

# 非对称十字形金属结构的太赫兹透射特性 模拟研究

魏 波 赵国忠 刘立明 张盛博

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

**摘要** 基于时域有限差分方法对非对称十字形周期金属结构在太赫兹波段的透射特性进行了数值模拟研究。研究表明, 对称十字形周期金属结构, 其太赫兹透射谱出现陷波效应。保持十字形金属的长、宽、周期不变, 研究偏移量对太赫兹透射特性的影响, 得到随着偏移量的增加, 透射凹陷所在的频率位置向低频方向移动; 通过旋转样品, 研究非对称十字形结构在太赫兹波段的偏振特性, 即改变太赫兹电场偏振方向相对于金属的角度, 发现非对称十字形周期金属结构对偏振比较敏感; 而对称十字形周期金属结构无偏振依赖性。

**关键词** 太赫兹; 透射特性; 非对称十字形金属

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s111007

## Terahertz Transmission Properties through Asymmetrical Cross Metallic Structures by the Numerical Simulation

Wei Bo Zhao Guozhong Liu Liming Zhang Shengbo

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

**Abstract** The numerical simulation is applied to analyze Terahertz (THz) transmission properties of the asymmetrical cross periodic metallic structures, which is based on the finite-difference time-domain (FDTD) method. The results show that there exists the band elimination in the THz transmission spectrum for the cross metallic structures. When we investigate the effect of THz transmission properties caused by the offset and keep the length, width and period of the metallic structures unchanged, the frequency location of the transmission depression moves towards low frequency as increasing the offset of one metallic. By rotating the sample and changing the polarization of THz electric field related to the direction of one metallic, THz transmission of the asymmetrical cross metallic structure is strongly sensitive to the polarization, while the symmetrical cross structure is independent of THz polarization.

**Key words** terahertz; transmission; asymmetrical cross metallic

**OCIS codes** 350.7420; 120.7000; 040.2235; 260.3910

## 1 引 言

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波, 它在电磁波谱中处于“电子学”与“光子学”的过渡领域, 其特殊的位置具有重要的学

术价值和应用价值<sup>[1]</sup>, 如应用于光电信息功能材料诊断与表征、THz 光电器件小型化的研究<sup>[2,3]</sup>等。大量研究表明<sup>[4~6]</sup>, 当金属上构造亚波长尺度的网格结构时, 金属网格将表现出许多自然界天然材料所没有的功能特性。文献<sup>[7~10]</sup>报道了太赫兹波

收稿日期: 2011-08-11; 收到修改稿日期: 2011-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(50971094)和北京市自然科学基金(1092007)资助课题。

作者简介: 魏 波(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事亚波长分形结构的太赫兹光谱特性方面的研究。

E-mail: wbluck2009@126.com

导师简介: 赵国忠(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事太赫兹光谱、成像技术和光电信息功能材料等方面的研究。

E-mail: guozhong-zhao@126.com(通信联系人)

段亚波长阵列结构的形状、尺度大小、样品的厚度对透射光谱的影响,通过改变这些参数实现对太赫兹透射峰的调制,从而达到太赫兹光电器件的“人工设计”。文献[11]利用温度的改变控制亚波长半导体阵列的太赫兹透射特性,用于热控开关的研究。在对这些透射特性的理论解释中,文献[12~14]研究了太赫兹波段亚波长周期性金属孔阵列的透射性质,研究者将这一现象归因于 THz 表面等离子体激元共振 (SPR) 耦合效应<sup>[15~18]</sup>,即入射光与金属薄膜前后表面激发的表面等离子体的共振耦合导致透射增强。研究亚波长金属结构的太赫兹透射光谱特性,可以揭示金属结构对太赫兹波的调制机理,对于太赫兹光电器件的研制具有重要的指导意义,这在太赫兹光谱、成像、探测等方面有着潜在的应用价值。本文主要通过数值模拟研究亚波长金属网格结构在小型化光电器件方面的应用。

