

# 十字形金属结构在太赫兹波段的滤波特性

魏波 赵国忠 张杲辉 刘立明

(首都师范大学物理系,太赫兹光电子学教育部重点实验室,北京市太赫兹波谱与成像重点实验室,北京 100048)

**摘要** 实验研究了亚波长十字形金属阵列结构在太赫兹(THz)波段的透射特性。研究表明,在保持十字形金属阵列结构尺度不变的前提下,改变太赫兹波的偏振方向时,其太赫兹透射谱具有无偏窄带滤波特性。大部分太赫兹波可以通过该结构继续传播,仅有窄带的太赫兹波衰减到极低值,因而产生窄带限波效果。当改变太赫兹波的偏振角度时,透射凹陷所在的频率位置几乎不发生改变,证明该结构在太赫兹波段是一种很好的透射式无偏窄带器件。

**关键词** 薄膜;太赫兹波;透射特性;十字形金属阵列;太赫兹时域光谱系统

中图分类号 O434 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.123101

## Properties of Terahertz Filter Based on Cross Metal Structures

Wei Bo Zhao Guozhong Zhang Gaohui Liu Liming

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

**Abstract** Cross metal array structure is experimentally studied by terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS). The results show that this kind of structure have the characteristic of non-polarized narrow band filtering. Most terahertz wave can pass through the cross metal array structure. However, the terahertz wave with certain frequencies is restrained by the structure. Moreover, the change of polarization angle does not affect the position of transmission dip. It is proved that the structure is a good non-polarized transmission and filtering device in the terahertz band. These results provide a good reference for the research and fabrication of terahertz sub-wavelength optical components.

**Key words** thin films; terahertz wave; transmission; cross metal array; terahertz time-domain spectroscopy

**OCIS codes** 310.3840; 300.6270; 300.6495; 350.3950; 350.5500

## 1 引言

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10.0 THz(波长为 30~3000  $\mu\text{m}$ )范围内的电磁波,它在长波段与亚毫米波相重合,短波段与红外线相重合,在电磁波频谱中占有很特殊的位置。THz 波具有很多优越的特性,如穿透能力、识别物质的能力及成像能力等。这些特性使得 THz 波具有非常重要的学术和应用价值,它已经受到人们的广泛关注<sup>[1~3]</sup>。THz 还是一种大容量、高保密的宽带信息载体,具有非常独特的透射性质,人们可以通过分析材料的透射光谱来获得它的物理性质以及组成成分等。

另一方面,随着光通信技术的发展,光电器件越来越趋于小型化。基于亚波长阵列结构的小型化 THz 光电器件已经引起了人们的关注<sup>[4~6]</sup>,如 THz 滤波器<sup>[7,8]</sup>、THz 偏振器<sup>[9,10]</sup>和偏振补偿器<sup>[11]</sup>等。本文主要研究亚波长十字形阵列金属结构在小型化光电滤波器件方面的功能特性。实验结果表明,该结构在 THz 波段是一种很好的透射式无偏窄带器件。

收稿日期:2012-06-08;收到修改稿日期:2012-08-20;网络出版日期:2012-11-02

基金项目:国家自然科学基金(50971094)资助课题。

作者简介:魏波(1986—),女,硕士研究生,主要从事金属网格结构太赫兹波谱特性方面的研究。

E-mail: wbluck2009@126.com

导师简介:赵国忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事太赫兹波谱与成像技术以及光电信息功能材料与器件等方面的研究。E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn(通信联系人)

## 2 样品制备及结构设计

样品通过光刻工艺加工而成。首先用 L-Edit 软件绘制出设计好的样品图形,在中国科学院电工研究所微纳加工技术研究部制备掩模板,然后在中国科学院半导体研究所进行光刻制备。以厚度为 1 mm 的高阻硅作为衬底,然后上面蒸镀十字形金膜,金膜的厚度为 200 nm。利用光刻胶的感光性和耐腐蚀性,在材料上复印并刻蚀出与光刻模版完全对应的几何图形,最后通过金属化、剥离及刻蚀去胶工艺将所要的图形转移到衬底上。

所设计的样品,如图 1 所示,其中灰黑色部分表示高阻硅,白色部分表示在 Si 衬底上制备的十字形金线, $T$  为十字形金属网格的周期, $L$  为十字形的长度, $W$  为线宽。样品尺寸为  $L=120\ \mu\text{m}$ ,  $W=5\ \mu\text{m}$ ,  $T=200\ \mu\text{m}$ 。

## 3 实验测量及结果分析

实验测量是在 THz 时域光谱系统(THz-TDS)中进行的。为了减小水蒸气对 THz 波的吸收,实验过程中 THz-TDS 整个装置置于一个充满氮气的箱子里,相对湿度保持在 3.6% 的动态平衡状态,温度约为 293.8 K。使 THz 波垂直照射到被测样品上。图 2 为 THz 波沿  $Z$  方向垂直入射到样品的示意图。

