

基于多层F-P谐振腔的石墨烯吸波体设计

陈雨微, 卞立安, 刘培国, 王建, 范崇祎

Design of graphene absorber based on multilayer F-P resonator

引用本文:

陈雨微, 卞立安, 刘培国, 王建, 范崇. 基于多层F-P谐振腔的石墨烯吸波体设计[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 317-321.

CHEN Yuwei, BIAN Li'an, LIU Peiguo, WANG Jian, FAN Chongyi. Design of graphene absorber based on multilayer F-P resonator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(3): 317-321.

您可能感兴趣的其他文章

1. 新型绝热微环谐振腔型低功耗硅基调制器的设计

引用本文: 杨真. 新型绝热微环谐振腔型低功耗硅基调制器的设计[J]. *激光技术*, 2015, 39(6): 885-888.

2. 可调谐单纵模多波长光纤激光器的研究

引用本文: 陈龙辉, 谢芳, 郭晓蕾, 等. 可调谐单纵模多波长光纤激光器的研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 681-685.

3. 用于高功率径向偏振光的组合轴锥镜设计

引用本文: 王智用, 胡友友, 李波, 等. 用于高功率径向偏振光的组合轴锥镜设计[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 846-851.

4. 可调谐太赫兹等离子体诱导透明的研究

引用本文: 尹权韬, 姚刚, 石松杰, 等. 可调谐太赫兹等离子体诱导透明的研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 826-830.

5. 基于300 μm 微片激光器生成涡旋空心光束的研究

引用本文: 王钊苏, 钱壮林, 张恒, 等. 基于300 μm 微片激光器生成涡旋空心光束的研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 776-781.

文章编号: 1001-3806(2023)03-0317-05

基于多层 F-P 谐振腔的石墨烯吸波体设计

陈雨微¹, 卞立安^{2*}, 刘培国¹, 王 建¹, 范崇祯¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 长沙 410073; 2. 长沙理工大学 物理与电子科学学院, 长沙 410114)

摘要: 为了研究当单层石墨烯位于多层 Fabry-Pérot (F-P) 谐振腔中时, 系统近全吸波模式与多层 F-P 谐振腔数目之间的关系, 同时提高系统对吸波模式的调控能力, 采用严格耦合波分析法, 对石墨烯多层 F-P 谐振腔系统的吸波响应进行了研究, 分析了临界耦合条件下双层和 3 层 F-P 谐振腔结构的光谱响应特征。结果表明, 双层和 3 层 F-P 谐振腔可调谐近全吸波体, 分别形成了两个 99% 以上和 3 个 96% 以上的近全吸波模式; 通过对石墨烯掺杂可以实现对 3 层 F-P 谐振腔系统吸波特性的调节, 通过改变 3 层谐振腔的结构可以控制系统吸收模式的数量和相对位置。该研究为可调谐近全吸波系统引入更丰富的吸波线型。

关键词: 光学器件; 吸波体; 严格耦合波分析; Fabry-Pérot 谐振; 石墨烯

中图分类号: TN24; O436.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.03.005

Design of graphene absorber based on multilayer F-P resonator

CHEN Yuwei¹, BIAN Li'an², LIU Peiguo¹, WANG Jian¹, FAN Chongyi¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. School of Physics & Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To find the connection between the number of near-full absorbing mode and the Fabry-Pérot (F-P) multilayer F-P cavity when single-layer graphene is located in the multilayer F-P cavity and to improve the system's controlling ability to the diversity of absorbing modes, rigorous coupled-wave analysis was adopted. The response characteristics of two-layer and three-layer F-P resonator under critical coupling conditions were analyzed. The results show that perfect absorbing modes of more than 99% and 96% can be respectively formed in two-layer and three-layer F-P cavity systems. Among them, the absorption characteristics of three-layer F-P nested cavity system can be adjusted by doping graphene, and the number and relative positions of absorption modes of three-layer nested cavity can be controlled by changing the structure of three-layer F-P cavity. The system introduces a richer absorbing line type.

