; (d) influence of delay time on transmissivity

3.3 石墨烯双光子吸收情况下的光双稳态

考虑单层三阶非线性石墨烯对电磁波的吸收,研究双光子吸收系数对光双稳态产生的影响。含有单层三阶非线性石墨烯的多层介质复合结构的参数: $\epsilon_1 = 1.25, \epsilon_2 = 2.25, \epsilon_3 = 2.75, \epsilon_4 = 1.25$;入射角 $\theta = 75^\circ$, 波长 $\lambda = 100 \mu\text{m}$;费米能级 $E_F = 0.8 \text{ eV}$, $d_2 = d_3 = 4 \mu\text{m}$, 弛豫时间 $\tau = 100 \times 10^{-13} \text{ s}$, 温度 $T = 300 \text{ K}$ 。通过数值模拟计算,得到如图 4(a)所示

的光双稳态变化结果。由于吸收系数的改变对光双稳态有很大影响,从图 4(b)可知,双光子吸收系数越大,双稳态的低阈值的入射光振幅越高,但是双光子吸收系数的变化对双稳态的高阈值的入射光振幅影响不明显。考虑单层三阶非线性石墨烯本身对电磁波的吸收作用,因有部分光被吸收,所以透射率会降低,如图 4(c)、(d)所示,当吸收作用太大时,光双稳态会破坏,光双稳态会因吸收过大而消失。

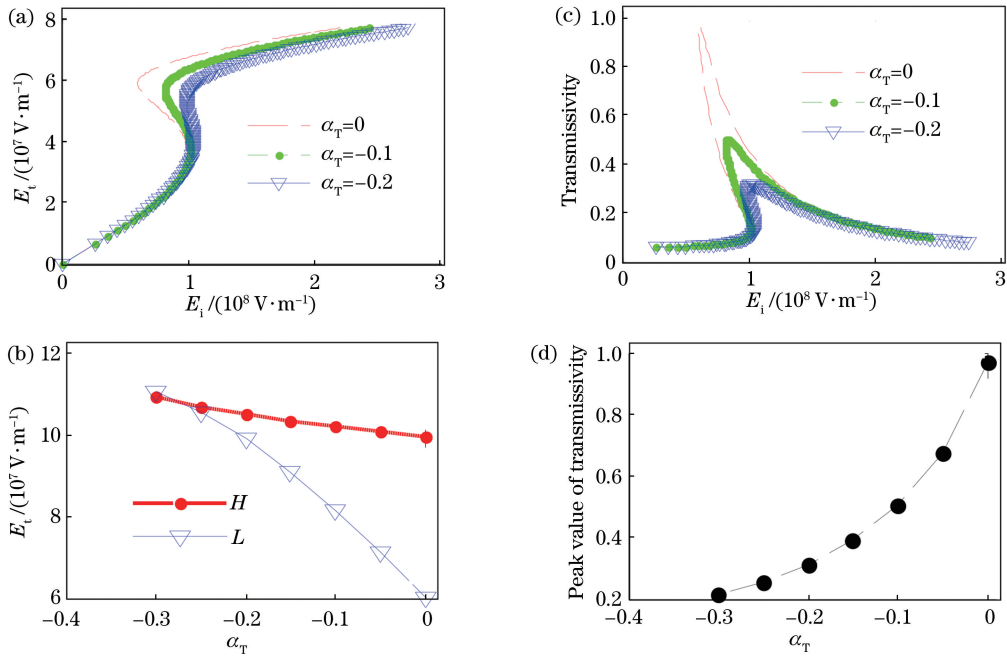


图 4 吸收系数对光双稳态的影响。(a)入射光振幅与透射光振幅的关系;(b)光双稳态的阈值随吸收系数的变化;(c)透射率与入射光振幅的关系;(d)吸收系数对透射率峰值的影响

Fig. 4 Optical bistability varies with absorption coefficient. (a) Relation between amplitude of incident light and amplitude of transmission light; (b) change of optical bistability threshold on absorption coefficient; (c) relation between transmissivity and amplitude of incident light; (d) influence of absorption coefficient on peak value of transmissivity

3.4 单层三阶非线性石墨烯的温度对光双稳态的影响

在不考虑单层三阶非线性石墨烯吸收的情况下,研究单层三阶非线性石墨烯本身温度对光双稳态的影响。其结构层的相关参数: $\epsilon_1 = 1.25$, $\epsilon_2 = 2.25$, $\epsilon_3 = 2.75$, $\epsilon_4 = 1.25$;入射角 $\theta = 75^\circ$, 波长 $\lambda = 100 \mu\text{m}$;费米能级 $E_F = 0.8 \text{ eV}$, $d_2 = d_3 = 4 \mu\text{m}$, 弛豫时间 $\tau = 100 \times 10^{-13} \text{ s}$, 吸收系数 $\alpha_T = 0$ 。通过改变温度,经数值模拟计算得到如图 5 的情况。随温度的变化,在温度变化范围很大的情况下,光双稳态变化很小,随着温度升高,光双稳态的阈值向右平移,但变化很微小,如图 5(a)、(c)所示。温度对双稳态光的透射率峰值的影响也不大,如图 5(b)、(d)所示。由图 5 可知,温度对光双稳态效应的影响很小,所以由夹层中的三阶非线性石墨烯所出现的光双稳态现象对温度不敏感,相对稳定。