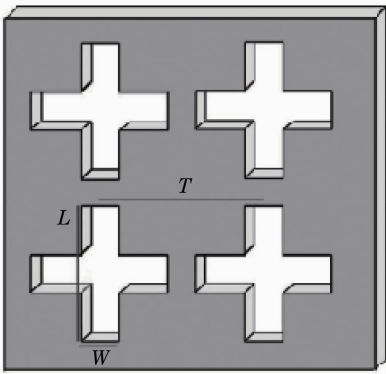


图 1 十字形金属阵列结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross metal array

THz 波的光斑直径约为 2 mm,样品的周期为  $200\ \mu\text{m}$ ,因此 THz 波光斑大约可以覆盖 10 个十字形结构单元。THz 波沿  $Z$  方向垂直入射到十字形表面,其偏振方向为水平偏振即沿  $X$  方向,当 THz 波与十字形结构的一条边平行时,偏振角度记为  $0^\circ$ 。THz 波透过样品时便会携带样品的光学信息,通过电光取样相干探测,即可获得样品的透射信息。如图 3 为十字形金属周期结构与 THz 波偏振方向的关系示意图,其中  $\theta$  表示 THz 波与十字形结构的一条边之间的夹角。

实验测得 THz 波偏振方向与十字形阵列结构一条边的夹角从  $0^\circ$  转到  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  直到  $90^\circ$ ,不同偏振角度下的频域谱和透射谱,如图 4 和图 5 所示。

从图 4 中看到,不同角度下 THz 频域谱几乎重合。

为了更好地观察样品透射谱的变化规律,将不同角度的透射谱等高度地移开,如图 5 所示。从图中可见,大多数频率成分的 THz 波能通过金属网格结构,但该结构将某些窄带频率成分衰减到极低水平,具有带阻滤波器的特性,与带通滤波器的性能相反。当改变偏振角度时,研究表明透射凹陷的位置均在 0.463 THz 处,没有发生改变。最大透射率与最小透射率相差 0.02,几乎没有差别,所以十字形周期结构在 THz 波段的透射不依赖于 THz 波的偏振状态,是一种很好的无偏振滤波器。

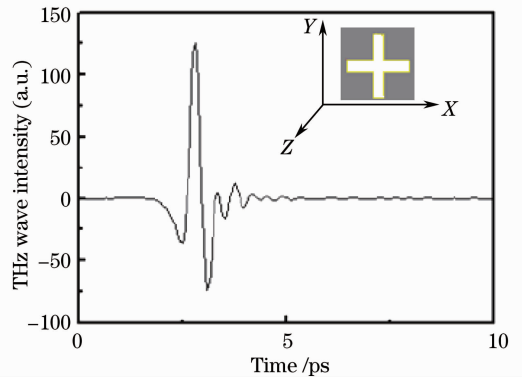


图 2 THz 波沿  $Z$  方向垂直入射到样品上的时域光谱

Fig. 2 THz time-domain spectrum of the cross sample

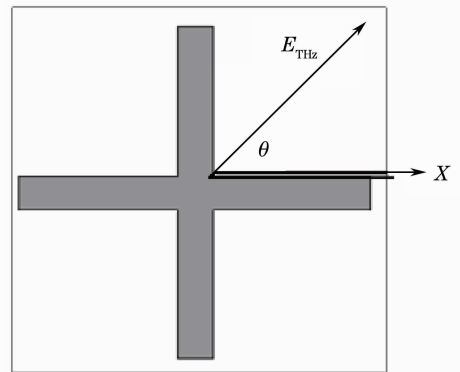


图 3 十字形金属周期结构偏振角的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of polarization angle of THz wave on the crossmetal structure

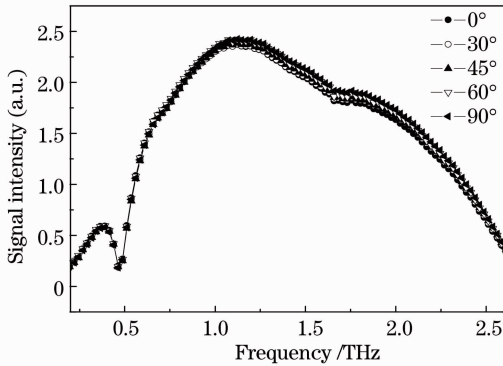


图 4 不同偏振角度下十字形金属阵列结构的 THz 频域谱

Fig. 4 THz frequency-domain spectra of cross metal array under different polarization angles

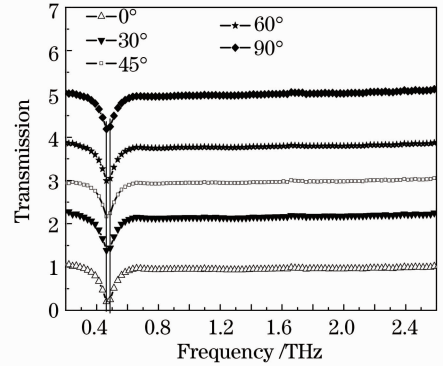


图 5 不同偏振角度下十字形金属阵列结构的 THz 透射谱

Fig. 5 THz transmission spectra of cross metal array under different polarization angles

