

利用亚波长人工材料实现太赫兹滤波

刘建丰 周庆莉* 施宇蕾 张存林

(首都师范大学物理系, 太赫兹光电子学省部共建教育部重点实验室, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 中关村开放实验室, 北京 100048)

摘要 由于亚波长人工材料具有许多特殊的光学性质, 目前, 利用这些性质在微波波段设计出了多种功能器件。但是, 太赫兹波段亚波长材料的尺寸较小以及太赫兹源和探测器的限制, 太赫兹功能器件的制作与应用受到了一定制约。为了实现太赫兹滤波, 利用时域有限差分(FDTD)方法研究了太赫兹亚波长金属条阵列结构的太赫兹透射性质, 结果发现, 一个单胞内包含多个金属条的周期结构其太赫兹透射谱中可以出现多个吸收峰, 从而可以实现多频段太赫兹滤波。另外, 通过改变金属条的结构可以使吸收峰加宽, 从而加大了太赫兹滤波范围, 最终设计出了宽吸收带的太赫兹滤波器件。

关键词 材料; 太赫兹; 时域有限差分; 亚波长; 金属条

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s111001

Terahertz Filtering Based on Subwavelength Artificial Materials

Liu Jianfeng Zhou Qingli Shi Yulei Zhang Cunlin

(Department of Physics, Capital Normal University, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Beijing 100048, China)

Abstract At present, Some devices based on subwavelength metallic structures and working in microwave regime have been designed due to the special optical properties of subwavelength artificial materials. However, in terahertz (THz) regime, because of the small size and the limit of source and detection of THz wave, THz functional devices develop slowly. For developing THz filters, by finite-difference time-domain (FDTD) method, the optical properties of an array of subwavelength metallic bars' combinations are studied in this article. The results show that several absorption peaks appear in the transmission spectra when a unit cell of the structure contains several bars. So, multi-band filter can be made on the basis of the property. In addition, by changing the structure, wideband filter can be realized in THz regime.

Key words materials; terahertz; finite difference time domain; subwavelength; metallic bar

OCIS codes 050.1755; 050.5298; 050.6624; 130.3990

1 引言

太赫兹(THz)波是波长在 $30\ \mu\text{m}\sim 3\ \text{mm}$ 波段的电磁波, 由于技术手段的限制长期以来太赫兹波不被人们所了解。最近 20 年随着高效能太赫兹源的出现, 关于太赫兹波的研究才逐渐兴起, 但太赫兹技术至今只是处在研究阶段, 还远没有实现产业化。另外, 由于亚波长人工材料有着许多独特的光学性质, 目前也有不少的研究。一些金属太赫兹亚波长

人工材料, 例如开口共振环阵列(SRRs)的透射光谱中会出现吸收峰^[1~3]。关于 SRRs 结构中电子共振的物理模型, 目前比较被大家认同的是: 低频时的电子共振形成环形电流, 被解释为 LC 振荡; 高频的电子共振形成线性电流, 被解释为电偶极振荡^[2,3]。虽然其他金属亚波长结构的电子共振模型还没有一个较为统一的认识^[4,5], 但可以确定的是金属亚波长结构的太赫兹透射性质与金属的结构和尺寸有

收稿日期: 2011-08-09; 收到修改稿日期: 2011-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(10804077, 10904098)资助课题。

作者简介: 刘建丰(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹特异材料方面的研究。E-mail: jianfeng711@126.com

导师简介: 张存林(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事太赫兹方面的研究。E-mail: cunlin_zhang@mail.cun.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: qlzhou@mail.cnu.edu.cn

关^[2,6~8]。本文在我们研究过的亚波长单金属条太赫兹透射性质的基础上,利用时域有限差分(FDTD)方法研究了此结构的排列组合以及变形结构并成功地设计出多种太赫兹滤波器^[9,10]。