## 2 样品结构和理论模拟

基于模拟软件 CONCERTO 的时域有限差分 (FDTD) 方法,研究非对称十字形周期金属结构的太赫兹透射光谱特性。经过大量的模拟分析,选取十字形结构的线长  $L = 180 \mu\text{m}$ 、线宽  $W = 5 \mu\text{m}$  作为典型结构参数。定义偏移量 ( $\Delta L$ ) 为两相交金属中心点之间的距离,偏振角  $\theta$  为非对称十字形结构的水平方向与 X 轴之间的夹角,如图 1 所示。通过改变偏移量  $\Delta L$  的值,研究太赫兹透射谱的变化规律;通过旋转样品,改变偏振角度  $\theta$  的值,研究非对称十字形结构的偏振依赖性。

模拟时首先建模如图 1 所示的非对称十字形结构,然后在该结构的外面建一个长方体区域包围该结构,以便进行网格划分和确定边界条件。长方体

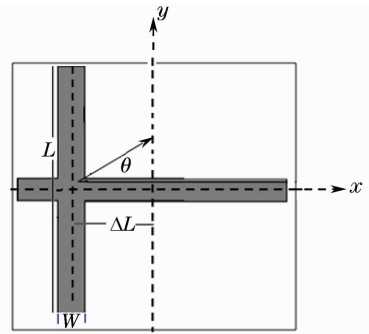


图 1 非对称十字形金属结构示意图  
Fig. 1 Schematic of asymmetrical cross metallic structures

的长宽等于十字形结构的周期  $T$ ,高度由模拟计算的频率范围决定,然后在长方体的四个侧面加上周期边界条件。模拟运行时软件将自动以样品周期的大小在  $xy$  平面内无限延伸成一个平面,使理论接近实际。长方体的后表面加上激励源,即模拟 THz 波垂直照射到非对称十字形结构的表面。十字形结构的材料设置为理想金属,为了模拟简化起见,不考虑金属结构所附着的衬底,这与实际情形有所偏离,但若选用高透射、低色散的衬底材料如高密度聚乙烯或聚苯乙烯,其透射光谱特性应与本模拟结果基本一致。

## 3 模拟结果与讨论

模拟计算十字形周期金属结构: $L = 180 \mu\text{m}$ ,  $W = 5 \mu\text{m}$ ,  $T = 200 \mu\text{m}$  保持不变,移动水平方向的矩形金属,偏移量  $\Delta L$  分别为 18, 36, 54, 72 和  $90 \mu\text{m}$  时的太赫兹透射谱,如图 2(a) 所示。为了更好地看出透射谱与偏移量的变化规律,以偏移量  $\Delta L$  为横坐标,透射凹陷所在的共振频率为纵坐标,如图 2(b) 所示。

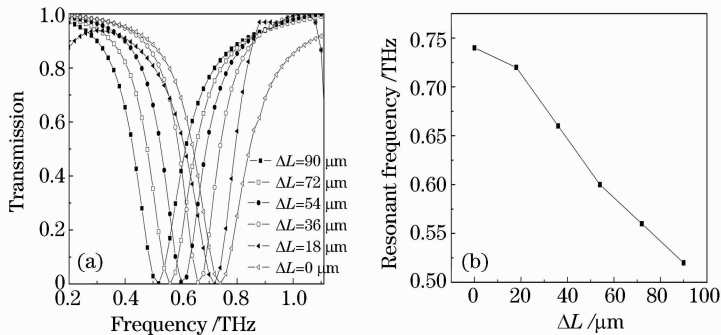


图 2 偏振角度  $\theta = 0^\circ$  时,非对称十字形金属结构 (a) 不同偏移量下的 THz 透射谱和 (b) 偏移量与共振频率的关系  
Fig. 2 Polarization angle  $\theta = 0^\circ$ , in the asymmetrical cross metallic structures, (a) THz transmission spectra with different offsets and (b) relationship of offset and frequency of the resonant

研究表明,非对称十字形周期金属结构在偏振角度 $\theta=0^\circ$ 保持不变,透射谱随偏移量的改变遵循一定的规律,即随着偏移量的增加向低频移动。这表明金属网格结构对透射谱有很大的影响,可以起到调制光谱特别是陷波的作用。

