

文章编号: 1001-3806(2018)02-0187-05

石墨烯介质堆栈提高系统调控 Fano 共振能力

卞立安, 刘培国*, 陈雨薇, 李高升
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 为了更加有效地利用亚波长光栅/介质波导结构调控 Fano 共振, 使用石墨烯介质堆栈代替石墨烯单层作为缓冲层, 采用严格耦合波分析方法仿真改进后的结构, 研究了堆栈单元中纳米级介质厚度增强石墨烯电导率的变化对整个堆栈结构等效介电常数的影响。结果表明, 若系统作为高效光开关使用, 则所需的石墨烯化学势改变由原来的 0.06eV 减小到了 0.02eV, 且开关调制深度高达 94%; 若系统作为可调谐吸波体使用, 则其频率调制深度由原来的 0.14THz 增加到了 0.36THz, 大大扩展了吸收谱的调节范围。改进的结构提高了系统调控 Fano 的能力。

关键词: 光栅; 石墨烯介质堆栈; 严格耦合波分析; Fano 共振

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.02.009

Improvement of system tunability for Fano resonance by graphene-dielectric stack

BIAN Li'an, LIU Peiguo, CHEN Yuwei, LI Gaosheng

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To enhance the tunability of subwavelength grating/waveguide structure for Fano resonance, the embedded graphene monolayer was replaced by graphene-dielectric stack as a buffer layer. The improved structure was simulated by using the method of rigorous coupled-wave analysis. Nanoscale dielectric thickness in each stack cell can strengthen the effects of the alteration of graphene's conductivity on the equivalent permittivity of stack structure. The results show that, if the system is exploited as an efficient photoswitch, the demanded change of chemical potential of graphene decreases from original 0.06eV down to 0.02eV and the modulation depth of the switch is up to 94%. If the system is employed as a tunable absorber, the frequency modulation depth of absorption spectrum is raised from 0.14THz to 0.36THz and the tuning range is extended greatly. The improved structure strengthens the tunability of system for Fano resonance.

Key words: gratings; graphene-dielectric stack; rigorous coupled-wave analysis; Fano resonance

引 言

石墨烯作为一种 2 维材料具有许多独特的属性, 如高的载流子迁移率、良好的热传导以及频率无关的光吸收。此外, 在太赫兹波段改变外加电压能够调节石墨烯的表面电导率, 这样改变石墨烯的电门就可调控石墨烯器件的光电特性。目前, 大量的可调谐太赫兹石墨烯器件被报道^[1-4]。

作为窄的离散状态和宽的连续状态之间耦合的结果^[5], Fano 共振能够产生非对称的传输谱和反射谱以及对称的吸收谱。在远场, 这种效应表现为增强反射、抑制透射; 在近场, 表现为强的电场局域。基于传输曲

线或反射曲线的陡峭特性, 各种窄带滤波器被设计^[6-7]。基于大的电场提高, 吸波体和非线性介质开关被制作^[8-9]。

如果将 Fano 共振效应应用于石墨烯器件中, 那么通过控制石墨烯电门就可以平移系统的传输谱, 这样可实现高低通之间的转换, 即实现可调谐光开关的功能。同时, 石墨烯作为一种有耗材料可有效吸收入射能量, 因此基于 Fano 共振的石墨烯器件也可作为可调谐吸波体。然而, 若直接将石墨烯单层嵌入到典型的光栅/波导结构中, 由于厚的波导层, 石墨烯的调节能力会受到很大限制。为此, 本文中使用了石墨烯介质堆栈替代石墨烯单层, 而每个周期单元中介质厚度较小, 最终, 改进的结构具有强的调谐能力。

1 石墨烯模型

石墨烯可看作理想的 2 维材料或真实的 3 维超薄

作者简介: 卞立安(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事石墨烯器件设计方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: pg731@126.com