Key words: optical devices; absorber; rigorous coupled-wave analysis; Fabry-Pérot resonance; graphene

引 言

对太赫兹频段的开发利用已成为发展 5G 通信技术过程中的重点研究对象, 其中太赫兹吸波体可以有效减少信号干扰, 是太赫兹无线通信中的必要组成部分。石墨烯凭借其可调性^[1]、高载流子迁移率^[2]等独特的光电特性, 为太赫兹吸波体的设计提供了一种全新的可能性, 因此被广泛应用于太赫兹吸波体设计中^[3-4]。但是, 单层石墨烯的吸波率只有 2.3%^[5], 不足以直接应用于高效的光电器件中。因此在基于石墨

烯的器件设计中, 提高石墨烯的光吸收率非常重要。

在现有研究中, 通常用石墨烯与光子晶体复用来增加石墨烯的陷光能力, 比如将缺陷引入 1 维光子晶体, 通过单端口法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 谐振结构实现完美吸收^[6], F-P 谐振器的设计中通常将缺陷引入 1 维光子晶体^[7-10]。传统的单层石墨烯 F-P 谐振腔在达到临界耦合条件时会产生单模吸收峰^[11], 参考文献^[12]中证明了石墨烯在 F-P 谐振腔外时, 仍可以产生 F-P 谐振模式, 且谐振模式的数量与缺陷的数目直接相关。当石墨烯位于多层 F-P 谐振腔中时, 难以定义单层石墨烯与 F-P 谐振腔数目之间的关系, 因此有必要对可调谐多层 F-P 谐振腔进行深入研究。

本文中分析了临界耦合条件下双层和 3 层 F-P 谐振腔结构的光谱响应特征, 提出了一种具有 3 个近全吸收模式的 3 层 F-P 谐振腔吸波体结构。该结构既可

作者简介: 陈雨微 (1993-), 女, 助理研究员, 现主要从事通信器件及雷达成像方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: dk061bianlian@126.com

收稿日期: 2022-05-09; 收到修改稿日期: 2022-08-24

以通过对石墨烯掺杂实现对吸波特性的调节,又可以通过改变多层谐振腔的结构控制系统吸收模式的数量和相对位置,为可调性近全吸波体的设计引入了更丰富的吸波线型。

1 严格耦合波分析法及石墨烯模型

本文中采用的数学模型为严格耦合波分析法(rigorous coupled-wave analysis, RCWA),该方法是麦克斯韦方程应用于电磁散射结构的精确解。该方法直接、非迭代、具有确定性,已经广泛用于衍射结构的分析和设计中。利用 RCWA 方法,透射率 T 和反射率 R 可以通过累积前向和后向衍射效率分别计算^[13],吸波率 $A=1-R-T$ 。其中将石墨烯视为介电常数为 ε 的 3 维材料,电导率使用 σ 表示^[14]:

$$\sigma = \frac{2je^2k_B\hat{T}}{\pi\hbar^2\omega} \ln \left[2\cosh \left(\frac{\mu_c}{2k_B\hat{T}} \right) \right] + \frac{e^2}{4\hbar} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left[\frac{(\hbar\omega - 2|\mu_c|)}{2k_B\hat{T}} \right] + \frac{j}{2\pi} \ln \left[\frac{\hbar\omega - 2|\mu_c|^2 + (2k_B\hat{T})^2}{(\hbar\omega + 2|\mu_c|)^2} \right] \right\} \quad (1)$$

式中, e 为电子电荷; \hbar 为约化普朗克常数; k_B 为玻尔兹曼常数; \hat{T} 为绝对温度; μ_c 为石墨烯化学势,可以通过门电压调节进行改变; ω 为入射光角频率。

由电导率可以计算出石墨烯的介电常数,具体表达式如下^[15]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{Im}[\sigma]}{\omega\varepsilon_0d_g} + j \cdot \frac{\text{Re}[\sigma]}{\omega\varepsilon_0d_g} \quad (2)$$