4 结 论

研究含有单层三阶非线性石墨烯的多层介质层复合结构的三阶非线性效应和光双稳态现象。

通过数值模拟,研究了单层三阶非线性石墨烯本身相关参数对光双稳态的影响:石墨烯的费米能级越大,光双稳态的阈值越大;石墨烯对电磁波的反应弛豫时间越大,光双稳态的阈值越低。而且弛豫时间不但影响光双稳态的阈值,还影响光的透射率,弛豫时间越大,透射率峰值越大。当弛豫时间较小时,将不存在光双稳态。若考虑石墨烯对电磁波的双光子吸收,双光子吸收越大,双稳态的低阈值越低,当双光子吸收作用太大时,光双稳态会破坏,即光双稳态会因为双光子吸收过大而消失。当石墨烯的温度发生变化时,光双稳态效应受温度的影响不明显,在很大范围内,光双稳态曲线重叠,透射率曲线也是相当稳定,所以光双稳态对温度不敏感。石墨烯的本征特性参数中,弛豫时间和双光子吸收系数会明显改变双稳态的透射率,而透射率则对温度和费米能级不敏感。这些研究实现了单层石墨烯的非线性效应和光双稳态的外调制,可为设计各类微纳结构的光子器件如光开关、光存储、光放大、光传感等提供理论依据和数值参考^[32-33]。

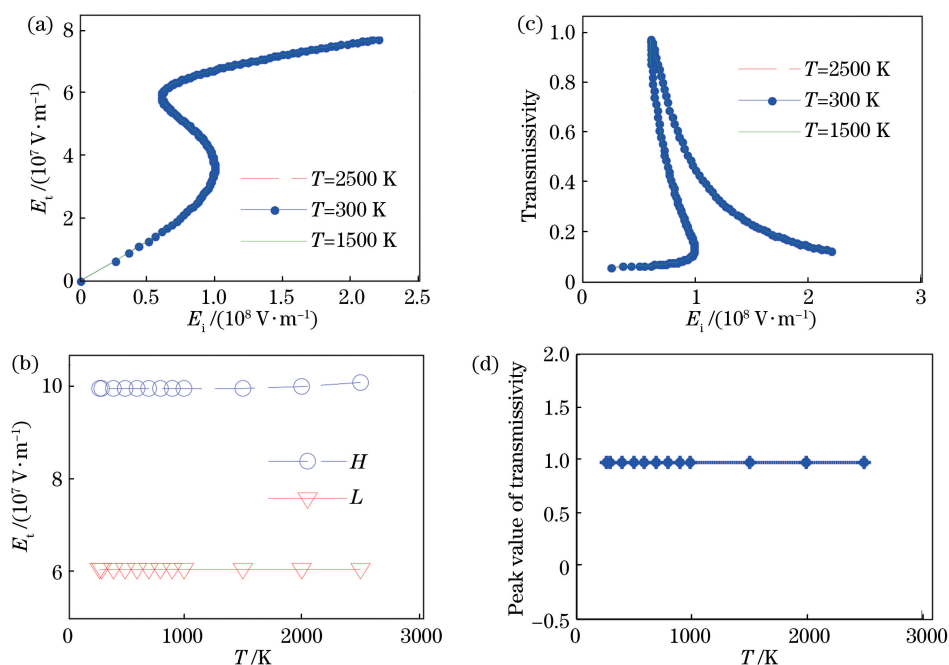


图 5 温度对光双稳态的影响。(a)入射光振幅与透射光振幅的关系;(b)光双稳态的阈值随温度的变化;
(c)透射率与入射光振幅的关系;(d)温度对透射率峰值的影响

Fig. 5 Optical bistability varies with temperature. (a) Relation between amplitude of incident light and amplitude of transmission light; (b) change of optical bistability threshold on temperature; (c) relation between transmissivity and amplitude of incident light; (d) influence of temperature on peak value of transmissivity