收稿日期: 2017-04-24; 收到修改稿日期: 2017-05-31

材料。作为2维材料,石墨烯的电特性使用表面电导率 σ_g 来表征,电导率 σ_g 包括带内贡献和带外贡献。在太赫兹波段,带内贡献占主导,而带外贡献可以忽略不计,在条件 $\mu_c \gg k_B T_a$ (k_B 为玻尔兹曼常数, T_a 为绝对温度)下, σ_g 可表示为^[10]:

$$\sigma_g = \frac{e_0^2 \mu_c}{\pi \hbar^2} \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}} \quad (1)$$

式中, e_0 为元电荷, \hbar 为约化普朗克常量, ω 为工作角频率, μ_c 为石墨烯化学势,与外加电压和化学掺杂有关, τ 为弛豫时间,与石墨烯质量有关。作为3维材料,石墨烯使用介电常数 ϵ_g 来表征其电特性。表面电导率 σ_g 与介电常数 ϵ_g 有如下关系: $\epsilon_g = 1 + i\sigma_g / (\omega \epsilon_0 d_g)$, 其中, ϵ_0 为空气的绝对介电常数, $d_g = 0.34\text{nm}$ 为单层石墨烯的厚度。

2 系统初始结构及仿真结果

2.1 系统初始结构

图1显示了嵌有单层石墨烯的亚波长光栅/波导结构。光栅由硅脊和空气槽构成,波导使用 SiO_2 材料。标记光栅周期和脊宽分别为 p 和 w , 则光栅填充因子 $\eta = w/p$ 。栅和波导高度设为 d 和 h 。石墨烯位于光栅与波导层之间。为了准确地仿真该结构,采用严格耦合波分析方法^[11]。通过分别加和前向衍射和后向衍射效率,可求得系统传输率 T 和反射率 R 。吸收率 A 可由公式 $A = 1 - T - R$ 求得。仿真中,将石墨烯当作真实的3维材料。假设TE平面太赫兹波垂直入射,即入射角度 $\theta = 0^\circ$, 同时为了不激发等离子体响应,令电场方向平行于栅脊。在太赫兹波段,设定 $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 3.9$ 和 $\epsilon_{\text{Si}} = 11.9$ 是合理的^[12]。结构参量优化如下: $h = 15.2\mu\text{m}$, $d = 7.6\mu\text{m}$, $p = 49.8\mu\text{m}$, $\eta = 0.91$ 。

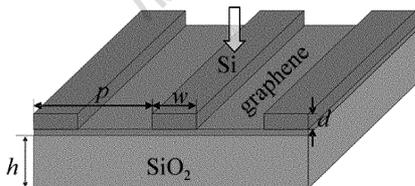


Fig. 1 Subwavelength grating/waveguide structure with embedded graphene monolayer

2.2 仿真结果

为了降低石墨烯吸收损耗的影响,考虑 $\tau = 1\text{ps}$ 。图2显示了系统的传输特性。可以看出在Fano共振频率 4.88THz 附近,传输率呈现出由低到高的急剧变化。增加石墨烯化学势能够蓝移共振点,这样在 4.885THz 处实现了开关功能。 $\mu_c = 0.10\text{eV}$ 对应 on 状

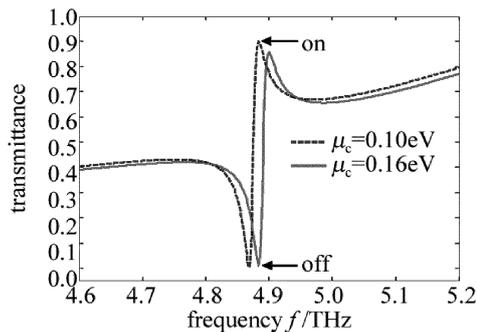


Fig. 2 Relationship between transmittance and frequency with different graphene chemical potentials

态, $\mu_c = 0.16\text{eV}$ 对应 off 状态。

为了提高石墨烯的吸波能力,石墨烯化学势和弛豫时间改变为 $\mu_c = 0.60\text{eV}$ 和 $\tau = 0.5\text{ps}$ 。图3中给出了系统的吸收曲线并与无栅情况进行了对比。在 4.99THz 处,有栅结构和无栅结构的吸收率分别为 64.01% 和 4.34% 。这说明Fano共振能够有效提高石墨烯的吸波性能,那么有栅结构可作为太赫兹吸波体。由于Fano共振增强了石墨烯处的电场和结构本身的