式中, 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 系统结构及仿真结果

2.1 系统结构

图 1 为两种 F-P 谐振完美吸波结构,分别记为结构 1 和结构 2。其中构成光子晶体的 1/4 波长介质 A 和 B 分别为二氧化硅(SiO_2)和硅(Si), SiO_2 的介电常数 $\varepsilon_A=3.9$,厚度 $d_A=\lambda_0/4\sqrt{\varepsilon_A}$, Si 的介电常数 $\varepsilon_B=11.9$,厚度 $d_B=\lambda_0/4\sqrt{\varepsilon_B}$, λ_0 为中心频率对应波长。结构中的顶部镜子和底部镜子为 A 和 B 的堆栈结构, n 和 m 分别为顶部镜子和底部镜子的堆栈的数目。假设中心频率 $f_0=2.5 \text{ THz}$, $\lambda_0=c/f_0$, c 为光速,取 $m=3$, $n=10$,将各参数代入(3)式可得到光子禁带范围 Δf 为 $2.062 \text{ THz} \sim 2.938 \text{ THz}$ 。

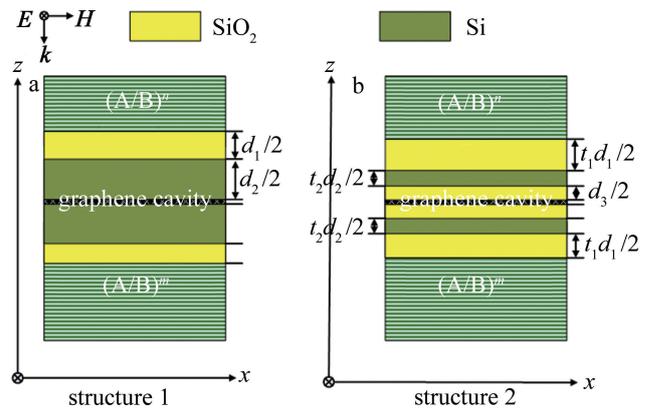


图 1 多层 F-P 谐振腔完美吸波体结构示意图

Fig. 1 Structure of multilayer F-P cavity absorber

$$\Delta f = \frac{4f_0}{\pi} \left[\arcsin \left(\frac{|\sqrt{\varepsilon_A} - \sqrt{\varepsilon_B}|}{\sqrt{\varepsilon_A} + \sqrt{\varepsilon_B}} \right) \right] \quad (3)$$

结构 1 为双层石墨烯 F-P 谐振腔结构,如图 1a 所示。结构 1 以 SiO_2 材料、厚度为 d_1 的 F-P 谐振腔为第 1 层谐振腔,在其中心嵌入厚度为 d_2 、材料为 Si 的缺陷腔(第 2 层谐振腔),石墨烯单层在 Si 材料缺陷腔中心。结构 1 的顶部镜子采用 Si 和 SiO_2 堆栈结构 $(A/B)^n$,底部镜子采用 $(A/B)^m$ 结构。

结构 2 为 3 层谐振腔吸波体结构,在结构 1 的基础上,结构 2 在结构 1 材料为 Si 的第 2 层谐振腔内再次嵌入厚度为 d_3 、材料为 SiO_2 的第 3 层谐振腔,石墨烯单层保持在第 3 层 SiO_2 缺陷腔中心位置,第 1 层腔总厚度为 d_1 ,第 2 层腔总厚度为 d_2 。再进一步优化设计,将结构 2 的第 2 层腔、第 3 层腔在上级腔内的位置设为待优化参数,其中第 1 层腔顶部厚度为 $t_1d_1/2$ 、底部厚度为 $d_1(1-t_1/2)$,第 2 层腔的顶部厚度为 $t_2d_2/2$ 、底部厚度为 $d_2(1-t_2/2)$,如图 1b 所示, t_1 和 t_2 为谐振腔位置的比例因子,且保持 3 层腔的总厚度为 $d_1+d_2+d_3$ 不变。最终 3 层谐振腔结构如图 1b 所示。