2 多吸收峰的实现

2.1 亚波长三金属条组合

为了使亚波长金属结构中出现电偶极振荡,单

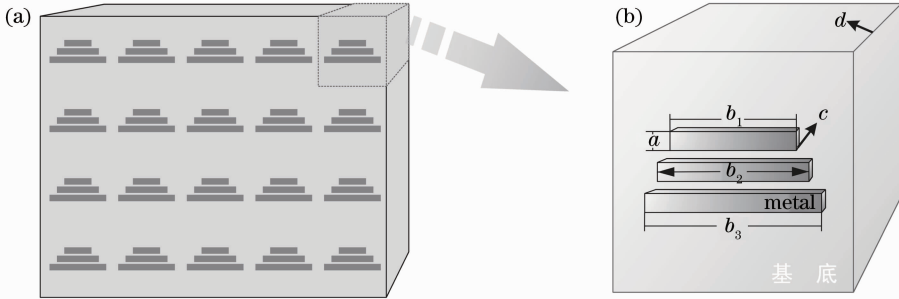


图1 样品结构示意图。(a)金属条组合阵列图;(b)阵列图的单胞结构

Fig.1 Structure of the sample. (a) Array of metallic bars' combinations; (b) unit cell of metallic bars' combinations

图1(a)为三个金属条的阵列图,晶格常数为 $60\ \mu\text{m}$ 。图1(b)为结构的一个单胞,前面三个长方体为金属条,三个金属条的高度 a 和厚度 c 相同,分别为: $a=4\ \mu\text{m}$ 、 $c=2\ \mu\text{m}$ 。它们的长度不同,从短到长分别为: $b_1=36\ \mu\text{m}$ 、 $b_2=46\ \mu\text{m}$ 、 $b_3=56\ \mu\text{m}$ 。金属条的间隔为 $2\ \mu\text{m}$ 。后面为电介质基底,其厚度为 $640\ \mu\text{m}$,折射率为3.4。此处太赫兹波正入射到样品表面。通过FDTD模拟实验,得到图2所示的太赫兹透射振幅谱。

峰(位于 $0.5\ \text{THz}$)是由 $56\ \mu\text{m}$ 金属条中的电子与太赫兹电场产生共振,吸收太赫兹波而形成的;同样道理, $1.17\ \text{THz}$ 处的吸收峰与 $46\ \mu\text{m}$ 的金属条有关; $1.41\ \text{THz}$ 处的吸收峰与 $36\ \mu\text{m}$ 的金属条有关。为了证明三个吸收峰分别由三个长度不等的金属条中电子共振产生,分别对三个长度分别为 36 、 46 和 $56\ \mu\text{m}$ 的单金属条样品进行模拟,其结果如图2所示。灰色实线为 $36\ \mu\text{m}$ 金属条样品的透射振幅谱,可以看出其吸收峰与三金属条组合样品透射谱的高频吸收峰较为接近。灰色虚线和灰色点线分别为 $46\ \mu\text{m}$ 和 $56\ \mu\text{m}$ 单金属条样品的透射振幅谱,它们的吸收峰分别与三金属条组合样品透射谱的中频吸收峰和低频吸收峰较为接近。这说明组合样品的三个吸收峰来源于三个金属条中电子的共振。但是,从图2中还可以看出:组合样品透射谱的三个吸收峰并没有与三个金属条单独存在时各自透射谱的吸收峰完全重合,吸收峰发生了蓝移。可以把这归结为组合样品金属条间电子振荡的相互耦合所造成。

