

石墨烯巴比涅互补结构的太赫兹波透射行为

李恒一, 张 权, 赵 伟, 郑 虹, 朱 玲

(中国科学技术大学 物理学院, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 利用 CST 电磁场仿真软件模拟设计了基于石墨烯巴比涅互补结构的太赫兹超材料, 分别研究了互补层间距、石墨烯费米能级、互补层数对太赫兹波透射谱的影响. 模拟结果表明: 互补层之间的强耦合作用使得太赫兹波的透射得到显著增强; 在间距较小时, 共振频率随着间距增大而发生蓝移; 在间距较大时, 共振频率随着间距增大而发生红移, 并且透射峰值强度大幅减弱; 透射峰频率随着石墨烯费米能级减小而单调减小; 增加耦合的互补层数, 可使得透射带宽变宽. 所设计结构可作为可调控的太赫兹带通滤波器使用.

关键词: 透射率; 太赫兹波; 石墨烯; 巴比涅互补结构; 超材料; CST

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2017)12-0006-04

太赫兹波泛指频率在 0.1~10 THz 的电磁波, 由于太赫兹波具有独特的时域脉冲特性、低能和宽带等特点, 在材料科学、医疗诊断、环境监测、安全检查、卫星通讯、军用雷达等领域有广阔的应用前景^[1]. 然而太赫兹波对很多自然材料响应弱, 因此研究者尝试利用周期或非周期的亚波长结构组成的超材料操控太赫兹波^[2-4]. 早期的超材料主要基于金属材料做成, 不能根据使用要求灵活调制. 因此, 主动调控太赫兹超材料成为研究的重点方向, 其中基于石墨烯的太赫兹超材料已引起研究人员的极大兴趣. 石墨烯具有优异的光学、电学性质^[5], 因其在太赫兹波段的电导可灵活地通过栅极电压、化学掺杂等方式来改变, 所以它非常适用于太赫兹主动超材料器件^[6-10], 如文献[6]报道了利用石墨烯和金组成的正六边形超材料, 通过栅极电压调控石墨烯的电导, 实现对太赫兹透射波的振幅调控; 文献[7]报道的基于电压调控石墨烯电导的太赫兹超材料相位调制器实现了太赫兹反射波呈现 $-\pi \sim \pi$ 的相位变化. 本文提出基于石墨烯巴比涅互补结构的太赫兹滤波器, 利用 CST 微波工作室 (Computer simulation technology, microwave studio) 电磁仿真软件研究石墨烯巴比涅互补结构间的耦合作用对太赫兹波透射率的影响. 该仿真实验可作为研究性实验

引入开放性实验教学, 可成为传统实验教学方式的互补方式, 有利于本科生了解前沿科学领域, 培养学生创新能力, 提高科研技能等综合实验素质.

1 结构模型与理论模型

图 1 为本文提出的石墨烯巴比涅互补结构示意图. 所提结构为周期性阵列, 如图 1(a) 所示.

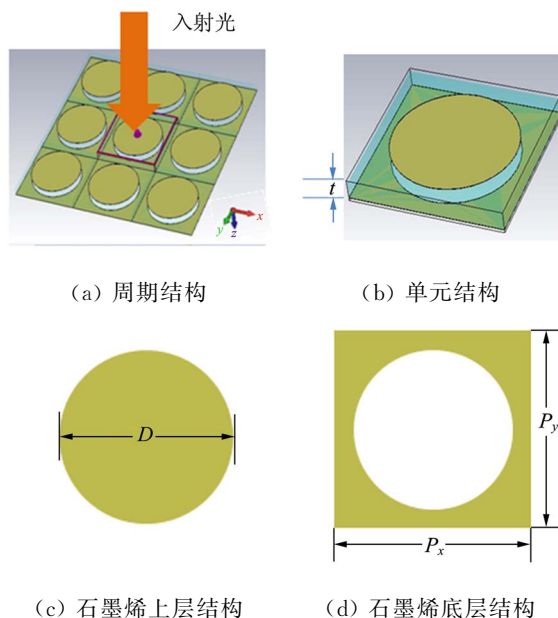


图 1 石墨烯巴比涅互补结构的超材料示意图

收稿日期: 2017-07-29

资助项目: 仿真技术在大学物理实验中的应用及实践 (No. 2016jyxm1157)

作者简介: 李恒一 (1985-), 男, 安徽亳州人, 中国科学技术大学物理学院实验师, 博士, 主要研究方向为微纳光子学.