2.2 系统响应分析

为实现完美吸收,需要对结构的参数进行优化设计。对于结构 1 设计的双层谐振腔,其优化设计参数如表 1 所示。

表 1 结构 1 的双层 F-P 谐振腔的优化参数表

Table 1 Optimization parameters of double-layer F-P resonator cavity of structure 1

parameter	value
μ_c	0.25 eV
τ	0.1 ps
d_1	$0.135\lambda_0$
d_2	$0.275\lambda_0$

图 2 为结构 1 的吸收谱、反射谱和传输谱。从图

中可以看出,结构 1 由于双层谐振腔产生的 F-P 谐振形成了两个完美吸收峰,它们的吸收率分别达到了 99.27% 和 99.57%,谐振点频率分别为 2.2114 THz 和 2.8366 THz,将它们分别标记为模式 1 和模式 2。

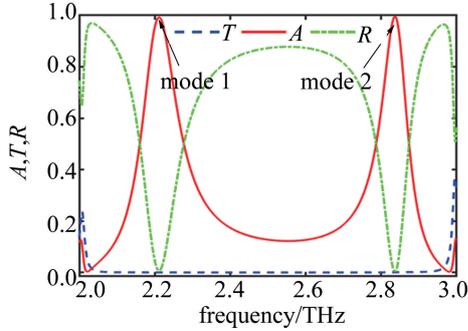


图 2 结构 1 的双层 F-P 谐振腔的吸收谱、反射谱和传输谱

Fig. 2 Absorbance, reflectance and transmittance of double-layer F-P resonance cavity of structure 1

模式 1 和模式 2 这两个光子带隙内完美吸波峰的产生得益于谐振腔的加入,为了分析两层谐振腔对两个吸波峰的具体贡献,进一步对其两个谐振频率的电场进行分析。图 3 为结构 1 谐振频率的电场分布图。其中图 3a 为模式 1,谐振频率为 2.2114 THz;图 3b 为模式 2,谐振频率为 2.8366 THz,黑色虚线和白色实线分别标记了石墨烯和 F-P 谐振腔的位置。从图 3 中可以看出,模式 1 中电场局域在临近石墨烯单层的第 2 层 Si 腔的上半腔中,而模式 2 的电场则局域在第 2 层谐振腔的下半腔中。两个谐振模式的最强电场并不分别分布于两个谐振腔中,而是分布在同一谐振腔中,验证了多层谐振腔的工作原理并不是从数目上增加从而实现更多的 F-P 谐振模式。但是多层谐振腔的加入使得入射波在光子禁带范围内达到了两个临界耦合条件,因此谐振模式数量增加。对于结构 2 设计的 3 层 F-P 谐振腔,其优化设计参数如表 2 所示。

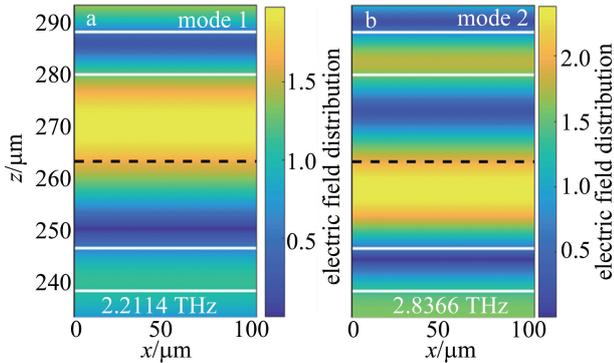


图 3 结构 1 的双层 F-P 谐振腔谐振频率的电场分布

Fig. 3 Electric field distribution at resonant frequency of double-layer F-P resonance cavity of structure 1

表 2 结构 2 的 3 层 F-P 谐振腔的优化参数表

Table 2 Optimization parameters of three-layer F-P resonator cavity of structure 2

parameter	value
μ_c	0.2 eV
τ	0.2 ps
d_1	$0.6\lambda_0$
d_2	$0.135\lambda_0$
d_3	$0.35\lambda_0$
t_1	0.5
t_2	0.5