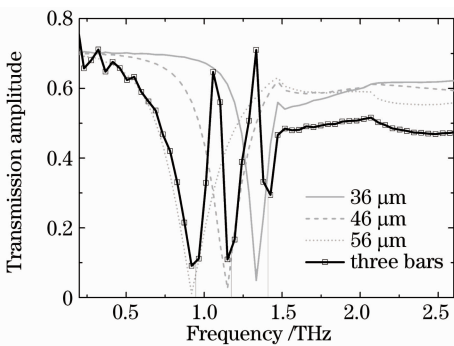


图2 透射振幅谱

Fig.2 Transmission amplitude spectra

如图2所示,加方块的黑线是长度分别为 36 、 46 和 $56\ \mu\text{m}$ 金属条组合样品(见图1)的太赫兹透射谱。太赫兹透射振幅谱中出现了三个吸收峰。从低频到高频吸收峰的位置分别近似为: 0.95 、 1.17 和 $1.41\ \text{THz}$ 。前面已经提到:对于单金属条阵列,随着金属条的加长其透射振幅谱中的吸收峰会出现红移。因此可以断定三金属条组合样品的低频吸收

2.2 亚波长四金属条组合

三个吸收峰的出现可以制作出三带滤波器件,并且可以通过调整每个金属条的长度对吸收带的位置进行选择。同样道理也尝试制作了透射谱中具有更多吸收峰的亚波长金属结构。这次在电介质基底上制作了四个金属条,以期待其透射谱能够出现四个吸收峰。

此次设计的样品与上面样品类似,晶格常数为

80 μm , 四个金属条长度分别为 36、46、56 和 66 μm 。四个金属条的其他参数均一样, 高度为 2 μm , 厚度为 2 μm 。基底厚度 640 μm , 折射率 3.4。经过 FDTD 模拟, 得到如图 3 所示的太赫兹透射振幅谱。

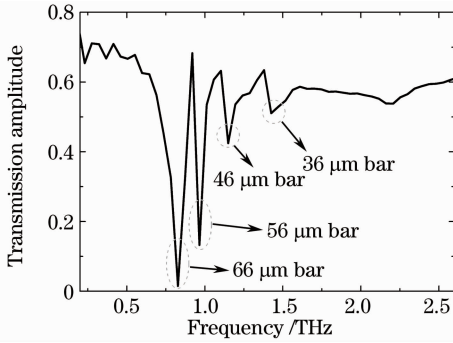


图 3 四个金属条组合样品的太赫兹透射谱
Fig. 3 THz transmission amplitude of the four-bars sample

图 3 中出现了四个吸收峰, 按前面的分析这四个吸收峰从低频到高频分别由长到短四个金属条中电子共振形成(见图中标注)。另外, 值得注意的是高频吸收峰(36 μm 金属条对应的吸收峰)已经变得不太明显且吸收峰处透射振幅已经变得很大, 这说明此频率下电子共振减弱, 对太赫兹吸收不强烈。这是由于周期的加大导致相同面积上 36 μm 的金属条减少(即 36 μm 金属条的面密度减小), 在此共振频率下参与振荡的电子会变少, 因此对太赫兹的吸收就会减少。

3 宽带太赫兹滤波的实现

为了得到宽带的吸收谱, 在一个单胞上制作了长度分别为 36、38、40、42、44 和 46 μm 的六个金属条(见图 4 插图中的结构 1)。图 4 中加方块的实线为此样品的透射谱线。由于金属条的长度影响着频谱中吸收峰的位置, 多个金属条的样品会产生多个吸收峰, 因此谱线中底部出现了多个吸收峰(见图 4)。又因为这六个金属条长度较为接近且每个金属条形成的吸收峰都有一定的宽度, 所以导致这些吸收峰彼此交叠不宜分辨, 谱线呈振荡走势。另外, 又将 36 和 46 μm 两个单金属条样品的透射谱画出作为参考, 灰色虚线为 36 μm 金属条样品的透射谱线, 灰色点线为 46 μm 金属条样品的透射谱线。根据分析可知: 多金属条样品的所有吸收峰应在 36 μm 和 46 μm 两个单金属条样品的吸收峰附近, 称这个区域为多金属条样品的吸收区。整个吸收区内透射振幅均较小, 利用这个特点可以将其设