为了更好地研究这种十字形金属结构的 THz 透射谱,给出了它的带宽与相位分析结果,如图 6 所示。图 6(a)用半极大全宽来表征带宽;图 6(b)为相应透射谱的相位图。从图中可以得到谱宽约为 0.097 THz,相位跳变约为 1.12 rad,相位跳变的范围为 0.049 THz,接近带宽的 1/2。

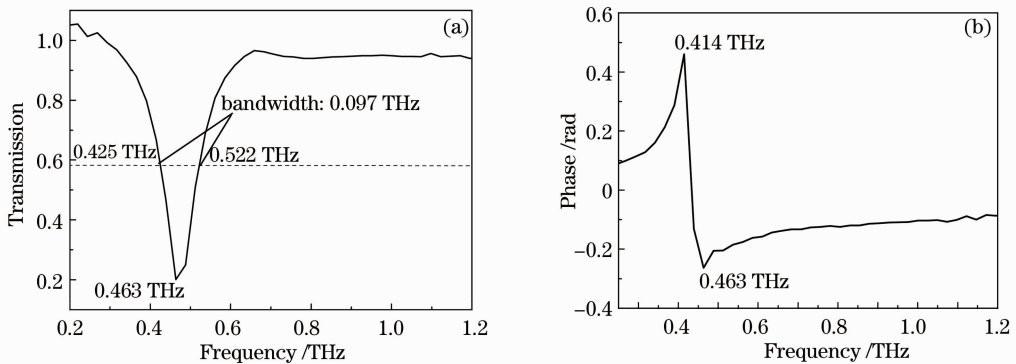


图 6 偏振角度为 0°时十字形金属结构 THz 透射谱的(a)带宽和(b)相位图

Fig. 6 THz transmission spectra of cross metallic array at 0° polarization angle. (a) Bandwidth; (b) phase

根据微波和红外频段的带隙特性研究所得的一系列研究结果如文献[12~14],在共振频率处,电磁场会在金属结构线上激发出瞬态电流,此时电流振幅达到最大。我们知道特定的结构都有其固有频率,当入射电磁波的频率接近此固有频率时,就会引起共振,这时与入射波相对应的电流相位就会发生  $\pi$  的跃变,便会引起谐振,相应的频率即为共振频率。这说明了亚波长阵列结构的透射增强是由入射光的频率与金属薄膜前后表面激发的表面等离子体的共振耦合共同决定的。频率 0.463 THz 的入射电磁波接近这种特定尺度的固有频率,这时便会引起谐振,使电场分布在整个十字形结构中,导致该频率处的 THz 波透射率很高。

## 4 结 论

通过实验研究了十字形金属结构在 THz 波段的窄带无偏滤波特性。研究表明,亚波长十字形金属阵列结构在 THz 波段具有频率选择特性,当十字形阵列结构的尺度一定时,随着偏振角度的改变,透射凹陷所在的频率位置几乎不发生改变,透射率的大小只有很小的差别,同时从相位图也可以看到,这种结构对 THz 波具有相位调制作用。这有助于我们更好地理解透射凹陷产生的机理,为 THz 波段亚波长光学滤波器件的进一步研究提供理论指导。

## 参 考 文 献

1 C. A. Schmuttenmaer. Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy [J]. *Chem. Rev.*, 2004, **104**(4):

1759~1779

- 2 S. Y. Huang, P. C. Ashworth, K. W. C. Kan *et al.*. Improved sample characterization in terahertz reflection imaging and spectroscopy[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3848~3854
- 3 H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide. Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, **444**: 597~600
- 4 Meng Tianhua, Zhang Guozhong, Zhang Cunlin. Study of enhanced transmission of terahertz radiation through subwavelength fractal structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(6): 3846~3852  
孟田华, 赵国忠, 张存林. 亚波长分形结构太赫兹透射增强的机理研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(6): 3846~3852
- 5 Su Jian, Chen Heming. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2710~2713  
苏 坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2710~2713
- 6 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
- 7 R. Ulrich. Interference filters for the far infrared[J]. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(10): 1987~1996
- 8 O. Paul, R. Beigang, M. Rahm. Highly selective terahertz bandpass filters based on trapped mode excitation[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 18590~18595
- 9 F. Eftekhari, R. Gordon, J. Ferreira *et al.*. Polarization-dependent sensing of a self-assembled monolayer using biaxial nanohole arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(25): 253103
- 10 I. R. Hooper, J. R. Sambles. Broadband polarization-converting mirror for the visible region of the spectrum[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(24): 2152~2154
- 11 T. D. Drysdale, R. J. Blaikie, H. M. H. Chong *et al.*. Artificial dielectric devices for variable polarization compensation at millimeter and submillimeter wavelengths[J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 2003, **51**(11): 3072~3079
- 12 H. F. Ghaemi, Tineke Thio, D. E. Grupp *et al.*. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(11): 6779~6782
- 13 Xiang Shou, Amit Agrawal, Ajay Nahata. Role of metal film thickness on the enhanced transmission properties of a periodic array of subwavelength apertures[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(24): 9834~9840
- 14 Yung-Chiang Lan, Che-Jung Chang, Peng-Hsiao. Resonant tunneling effects on cavity-embedded metal film caused by surface-plasmon excitation[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(1): 25~27