图 4 为结构 2 的吸收谱、反射谱和传输谱。从图中可以看出,结构 2 设计的 3 层 F-P 谐振腔产生了 3 个完美吸收峰,它们的吸收率分别达到了 97.8%、96.87% 和 96.54%,谐振点频率分别为 2.0782 THz、2.4103 THz 和 2.8100 THz,将它们分别标记为模式 1、模式 2 和模式 3。

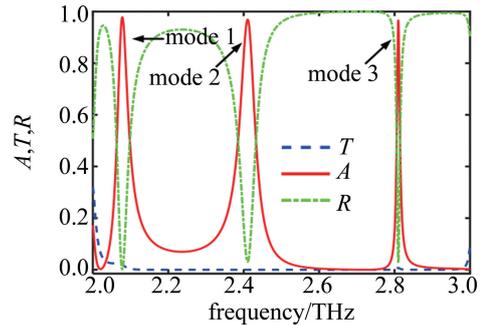


图 4 结构 2 的 3 层 F-P 谐振腔的吸收谱、反射谱和传输谱

Fig. 4 Absorbance, reflectance and transmittance of three-layer F-P resonance cavity of structure 2

图 5 为结构 2 谐振频率的电场分布图。其中图 5a 为模式 1,谐振频率为 2.0782 THz;图 5b 为模式 2,谐振频率为 2.4103 THz;图 5c 为模式 3,谐振频率为 2.8100 THz。可以看出,模式 1 的电场主要局域在第 1 层和第 3 层腔体上半部分,模式 2 主要为第 1 层腔体

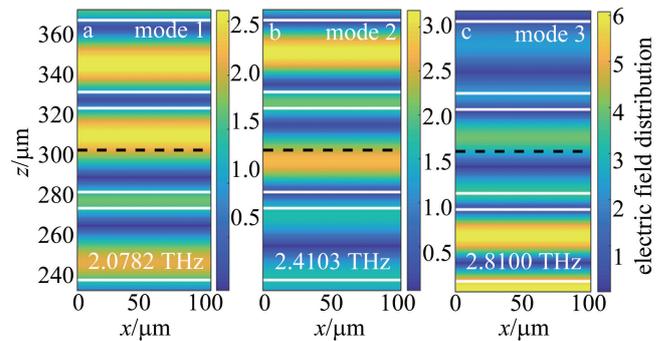


图 5 结构 2 的 3 层 F-P 谐振腔谐振频率的电场分布

Fig. 5 Electric field distribution at resonant frequency of three-layer F-P resonance cavity of structure 2

上部以及石墨烯薄膜附近,模式3则为第1层腔体下部。测量3个模式的半峰全宽(full width at half maxima, FWHM),可求得模式1、模式2、模式3的 Q 因子分别为60、50和312,该结果与模式3局域电场最强对应,表明局域电场强度与 Q 值相关,局域电场越强, Q 值越高。模式3的局域电场出现位置并不在石墨烯临近电场附近,而是出现在距离石墨烯最远的第1层腔内。

综合分析两种结构,它们在达到近100%吸波时的电场分布(见图3和图5)说明了系统吸收并不依赖于石墨烯处的电场。完美吸收产生的本质取决于临界耦合条件,临界耦合发生时最强的局域电场并不一定发生在石墨烯周围。因此在系统中引入单层石墨烯,在禁带范围内并不只有一个谐振模式,谐振模式的个数与在谐振腔内满足临界耦合条件的模式个数有关。通过多层F-P谐振腔结构设计,可以在系统中引入多个满足临界耦合条件的模式,越丰富的谐振腔结构能够在禁带模式内创造越多样的近100%吸收模式。