计成宽带滤波器件^[9,10]。还可看出, 谱线左侧吸收区域之外谱线依然振荡剧烈, 这与金属条间电子振荡的相互耦合有关。

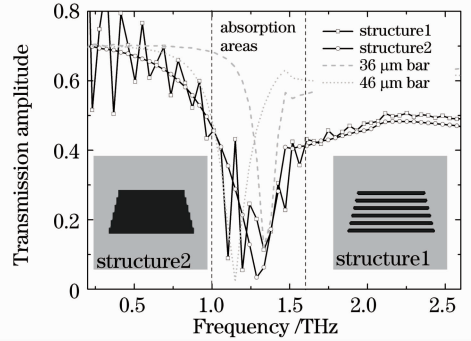


图 4 宽吸收峰透射谱

Fig. 4 Wide-absorption-peak transmission amplitude spectra

为了消除吸收区域内谱线的振荡, 将结构 1 中各金属条的缝隙用金属填充, 形成图 4 中结构 2 所示的台阶状梯形结构。之后利用 FDTD 方法模拟, 得到了图 4 中加圆圈实线所示的透射振幅谱。此谱线没有了剧烈的振荡, 其走势与结构 1 的谱线一致, 可以看出结构 1 的谱线是在结构 2 谱线的基础上上下振荡。因此, 利用结构 2 的太赫兹透射性质可以实现宽带太赫兹吸收。

4 结 论

利用 FDTD 方法研究了金属亚波长条状结构和其变形结构的太赫兹透射性质。由于此结构太赫兹透射谱中吸收峰位置与金属条的长度有关, 通过组合排列不同金属条实现了存在多吸收峰的太赫兹透射振幅谱。另外, 改变结构还可以实现宽带太赫兹吸收。利用亚波长金属条结构的太赫兹透射性质, 可以设计出不同类型的太赫兹吸收器件^[9,10,11], 并且可以通过改变金属条的长度来调整滤波频段。

参 考 文 献

- 1 V. G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**(4): 509~514
- 2 W. Withayachumnankul, D. Abbott. Metamaterials in the terahertz regime [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, **1**(2): 99~118
- 3 W. J. Padilla, A. J. Taylor, C. Highstrete *et al.*. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(10): 107401
- 4 Liang Huawei, Ruan Shuangchen, Zhang Min *et al.*. Study on coupled-mode theory of terahertz wire waveguides [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 202~204
梁华伟, 阮双琛, 张敏等. 太赫兹金属线波导耦合模理论研究 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 202~204

- 5 D. Dragoman, M. Dragoman. Terahertz fields and applications [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, **28**(1): 1~66
- 6 M. Wachter, M. Nagei, H. Kurz. Frequency-dependent characterization of THz Sommerfeld wavepropagation on single wire[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(26): 10815~10822
- 7 G. Goubau. Surface waves and their application to transmission lines[J]. *J. Appl. Phys.*, 1950, **21**(11): 1119~1128
- 8 Wu Qun, Wu Mingfeng, Meng Fanyi *et al.*. Research on SRR structure metamaterial based on transmission line theory[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, **21**(3): 310~315
吴 群, 武明峰, 孟繁义等. 基于传输线理论的 SRR 结构异向介质的研究[J]. *电波科学学报*, 2006, **21**(3): 310~315
- 9 Li Yan, Xu Shanjia, Zhang Zhongxiang. Novel microstrip antenna array FED with left-handed transmission line [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, **26**(2): 137~140
李 雁, 徐善驾, 张忠祥. 新型左手传输线馈电微带阵列天线 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(2): 137~140
- 10 Fang Weihai, Xu Shanjia. New frequency selective surface composed of left-handed materials [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, **26**(2): 121~124
方维海, 徐善驾. 由左手媒质构成的新的频率选择表面 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(2): 121~124
- 11 Xue Chaomin, Liu Jiansheng, Zheng Zheng *et al.*. Terahertz filters [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 43~49
薛超敏, 刘建胜, 郑 铮等. 太赫兹滤波器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 43~49

栏目编辑: 马 沂