参 考 文 献

- [1] Gibbs H M. Optical bistability: controlling light with light[M]. New York: Academic Press, 1985: 5-20.
- [2] Abraham E, Smith S D. Optical bistability and related devices[J]. Reports on Progress in Physics, 1982, 45(8): 815-885.
- [3] Hendry E, Hale P J, Moger J, et al. Coherent nonlinear optical response of graphene[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(9): 097401.
- [4] Zhang H, Virally S, Bao Q L, et al. Z-scan measurement of the nonlinear refractive index of graphene[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1856-1858.
- [5] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [6] Castro Neto A H, Guinea F, Peres N M R, et al. The electronic properties of graphene[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(1): 109-162.
- [7] Liu Y Z, Zhang Y P, Cao Y Y, et al. Modulator of tunable modulation depth based on graphene metamaterial[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1016002.
刘元忠, 张玉萍, 曹妍妍, 等. 基于石墨烯超材料深度可调的调制器[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1016002.
- [8] Assanto G, Wang Z, Hagan D J, et al. All-optical modulation via nonlinear cascading in type II second-harmonic generation[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(15): 2120-2122.
- [9] Mazurenko D A, Kerst R, Dijkhuis J I, et al. Ultrafast optical switching in three-dimensional photonic crystals[J]. Physical Review Letters, 2003, 91(21): 213903.
- [10] Nihei H, Okamoto A. Photonic crystal systems for high-speed optical memory device on an atomic scale[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4416: 470-473.
- [11] Wan P, Yang C H. Properties of graphene TE mode surface plasmons and surface plasmon waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1124002.
万鹏, 杨翠红. 石墨烯 TE 模表面等离子体波和表面等离子体波导的特性[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1124002.
- [12] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator[J]. Nature, 2011, 474(7349): 64-67.
- [13] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics[J]. Nature Photonics, 2010, 4(9): 611-622.
- [14] Simsek E. Improving tuning range and sensitivity of localized SPR sensors with graphene[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(9): 867-

- 870.
- [15] Yanik M F, Fan S H, Soljačić M. High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83 (14): 2739-2741.
- [16] Ju L, Geng B S, Horng J, et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials [J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(10): 630-634.
- [17] Andryieuski A, Lavrinenko A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach [J]. Optics Express, 2013, 21(7): 9144-9155.
- [18] Yang S, Zhou R L, Liu D, et al. Modulation and sensing properties of graphene plasma based on surface electric current boundary condition[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1124001.
杨飒, 周仁龙, 刘丹, 等. 基于表面电流边界的石墨烯等离子体调制特性和传感特性[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1124001.
- [19] Liao G Z, Zhang J, Cai X, et al. All-fiber temperature sensor based on graphene [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706004.
廖国珍, 张军, 蔡祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究 [J]. 光学学报, 2013, 33 (7): 0706004.
- [20] Xiao Y, Zhang J, Cai X, et al. Fiber-optic humidity sensing based on graphene[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406005.
肖毅, 张军, 蔡祥, 等. 基于石墨烯的光纤湿度传感研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406005.
- [21] Fan Y C, Wei Z Y, Li H Q, et al. Photonic band gap of a graphene-embedded quarter-wave stack [J]. Physical Review B, 2013, 88(24): 241403.
- [22] Fan Y C, Zhang F L, Zhao Q, et al. Tunable terahertz coherent perfect absorption in a monolayer graphene[J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6269-6272.
- [23] Kaipa C S R, Yakovlev A B, Hanson G W, et al. Enhanced transmission with a graphene-dielectric microstructure at low-terahertz frequencies [J]. Physical Review B, 2012, 85(24): 245407.
- [24] Bao Q L, Zhang H, Wang Y, et al. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. Advanced Functional Materials, 2009, 19 (19): 3077-3083.
- [25] Lim G K, Chen Z L, Clark J, et al. Giant broadband nonlinear optical absorption response in dispersed graphene single sheets [J]. Nature Photonics, 2011, 5(9): 554-560.
- [26] Mikhailov S A, Ziegler K. Nonlinear electromagnetic response of graphene: frequency multiplication and the self-consistent-field effects [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2008, 20(38): 384204.
- [27] Bao Q L, Chen J Q, Xiang Y J, et al. Nanobubbles: graphene nanobubbles: a new optical nonlinear material (advanced optical materials 6/2015) [J]. Advanced Optical Materials, 2015, 3(6): 715.
- [28] Peres N M R, Bludov Y V, Santos J E, et al. Optical bistability of graphene in the terahertz range [J]. Physical Review B, 2014, 90(12): 125425.
- [29] Xiang Y J, Dai X Y, Guo J, et al. Tunable optical bistability at the graphene-covered nonlinear interface [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104 (5): 051108.
- [30] Zhou R L, Peng J, Yang S, et al. Lifetime and nonlinearity of modulated surface plasmon for black phosphorus sensing application[J]. Nanoscale, 2018, 10(39): 18878-18891.
- [31] Zhou R L, Yang S, Liu D, et al. Confined surface plasmon of fundamental wave and second harmonic waves in graphene nanoribbon arrays [J]. Optics Express, 2017, 25(25): 31478-31491.
- [32] Chen Z H, Zhou R L, Wu L X, et al. Surface plasmon characteristics based on graphene-cavity-coupled waveguide system [J]. Solid State Communications, 2018, 280: 50-55.
- [33] Yang S, Zhou R L, Liu D, et al. Controlling the plasmon-induced transparency system based on Dirac semimetal at mid-infrared band [J]. Optics Communications, 2019, 449: 13-18.