3 3层F-P谐振腔系统吸收响应分析

石墨烯作为结构中唯一的吸波材料,对系统的吸波特性有重要的影响,图6和表3分别显示了随着石墨烯化学势 μ_c 的变化,结构吸波模式和3个模式的中心频率的改变。可以看出,随着 μ_c 在0.15 eV~0.25 eV

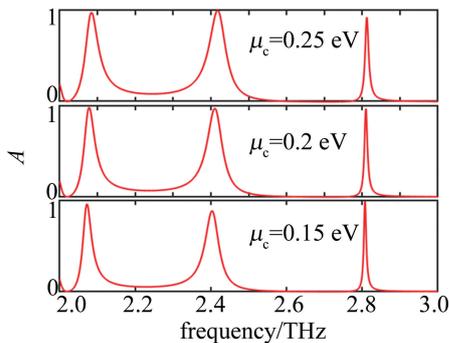


图6 结构2的3层F-P谐振腔中,不同石墨烯 μ_c 下,吸收率与中心频率的关系

Fig. 6 Relationship between absorbance and center frequency under different μ_c of three-layer F-P resonance cavity of structure 2

表3 结构2的3层F-P谐振腔中,不同石墨烯 μ_c 下,不同吸波模式的中心频率

Table 3 Center frequency of absorption mode with different μ_c of three-layer F-P resonance cavity of structure 2

μ_c /eV	model 1/THz	model 2/THz	model 3/THz
0.15	2.0724	2.4033	2.8124
0.20	2.0782	2.4105	2.8100
0.25	2.0862	2.4179	2.8076

增加,模式1和模式2的谐振频率蓝移,模式3的谐振频率红移,说明多层F-P谐振腔系统中谐振模式均受石墨烯化学势改变的影响。

光子晶体缺陷的厚度影响吸波模式的偏移,F-P谐振条件可表述为^[16]:

$$\text{Re}(kd) = i\pi \quad (4)$$

式中, k 为波数, d 为谐振腔长度, i 为F-P谐振模式的数目。当 i 一定时,增加 d 将直接导致谐振波长的增加。

通过改变每层F-P谐振腔的厚度来探究3层谐振腔分别对吸波模式的影响,图7a、图7b、图7c分别表示调整 d_1 、 d_2 、 d_3 对系统吸收谱产生的影响。如图7所示,3个近100%吸波模式由3个谐振腔厚度共同调节,每个腔体厚度的改变都会改变所有吸波频率,保持其余两个谐振腔厚度不变,依次减少 d_1 、 d_2 、 d_3 的长度,对应的3个吸波模式均发生蓝移,出现了多个吸收模式的联动调节效应。此外,通过改变 d_2 ,可以对模

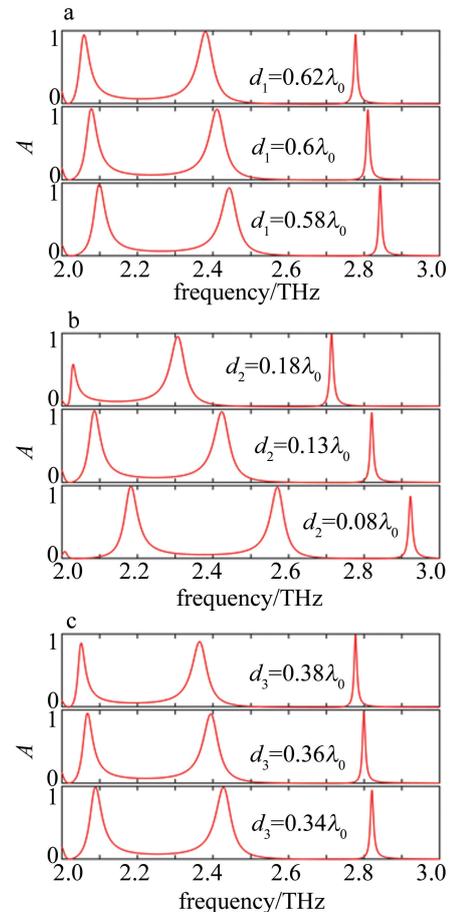


图7 结构2的3层F-P谐振腔中,不同谐振腔厚度下,吸收率与中心频率的关系

Fig. 7 Relationship between absorbance and center frequency under different thickness of three-layer F-P resonance cavity of structure 2