图 1(b)为其中 1 个单元结构, 分为 3 层, 依次为石墨烯圆盘、二氧化硅、石墨烯圆盘的巴比涅互补层. 入射的太赫兹平面波沿 z 轴方向传播, 电场的极化方向平行于 x 轴. 石墨烯圆盘直径为 D , 在全文中固定为 $40 \mu\text{m}$. 周期性阵列在 x 和 y 方向的周期为 P_x 和 P_y , 在全文中固定为 $P_x = P_y = 50 \mu\text{m}$. 二氧化硅介质层厚度设为 t , 设为变量, 电容率设为 2.1.

计算中石墨烯设为掺杂的, 其表面电导^[11]为

$$\sigma(\omega) = \frac{i e^2 E_F}{\pi \hbar^2 (\omega + i \tau^{-1})}, \quad (1)$$

其中 e 为电子电荷, E_F 为石墨烯费米能级, \hbar 为约化普朗克常量, ω 为入射波的角频率, τ 为石墨烯载流子的散射时间, 设为 1 ps . 利用 CST 电磁仿真软件计算出射的太赫兹平面波经过该石墨烯巴比涅互补结构后的透射谱和太赫兹电磁波在空间分布情况.

2 结果与讨论

2.1 单层和 2 个互补层透射谱的比较以及电磁场的空间分布

图 2 所示为石墨烯圆盘、圆盘互补 2 层结构与单独圆盘层、单独圆盘互补层的太赫兹透射谱, 此时互补 2 层间的间距 $t = 5 \mu\text{m}$, 石墨烯费米能级 $E_F = 1.2 \text{ eV}$. 根据巴比涅原理, 2 个互补结构产生相同的衍射花样, 并产生相反的透过率^[12-13]. 基于此原理, 可以认为圆盘结构具有电容频率响应, 作为高通频率选择表面结构, 而圆盘互补结构具有电感频率响应, 作为低通频率选择表面结构. 因此, 当 2 个互补结构距离很近时, 类似电路理论, 表现出电容、电感作用的 2 个互补结构将产生

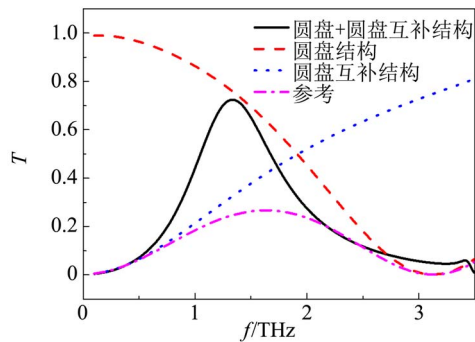
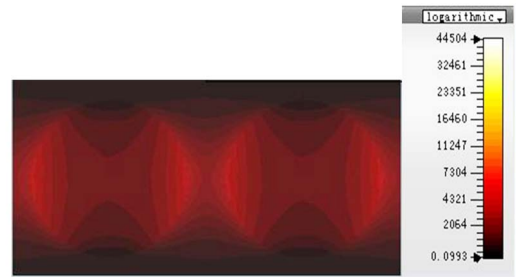


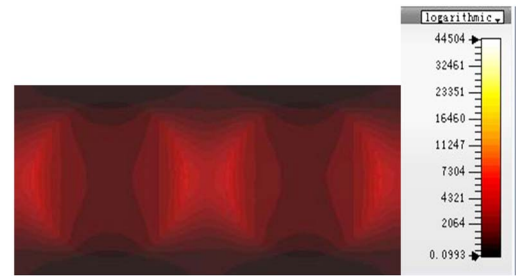
图 2 石墨烯圆盘、圆盘互补 2 层结构与单独圆盘层、单独圆盘互补层的太赫兹透射谱

强烈的电磁波耦合, 从而可增强太赫兹波的透射. 如图 2 所示, 所述原理和仿真结果吻合, 其中圆盘层的透射率和圆盘互补层的透射率简单乘积结果作为对比数据显示在图中. 可见, 经过巴比涅互补 2 层结构的耦合作用, 表现出 1 个共振的透射峰, 透射率高达 72%, 比单独 2 层的透射率乘积增强了许多.