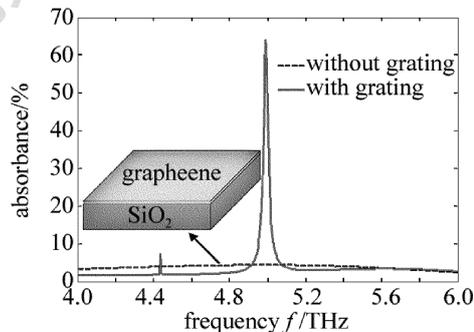


Fig. 3 Relationship between absorbance and frequency with and without grating

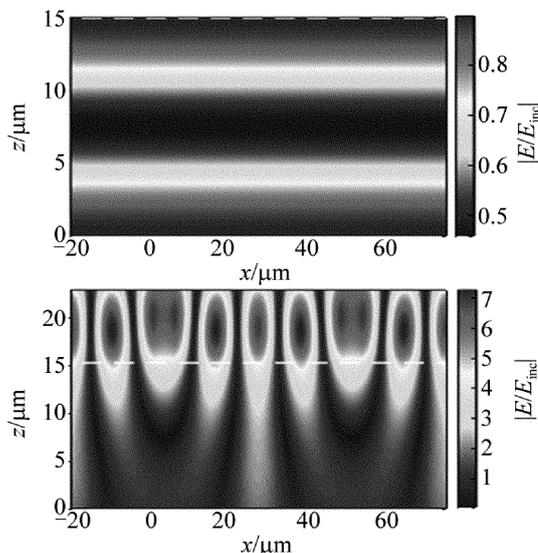


Fig. 4 Normalized field profiles at the frequency of 4.99THz
a—without grating b—with grating

非对称性,所以有栅结构吸收率能够突破对称结构的 50% 上限^[13]。然而,其结构底部不存在完美反射镜,因此作为一个二端口系统无法实现完美吸波。对于无光栅结构,由于不存在场的局域,所示系统吸收率一直保持在较低的水平。图 4 显示了 4.99THz 处无栅结构和有栅结构的电场分布。可见,光栅 Fano 共振的激发确实提高了石墨烯处的电场强度,进而提高了系统电磁吸收率。

图 5 显示了石墨烯化学势对有栅结构吸收率的调节。增大 μ_c 使得吸收率不断增加,同时,吸收谱向高频方向移动,则该结构可作为可调谐吸波体。结合 (1) 式和表面阻抗公式 $Z = 1/\sigma_g$ 可知,石墨烯表面阻抗实部随着 μ_c 增加而增加,因此吸收率增大。此外,石墨烯的对外电特性由其表面电导率表征,假定 Fano 共振时 σ_g 保持不变,那么当 μ_c 增大, ω 必然增大,所以吸收谱右移。综合图 2 与图 5,石墨烯均表现出一定的可调谐特性。

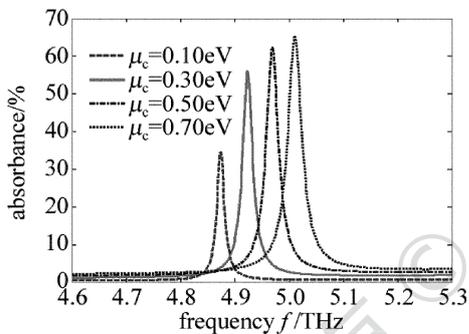


Fig. 5 Relationship between absorbance and frequency with grating under different chemical potentials

3 系统改进结构及仿真结果

3.1 系统改进结构

为了提高系统的调谐性能,引入石墨烯介质堆栈作为缓冲层,以形成光栅/堆栈缓冲层/波导 (grating/stack buffer layer/waveguide, GSBW) 结构,如图 6 所示。图 6 中, d_d 为一个周期单元中 SiO_2 的厚度, n 为石墨烯/ SiO_2 周期数。在缓冲层中同样采用 SiO_2 介质,那么整个缓冲层的等效介电常数 ϵ_{stack} 可由下式计算^[14]:

$$\epsilon_{\text{stack}} = \epsilon_d + i \frac{\sigma_g}{\omega \epsilon_0 d_d} \quad (2)$$