式 1 的吸收率进行调节。 d_2 的改变对 3 个吸波模式有不同的调节效果,模式 1 的吸收率随着 d_2 的增加出现明显的衰退,模式 2 的吸收率对于 d_2 的改变具有鲁棒性,根据这一特性,可以通过调节 d_2 对系统吸收模式的数量进行控制。

4 结 论

研究了多层 F-P 谐振腔的光学特性,对可调谐多层 F-P 谐振腔结构进行了讨论,分析了双层和 3 层 F-P 谐振腔在谐振频率下的电场分布情况,阐述了系统实现近 100%吸收的机理。提出了 3 层谐振腔完美吸波结构,该结构在谐振频率为 2.0782 THz、2.4103 THz 和 2.8100 THz 时达到了 97.8%、96.87%和 96.54%的完美吸波,证明了多层 F-P 谐振腔可以为吸波结构提供多种可灵活控制的完美吸波模式,丰富吸波模式的线型,为 F-P 谐振在吸波中的应用提供了更多的可能性。

参 考 文 献

- [1] ANDRYIEUSKI A, LAVRINENKO A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: Effective surface conductivity approach[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 9144-9155.
- [2] WU J. Tunable ultranarrow spectrum selective absorption in a graphene monolayer at terahertz frequency [J]. *Journal of Physics*, 2016, D49(21): 215108.
- [3] FURCHI M, URICH A, POSPISCHIL A, *et al.* Microcavity-integrated graphene photodetector[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 2773-2777.
- [4] BIAN L A, LIU P G, CHEN Y W, *et al.* Improvement of system tunability for Fano resonance by graphene-dielectric stack [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(2):187-191 (in Chinese).
卞立安, 刘培国, 陈雨薇, 等. 石墨烯介质堆栈提高系统调控 Fano 共振能力[J]. *激光技术*, 2018, 42(2):187-191.
- [5] NAIR R R, BLAKE P, GRIGORENKO A N, *et al.* Fine structure constant defines visual transparency of graphene[J]. *Science*, 2008, 320(5881): 1308.
- [6] GRANDE M, VINCENTI M A, STOMEIO T, *et al.* Absorption and losses in one-dimensional photonic-crystal-based absorbers incorporating graphene[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(6): 1-8.
- [7] HSU H T, WU C J. Design rules for a Fabry-Perot narrow band transmission filter containing a metamaterial negative-index defect [J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2009, 9:101-107.
- [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] SCHNEIDER G J, WATSON G H. Nonlinear optical spectroscopy in one-dimensional photonic crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(26): 5350-5352.
- [10] SHI B, JIAN Z M, WANG X. Defective photonic crystals with greatly enhanced second-harmonic generation[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(15): 1194-1196.
- [11] BIAN L A, LIU P, LI G, *et al.* Multi-mode absorption in multi-cavity photonic crystal with two graphene monolayers[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2017, 112: 303-310.
- [12] BIAN L A, YANG L, LIU P, *et al.* Controllable perfect absorption in a double-cavity photonic crystal with one graphene monolayer[J]. *Journal of Physics*, 2017, D51(2): 025106.
- [13] MOHARAM M G, POMMET D A, GRANN E B, *et al.* Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: Enhanced transmittance matrix approach [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1995, A12(5): 1077-1086.
- [14] FALKOVSKY L A, VARLAMOV A A. Space-time dispersion of graphene conductivity [J]. *The European Physical Journal*, 2007, B56(4): 281-284.
- [15] VAKIL A, ENGHETA N. Transformation optics using graphene[J]. *Science*, 2011, 332(6035): 1291-1294.
- [16] LIU J T, LIU N H, LI J, *et al.* Enhanced absorption of graphene with one-dimensional photonic crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(5): 052104.