

· 光电器件与材料 ·

## 金属亚波长狭缝阵列结构的太赫兹偏振透射特性研究

刘海英

(华南师范大学信息光电子科技学院广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:** 利用太赫兹时域光谱技术, 研究了金属亚波长狭缝阵列结构的太赫兹透射特性。结果表明, 太赫兹波会激发金属狭缝阵列结构的表面等离子体波共振, 表面等离子体共振产生太赫兹波段超强透射现象。由于表面等离子体共振效应, 这种狭缝结构对于透射的太赫兹产生很高偏振度, 这些实验结果为制作太赫兹波段偏振器件提供了有益的参考。

**关键词:** 太赫兹时域光谱系统; 金属亚波长狭缝阵列结构; 表面等离子体共振; 偏振度

中图分类号: O433.5<sup>4</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-04-0034-03

## Research on Terahertz Polarization Transmission Characteristics of Metal Sub-wavelength Slit Array Structure

LIU Hai-ying

(Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices of Guangdong province, School of Information and Optoelectronic Science and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** According to terahertz time domain spectroscopy, terahertz (THz) transmission characteristics of metal sub-wavelength slit array structure are researched. The results show that surface plasma wave resonance of metal slit array structure can be excited by THz wave, the super-strong transmission phenomena in THz transmission waveband is produced by the resonance. For surface plasma resonance effect, very high degree of polarization of transmission THz will be produced by the slit structure. The experimental results as benefit references are provided to the production of THz polarization devices.

**Key words:** terahertz (THz) time domain spectroscopy; metal sub-wavelength slit array structure; surface plasma resonance; degree of polarization

太赫兹 (THz) 辐射, 又称 T 射线, 通常指的是频率在 0.1~10 THz (相应波长在 3 mm~30  $\mu\text{m}$ ) 之间的电磁波, 在电磁波频谱中处于红外与微波之间, 属于远红外波段。太赫兹辐射可以分为频率在太赫兹的单频连续波 (或准连续波) 和频带宽度包括几个或几十个太赫兹的窄脉冲。太赫兹脉冲的频带可以覆盖从 GHz 至几十 THz 范围, 这使得太赫兹波在诸多领域有着广泛的应用前景, 成为当前关于电磁辐射研究的前沿和热点<sup>[1-6]</sup>。随着超快激光技术的发展和脉冲太赫兹辐射源的出现, 太赫兹时域光谱技术作为一种新的、快速发展的光谱分析方法在许多领域备

受关注, 太赫兹时域光谱技术利用飞秒激光技术可获得宽波段的太赫兹脉冲, 具有大带宽、高信噪比和室温下工作等优点。金属亚波长结构在入射光的激发下会产生表面等离子体共振效应, 使得太赫兹波段的金属亚波长微结构研究成了近几年的热点<sup>[7]</sup>。目前, 基于金属亚波长微结构的太赫兹波段的偏振器件还没有像其他波段那样成熟, 因此研究金属亚波长微结构在太赫兹波段的偏振透射特性对于太赫兹科学与技术的发展有着重要意义<sup>[8-11]</sup>。

文中利用太赫兹时域光谱实验技术研究了金属亚波长狭缝阵列结构对太赫兹波偏振透射特性的影

收稿日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金 (61201102); 广东省自然科学基金 (S2012040006347); 广东高校优秀青年创新人才培养项目 (LYM10067)

作者简介: 刘海英 (1979-), 女, 博士, 华南师范大学讲师, 主要研究方向为微纳米材料与器件研究。

响,测量了太赫兹波的电场以不同的入射偏振角度通过金属狭缝阵列结构时其透射率的变化,分析了太赫兹脉冲通过金属狭缝阵列结构后的偏振特性,着重分析了  $TE$  和  $TM$  两个偏振方向的太赫兹脉冲与金属狭缝阵列结构相互作用的物理机制。