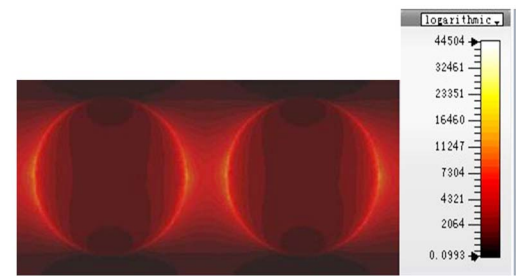
为了更好地理解巴比涅互补 2 层间的耦合作用, 给出了在图 2 中共振频率 1.3 THz 处太赫兹波磁场分量在不同 z 方向上 x - y 平面内的分布, 如图 3 所示. 在 $z = 1 \mu\text{m}$, 磁场局域在整个圆盘下方, 而随着 z 增大, 磁场往圆盘边沿聚集, 在下层互补结构表面时, 磁场高度集中在互补结构的边沿圆环上.



(a) $z = 1 \mu\text{m}$



(b) $z = 3 \mu\text{m}$

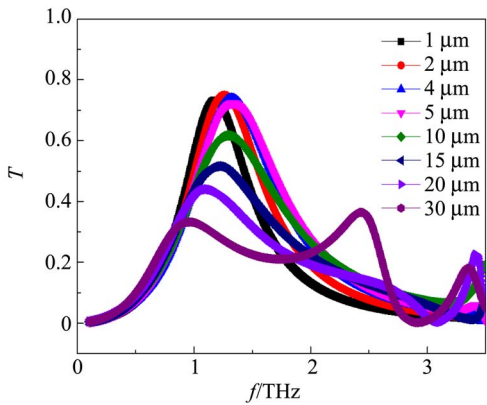


(c) $z = 5 \mu\text{m}$

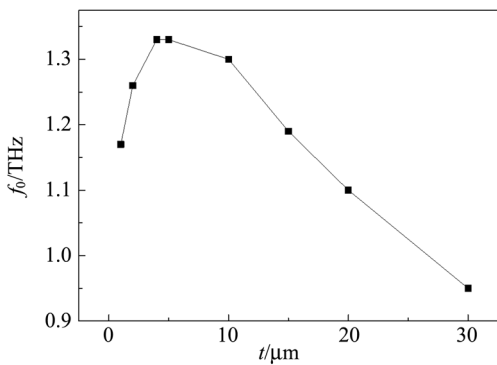
图 3 共振频率 1.3 THz 处太赫兹波磁场在不同 z 方向上 x - y 平面内的分布

2.2 互补 2 层间的间距对太赫兹波透射的影响

石墨烯互补 2 层间的间距必然会影 响它们之间的耦合作用. 互补 2 层间的间距大小 t 在 $1 \sim 30 \mu\text{m}$ 时, 太赫兹波透射率如图 4 所示, 此时石墨烯费米能级 $E_F = 1.2 \text{ eV}$. 可以看出, 在间距比较小时, 共振频率随着间距增大而发生蓝移, 透射峰值强度变化较小; 当间距大于 $5 \mu\text{m}$ 之后, 共振频率随着间距增大而发生红移, 并且透射峰值强度大幅减弱; 当间距等于 $30 \mu\text{m}$ 时, 由原来的 1 个共振峰分裂为 2 个共振峰. 这是因为当间距较大时, 上下 2 层结构的相互耦合作用减弱很多, 因而透射谱趋向图 2 中单独上下 2 层透射率乘积的结果.