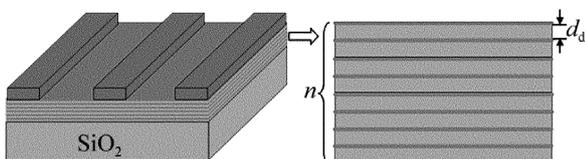


Fig. 6 a—GSBW structure b—front view of graphene dielectric stack

式中, ϵ_d 为 SiO_2 的介电常数, ϵ_0 为真空介电常数。介质厚度 d_d 越大,改变 σ_g 对 ϵ_{stack} 的影响越小。在图 1 中,可将石墨烯与 SiO_2 波导等效为一混合介质,由于波导厚度 h 较大,所以调节 σ_g 对系统传输率和吸收率的改变相对较小。在这里,将缓冲层周期单元中 SiO_2 厚度设置为纳米量级,可有效提高系统调谐能力。

3.2 仿真结果

为了增强传输抑制吸收,重新设定 $\tau = 1\text{ps}$ 。考虑 $d_d = 50\text{nm}$ 和 $n = 5$,改进结构的传输谱显示在图 7 中。 $\mu_c = 0.10\text{eV}$ 对应 on 状态, $\mu_c = 0.12\text{eV}$ 对应 off 状态。对比图 2,系统的调谐能力增强。由于共振处传输曲线十分陡峭,所以这里调谐性能的提高不是特别明显。然而,多层石墨烯增大了系统的吸收损耗,导致最大传输率下降。若令 T_{on} 和 T_{off} 分别表示系统处于 on 状态和 off 状态下的传输率,则可知开关的调制深度 $\Delta T = [T_{\text{on}} - T_{\text{off}}]/T_{\text{on}}$ 由原来的 99% 降低为 94%。

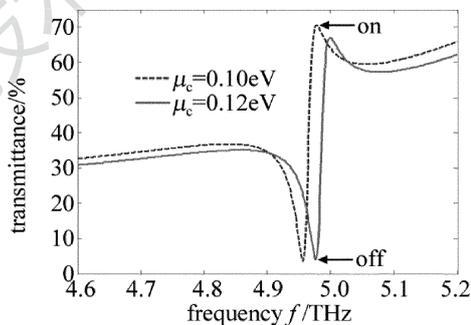


Fig. 7 Influence of graphene chemical potentials on transmission of GSBW structure

为了增强石墨烯的吸波率,再次设定 $\tau = 0.5\text{ps}$ 。图 8 中给出了系统吸收率随石墨烯化学势增大的变化情况。对比图 5,系统的调谐能力明显提高,频率调制深度 $\Delta f = f(\mu_c = 0.70\text{eV}) - f(\mu_c = 0.10\text{eV})$ 由原来的 0.14THz 变化为 0.36THz。此外,由于多层石墨烯的出现,系统吸波性能显著增强。