通过旋转样品,研究了这种结构的偏振特性。选取任意偏移量 $\Delta L=72\ \mu\text{m}$ ,偏振角度 $\theta$ 分别为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 $90^\circ$ 时,模拟所得到的透射谱如图3(a)所示。

研究表明,非对称十字形周期金属结构对偏振

有很强的依赖性。从图3(a)可以看出,偏移量 $\Delta L=72\ \mu\text{m}$ 时,随着偏振角度的增加,第一个透射谷的透射率增大,第二个透射谷的透射率变小,在 $45^\circ$ 时,为两个对称的透射谷。为了更好地对比研究非对称十字形结构,给出了对称十字形周期金属结构的太赫兹透射谱,即偏移量 $\Delta L=0\ \mu\text{m}$ ,如图3(b)显示对称十字形结构对偏振没有依赖性。图3(b)中附图为将透射谷放大100倍后的显示,得到透射谷的位置不变,透射率大小相差很小,即对称十字形结构对偏振几乎没有影响。

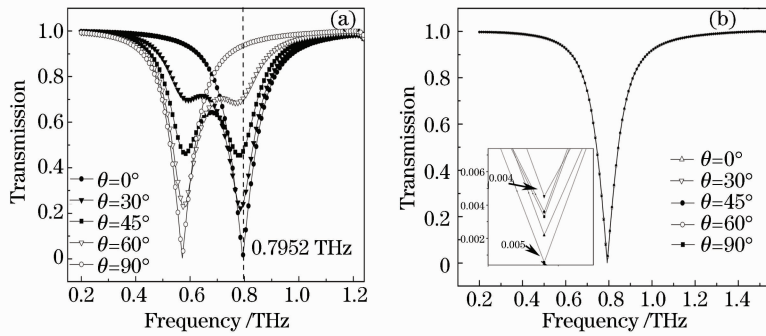


图3 不同偏振角度的透射谱。(a)非对称的十字形结构;(b)对称的十字形结构

Fig. 3 Transmission spectra under different polarization angles. (a) Asymmetric cross structure; (b) symmetric cross structure

为了更好地理解透射特性,给出了电场分布图,进一步分析该现象的内部机理。如图3(b)所示,0.7952 THz处,偏振角度 $\theta=0^\circ$ 对应的透射率为

1.3%,偏振角度 $\theta=90^\circ$ 对应透射率为93%。模拟了这两种偏振角度在0.7952 THz处的电场分布图,如图4(a)和(b)所示。

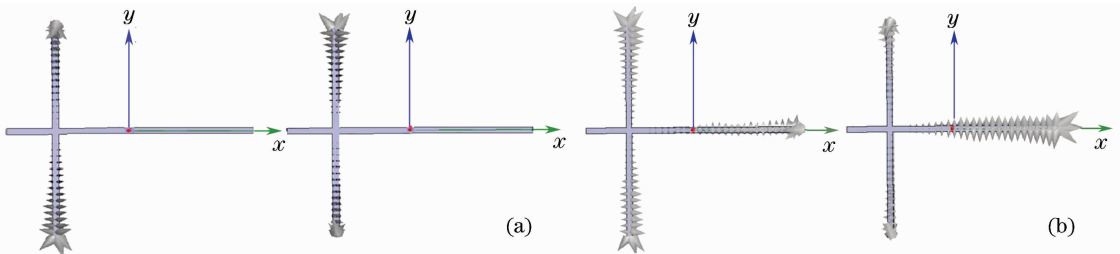


图4 电场分布图

Fig. 4 Electric field distribution

图4(a)为偏振角度 $\theta=0^\circ$ 时,0.7952 THz处透射率为1.3%的电场分布图。图中平行于 $y$ 轴的矩形金属中有电子运动,且矩形金属上下电场方向总是相反;平行于 $x$ 轴方向的矩形金属中电子运动几乎可以忽略。这是由于入射电场相当于TE偏振模式,平行于该偏振模式( $x$ 轴方向的矩形金属)几乎不会引起电子运动的共振,这很好地证实了该结构在该频率处的透射率只有1.3%。这是由于电子运动的共振主要由垂直于电场方向的矩形金属中的电子激发引起的,说明了这种结构的透射增强主要是