## 1 实验

本实验使用的是透射式太赫兹时域光谱系统,如图1所示。系统所使用的飞秒光源是 Coherent 公司生产的掺钛蓝宝石振荡器(Mira900),其产生的激光是中心波长为 800 nm,重复频率为 76 MHz,脉宽为 130 fs 的飞秒脉冲。飞秒脉冲通过分束器后分成平均功率为 30 mW 的泵浦光和 30 mW 探测光。其中泵浦光用来激发太赫兹波发射器,经过光学延迟线后的探测光用来触发太赫兹波探测器,得到太赫兹波的时域谱。发射器和探测器都是由低温生长的 GaAs 制成的光电导天线。实验中,为太赫兹发射器提供了一个约 50 V 的直流偏压,产生的太赫兹波经过抛物面镜聚焦通过样品(金属狭缝阵列结构),通过样品之后的太赫兹波被抛物面镜准直入射到探测器上。改变泵浦光和探测光的相对时间延迟,可以获得太赫兹脉冲的电场。在对样品进行检测时,太赫兹入射波垂直于样品表面正入射到样品上。

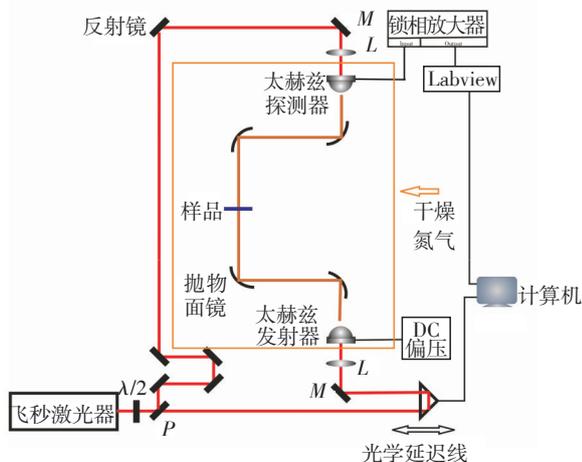


图1 太赫兹时域光谱测量系统

实验中测量的金属狭缝阵列结构是利用飞秒脉冲微加工技术制备<sup>[12]</sup>。金属狭缝阵列的结构由两部分组成:周期性的平行金属线条和附着金属线条的衬底。金属线条是 50 nm 厚度的 Au 薄膜,附着金属线条的衬底为 600  $\mu\text{m}$  厚度的玻璃基片。图2是金属

狭缝阵列结构的显微镜图片,周期  $p = 200 \mu\text{m}$ ,金属线条宽度为 174  $\mu\text{m}$ ,空气缝宽为 26  $\mu\text{m}$ 。

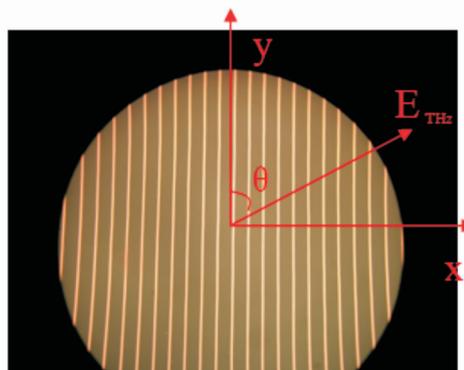
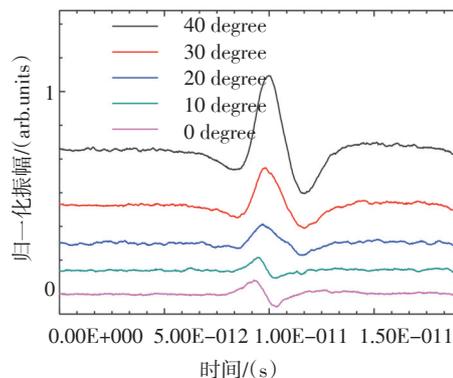