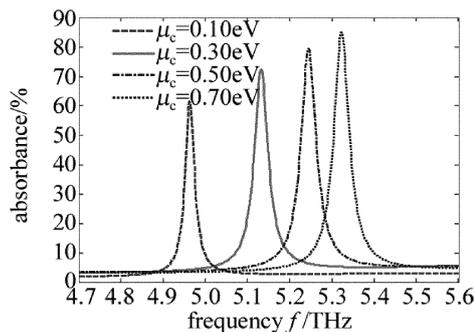


Fig. 8 Influence of graphene chemical potentials on absorbance of GSBW structure

图 9 中显示了 $\mu_c = 0.20\text{eV}$ 时,系统吸收率随 d_d

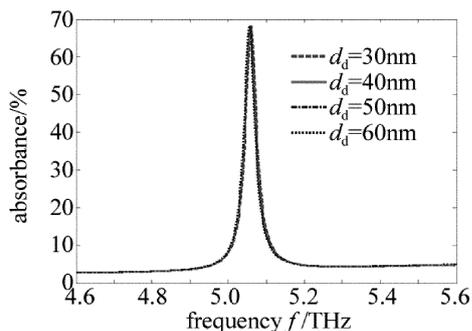


Fig. 9 Influence of d_d on absorbance of GSBW structure

的变化情况。随着 d_d 的增加,系统吸收率无明显变化。这说明,该结构对于 SiO_2 薄层厚度的变动具有良好的鲁棒性。

图 10 中给出了 $\mu_c = 0.20\text{eV}$ 和 $d_d = 50\text{nm}$ 时,吸收率随周期数 n 的变化情况。随着 n 的增加,吸收谱右移,这说明调节缓冲层的厚度可实现 Fano 共振点的移动。此外,石墨烯层数随着 n 的增加而增加,因此系统吸收率提高。

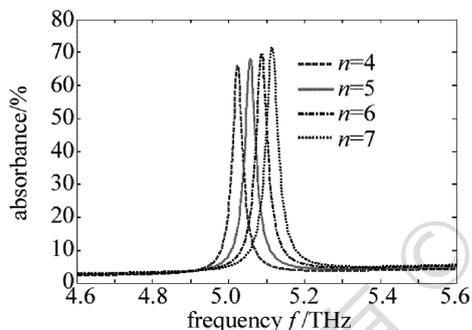


Fig. 10 Influence of n on absorbance of GSBW structure

图 11 中显示了 $\mu_c = 0.20\text{eV}$, $d_d = 50\text{nm}$, $n = 5$ 时,吸收率随入射角度的变化情况。当 $\theta = 0^\circ$ 时, $\pm m$ 级衍射波是简并的。当电磁波斜入射时,简并性被破坏, $\pm m$ 级衍射波共振点分离。根据相位匹配条件^[15] $\beta \rightarrow \beta_j = k(\sqrt{\epsilon_c} \sin\theta_{\text{inc}} - j\lambda/p)$, 其中 β 为传播常数, j 为衍射级次,波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为自由空间波长, ϵ_c 为覆盖媒质的介电常数, θ_{inc} 为入射角度,则在 β 不变的条件

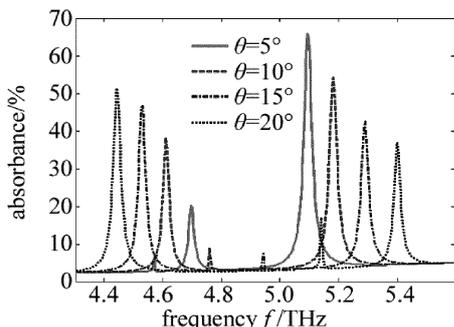


Fig. 11 Influence of incident angle θ on absorbance of GSBW structure

下,对于 $+m$ 级衍射波,其共振点向低频方向移动;相反,对于 $-m$ 级衍射波,共振点向高频方向移动^[16]。因此,吸收谱表现出下图所示的分离现象,且角度越大,分离程度越高。同时,随着入射角度的增大, $+m$ 级衍射波对应的吸收率增大,而 $-m$ 级衍射波对应的吸收率不断减小。

既然改变石墨烯化学势和电磁波入射角度均能够实现吸收谱的有效调节,那么综合改变 μ_c 和 θ 可实现确定频率下吸收率和吸收谱半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 的调节。如图 12 所示,在 5.39THz 处,实现了吸收率的上下调节。系统吸收率增加的同时,FWHM 也增加,这说明系统对外的电磁泄漏速率不断增加。但是,作为二端口单极点网络,系统的临界耦合条件不可能满足,因而依然没有获得完美吸波。不过,基于这样的综合调控,该结构可以作为太赫兹衰减器和调制器。