(a) 不同层间距对应的太赫兹波的透射谱



(b) 共振频率和层间距的关系

图 4 互补 2 层间的间距对太赫兹波透射率的影响

2.3 石墨烯费米能级大小对太赫兹波透射的影响

由式(1)可知, 改变石墨烯的费米能级可以改变其电导. 石墨烯电导发生变化之后, 石墨烯巴比涅互补结构的性能也将随之变化, 即会改变太赫兹波的透射谱. 石墨烯的费米能级可通过栅极电压、化学掺杂方法来改变. 层间间距设为 $5 \mu\text{m}$,

不同费米能级对太赫兹波透射率的影响如图 5 所示. 可见, 透射谱的共振峰频率随着石墨烯费米能级减小而发生红移. 因此, 可获得中心频率可调控的太赫兹带通滤波器.

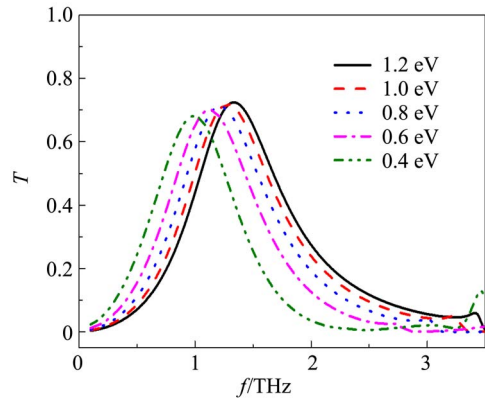
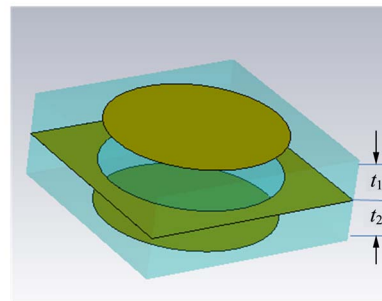


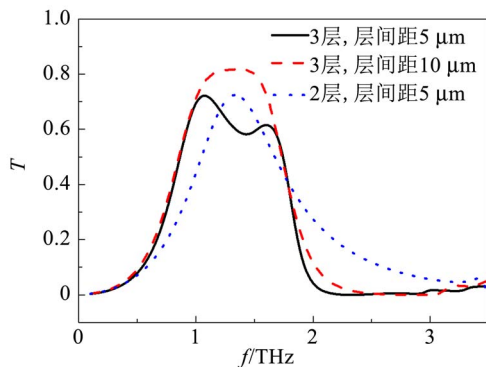
图 5 不同费米能级下的太赫兹波的透射谱

2.4 3 层石墨烯互补结构的太赫兹波的透射谱

进一步研究 3 层石墨烯互补结构对太赫兹波透射行为的影响, 石墨烯费米能级设为 1.2 eV . 图 6(a) 为 3 层结构的示意图, 层间距 $t_1 = t_2$. 图 6(b) 给出了层间间距分别为 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的 3



(a) 3 层石墨烯互补结构示意图



(b) 2 层和 3 层互补结构下太赫兹波透射谱的比较

图 6 3 层石墨烯互补结构及其太赫兹波的透射谱

层互补结构,以及层间间距为 $5\ \mu\text{m}$ 下的 2 层互补结构的太赫兹波的透射谱. 由图 6 可知,层间距都为 $5\ \mu\text{m}$ 时,相比于 2 层结构,3 层结构对应的太赫兹波透射谱呈现出双共振峰. 但当层间间距增加到 $10\ \mu\text{m}$ 时,2 个共振峰都得到加强,且连接到一起,从而可获取频率较宽的太赫兹带通滤波器. 由此可见,可通过改变层间间距、互补层层数来改变太赫兹波的透射行为,从而实现实际需求的太赫兹滤波器件.

3 结 论

利用 CST 电磁场仿真软件模拟分析了石墨烯巴比涅互补结构对太赫兹波透射行为的影响. 由仿真结果可知互补层之间的强烈耦合作用使得太赫兹波的透射得到显著增强,且透射谱的共振峰频率、强度会随着层间间距变化而变化. 另外,透射峰频率随着石墨烯费米能级减小而单调红移. 互补层层数也会影响太赫兹波的透射行为,因此,利用本文提出的石墨烯巴比涅互补结构,通过改变层间间距、互补层层数、石墨烯费米能级,可改变太赫兹波的透射行为,因而可实现实际需求的太赫兹滤波器件. 同时,此模拟实验可作为开放性实验教学内容,学生可自行构建结构,分析各参量对透射谱的影响,有助于培养学生的创新意识,提高自我思考的能力,有助于学生了解前沿的科学知识.