由入射光与金属薄膜前后表面激发的表面等离子体的共振耦合决定的。

图4(b)为偏振角度为 $\theta=90^\circ$ 时,0.7952 THz处透射率为93%的电场分布图。得到平行于 $x$ 轴方向的矩形金属一边电子运动的共振很强,另一边很弱;在平行于 $y$ 轴的矩形金属中有电子运动且矩形金属上下电场方向相同。这是由于偏振角度 $\theta=90^\circ$ 时,平行于 $x$ 轴方向的矩形金属变为垂直于电场方向,从而电子被激发引起共振。图中平行于电场方向的矩形金属中同样有电子运动,这很好地证实

了该结构在该频率处透射率很大,是由于电子运动共振很强引起的。

## 4 结 论

通过数值模拟,研究了非对称十字形周期金属结构的太赫兹透射光谱特性。研究表明,非对称十字形金属结构对偏振有很强的依赖性,且随着偏移量的增加,透射凹陷所在的频率位置向低频方向移动。电场分布图很好地说明,入射光与金属膜前后表面激发的表面等离子体共振耦合决定该结构在不同偏振角度下透射率的大小。

## 参 考 文 献

- Liu Shenggang. New progress on terahertz science and technology [J]. *China Basic Science*, 2006, **1**: 7~12  
刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, **1**: 7~12
- Hu Jie, Chen Heming. Loss characteristics of photonic crystal fiber as terahertz waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 567~572  
胡 婕, 陈鹤鸣. 光子晶体太赫兹波导的损耗特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(4): 567~572
- Y. Ma, A. Khalid, T. D. Prysdale *et al.*. Direct fabrication of terahertz optical devices on low absorption polymer substrates [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1555~1557
- J. F. O'Hara, E. Smirnova, H. T. Chen *et al.*. Properties of planar electric metamaterials for novel terahertz applications[J]. *J. Nano-Electronics and Optoelectronics*, 2007, **2**(1): 90~95
- H. T. Chen, J. F. Zhou, J. F. O'Hara *et al.*. Antireflection coating using metamaterials and identification of its mechanism [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, **105**(7): 073901
- T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Gaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667~669
- Abul K. Azad, Y. Zhao, W. Zhang. Transmission properties of terahertz pulses through an ultrathin subwavelength silicon hole array[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(14): 141102
- F. J. Garcia de Abajo, J. J. S'aenz, I. Campillo *et al.*. Site and lattice resonances in metallic hole arrays [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 7~18
- Abul K. Azad, Yuguang Zhao, Weili Zhang. Effect of dielectric properties of metals on terahertz transmission in subwavelength hole arrays[J]. *Opt. Lett.*, **31**(17): 2637~2639
- Hua Cao, Ajay Nahata. Influence of aperture shape on the transmission properties of a periodic array of subwavelength apertures[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(16): 3664~3672
- J. Gómez Rivas, P. Haring Bolivar, H. Kurz. Thermal switching of the enhanced through subwavelength apertures[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14): 1680~1682
- Liu Juanyi, Yang Huan, Luo Xiangang *et al.*. Investigation of localized surface plasmons resonance properties of metal composition nanoparticles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1092~1095  
刘娟意, 杨 欢, 罗先刚等. 金属复合纳米粒子的局域表面等离子体特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1092~1095
- D. Qu, D. Grischkowsky. Observation of a new type of THz resonance of surface metal-film hole arrays [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(19): 196804~196806
- F. Miyamaru, M. Hangyo. Finite size effect of transmission property for metal hole arrays in region[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(15): 2742~2744
- H. F. Ghaemi, Thio Tineke, D. E. Grupp *et al.*. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(11): 6779~6782
- Tineke Thio, H. F. Ghaemi, H. J. Lezec *et al.*. Surface-plasmon-enhanced transmission through hole arrays in Cr films [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(10): 1743~1748
- 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
- Yung-Chiang Lan, Che-Jung Chang, Peng-Hsiao Lee. Resonant tunneling effects on cavity-embedded metal film caused by surface-plasmon excitation[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(1): 25~27

栏目编辑: 李文喆