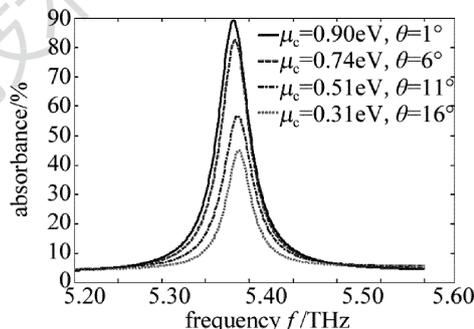


Fig. 12 Influences of both graphene chemical potential and incident angle on absorbance of GSBW structure

4 结论

借助石墨烯的电调制能力和 Fano 共振受参量波动导致光能量重新分配的特有属性,亚波长光栅/石墨烯/介质波导结构实现了光开关和可调谐吸波体的功能。通过计算石墨烯介质堆栈等效介电常数发现,周期单元中超薄介质的采用能够提高石墨烯电导率的变化对整个周期结构等效介电常数的影响,进而提高对 GSBW 结构 Fano 共振的调控能力。该结构不仅在 4.98THz 处保持了开关功能,而且将吸收谱的频率调制深度从原有的 0.14THz 提高到了 0.36THz 。联合角度调制,GSBW 结构在 5.39THz 处还实现了衰减器和调制器的功能。

参考文献

- [1] HE M D, WANG K J, WANG L, *et al.* Graphene-based terahertz tunable plasmonics directional coupler[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(8): 081903.

- [2] DONGY F, LIUP G, YU D W, *et al.* Dual-band reconfigurable terahertz patch antenna with graphene-stack-based backing cavity [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1541-1544.
- [3] ANDRYIEUSKI A, LAVRINENKO A V. Graphenemetamaterials based tunable terahertz absorber; effective surface conductivity approach[J]. Optics Express, 2013, 21(7): 9144-9155.
- [4] GUO C C, ZHU Z H, YUAN X D, *et al.* Experimental demonstration of total absorption over 99% in the near infrared for monolayer-graphene-based subwavelength structures [J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(2): 1955-1960.
- [5] ZHOU W D, ZHAO D Y, SHUAI Y C, *et al.* Progress in 2-D photonic crystal Fano resonance photonics [J]. Progress in Quantum Electronics, 2014, 38(1): 1-74.
- [6] ZHENG H Y, HU F R. Design of narrowband guided-mode resonance filters in visible wavelength region [J]. Laser Technology, 2016, 40(1): 118-121 (in Chinese).
- [7] WANG Q, ZHANG D W, CHEN J B, *et al.* Recent progress of guided-mode resonance filters [J]. Laser Technology, 2010, 34(1): 71-74 (in Chinese).
- [8] GRANDE M, VINCENTI M A, STOMEIO T, *et al.* Graphene-based perfect optical absorbers harnessing guided mode resonances [J]. Optics Express, 2015, 23(16): 21032-21042.
- [9] MIZUTANI A, KIKUTA H, LWATA K. Numerical study on an asymmetric guided-mode resonant grating with a Kerr medium for optical switching [J]. Journal of the Optical Society of America, 2005, A22(2): 355-360.
- [10] FARHAT M, ROCKSTUHL C, BAGCI H. A 3-D tunable and multi-frequency grapheme plasmonic cloak [J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12592-12603.
- [11] MOHARAM M G, GRANN E B, POMMET D A. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. Journal of the Optical Society of America, 1995, A12(5): 1068-1076.
- [12] JONES M H, JONES S H. The general properties of Si, Ge, SiGe, SiO₂ and Si₃N₄ [EB/OL]. [2017-03-24]. <http://www.virginiasemi.com/pdf/generalpropertyssi62002.pdf>.
- [13] PIPER J R, LIU V, FAN S H. Total absorption by degenerate critical coupling [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(25): 251110.
- [14] EI-NAGGAR S A. Tunable terahertz omnidirectional photonic gap in one dimensional graphene-based photonic crystal [J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(7): 1627-1636.
- [15] WANG S S, MAGNUSSON R. Theory and applications of guided-mode resonance filters [J]. Applied Optics, 1993, 32(14): 2608-2613.
- [16] SANG T, WANG Zh S, WU Y G, *et al.* Research on guided-mode resonance for sub-wavelength dielectric grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 641-645 (in Chinese).