参考文献:

- [1] Tonouchi M. Cutting edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007,1(2):97-105.
- [2] Yan R, Sensale-Rodriguez B, Liu L, et al. A new class of electrically tunable metamaterial terahertz modulators [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28664-28671.
- [3] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction [J]. *Science*, 2013,340(6138):1304-1307.
- [4] Liu Shuo, Chen Haibing, Cui Tiejun. A broadband terahertz absorber using multi-layer stacked bars [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(15): 151601.
- [5] Koppens F H L, Mueller T, Avouris P, et al. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014,9(10):780-793.
- [6] Lee S H, Choi M, Kim T T, et al. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11):936-941.
- [7] Miao Z, Wu Q, Li X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces [J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4):041027.
- [8] Shen N H, Tassin P, Koschny T, et al. Comparison of gold-and graphene-based resonant nanostructure for terahertz metamaterials and an ultra-thin graphene-based modulator [J]. *Physical Review B*, 2014,90(11):115437.
- [9] Li Zubin, Yao Kan, Xia Fengnian, et al. Graphene plasmonic metasurfaces to steer infrared light [J]. *Scientific Reports*, 2015,5:12423.
- [10] Liu Liming, Zarate Y, Hattori H T, et al. Terahertz focusing of multiple wavelengths by graphene metasurfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(3):031106.
- [11] Yatooshi T, Ishikawa A, Tsuruta K. Terahertz wavefront control by tunable metasurface made of graphene ribbons [J]. *Applied Physics Letters*, 2015,107(5):053105.
- [12] Falcone F, Lopetegi T, Laso M A G, et al. Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2004,93(19):197401.
- [13] Bonache J, Gil I, Garcia-Garcia J. Novel microstrip bandpass filters based on complementary splitting resonators [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006,54(1):265.

(下转第 13 页)

- [10] Sze S M, Kwok K Ng. Physics of semiconductor devices [M]. Third Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007:95.
- [11] 刘艳峰. 基于 PN 结物理特性综合实验仪测量电子电荷量[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 124-127.

Obtaining physical parameters based on the I - V characteristics of PN junction

LIU Jing-jin, FENG Lie-feng

(Department of Physics, Faculty of Science, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: By measuring the temperature dependence of the resistance of PN junction, the I - V characteristics of PN junction under different temperatures were accurately measured. By logarithmic processing of the standard I - V data of the PN junction and fitting the $\ln I$ - U curve, the Boltzmann constant and the reverse saturation current were obtained from the slope and intercept of the fitted curve. At the same time, the dependence of reverse saturation current on temperature was also obtained. Furthermore, the ideal factor and the band gap were extracted from simulating I_s - T characteristics by One-first software.

Key words: PN junction; Boltzmann constant; reverse saturation current; I - V characteristics

[责任编辑:任德香]

(上接第 9 页)

Transmission of terahertz waves through graphene based on Babinet complementary structures

LI Heng-yi, ZHANG Quan, ZHAO Wei, ZHENG Hong, ZHU Ling

(College of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: A type of graphene based Babinet complementary structure in terahertz range was proposed, and the effects of interspacing, graphene Fermi level and number of layers on transmission were simulated by the CST software. It was shown that the transmission was greatly enhanced by the interaction between layers. The resonance frequency had a blue shift for increasing interspacing when the spacing was small, while exhibited a red shift with increasing interspacing when the spacing was large enough. The resonance frequency decreased with the decreasing Fermi level of graphene. Increasing the number of layers broadened the transmission bandwidth. The proposed structure could be used as a tunable terahertz band-pass filter.

Key words: transmissivity; terahertz wave; graphene; Babinet complementary structures; metamaterials; CST software

[责任编辑:任德香]