图2 金属亚波长周期性结构

## 2 实验结果与分析

实验通过改变金属狭缝阵列方向与太赫兹电场方向之间的夹角  $\theta$ (图2所示),测量了不同偏振方向的太赫兹脉冲入射到金属狭缝阵列结构之后的太赫兹时间波形见图3。为了方便说明,所选取的坐标轴如图2,定义太赫兹偏振方向与金属狭缝阵列方向夹角  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  分别代表  $TE$  偏振和  $TM$  偏振。当金属狭缝阵列方向与太赫兹电场方向之间的夹角改变时,太赫兹的偏振方向从  $TM$  改变到  $TE$  时,太赫兹透射脉冲的幅值迅速的减小。对于  $TM$  偏振的太赫兹脉冲,发现透射后的太赫兹脉冲幅值存在增透效应,但是对于  $TE$  偏振的太赫兹脉冲透射之后的幅值迅速的减小。因为  $TM$  偏振激发金属狭缝阵列结构的表面等离子波共振,这种共振效应的存在导致了  $TM$  偏振的太赫兹脉冲的透射增强。

通过对测量得到的太赫兹脉冲进行傅里叶变



(a) 夹角  $0^\circ \sim 40^\circ$  时

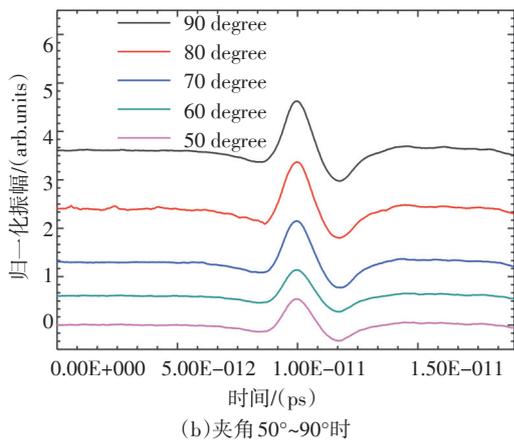


图3 金属狭缝阵列与太赫兹偏振方向不同夹角时的时域光谱

换,可以得到其对应的频谱透射谱如图4。由于时域光谱测量得到的太赫兹脉冲存在回波(回波是由于玻璃衬底对太赫兹波二次反射造成的),所以进行傅里叶变换,把回波做补零处理。从图中可以看出, *TM* 偏振的太赫兹脉冲经过金属狭缝阵列结构之后的透过率最强,而 *TE* 偏振的太赫兹脉冲透过率最低。太赫兹的偏振方向从 *TM* 改变到 *TE* 时,太赫兹脉冲幅值减小的同时太赫兹脉冲中心频率向短波方向移动,这是因为表面等离子共振随着金属狭缝阵列方向与太赫兹电场方向之间的夹角减小而减弱。发现对于 *TM* 偏振的太赫兹脉冲透射之后在 0.6 THz 附近出现了透射率的极小值,这说明金属狭缝阵列结构存在 wood 反常<sup>[13]</sup>。

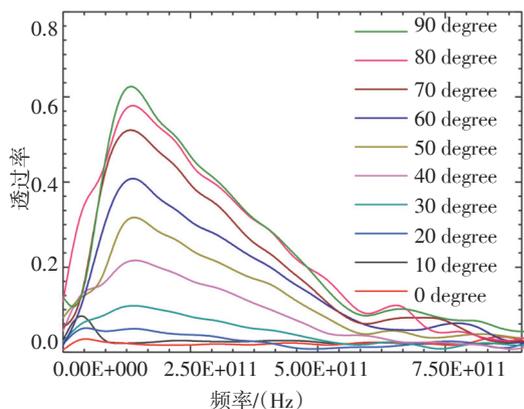


图4 金属狭缝阵列与太赫兹偏振方向不同夹角时的透过率

为了进一步比较 *TM* 偏振和 *TE* 偏振的太赫兹脉冲通过金属狭缝阵列结构之后透过率的不同,给出了太赫兹脉冲的透过率随着金属狭缝阵列与太赫兹电场偏振方向夹角变化的曲线如图5所示。从图中可以看出,金属狭缝阵列与太赫兹电场偏振方向夹

角为  $90^\circ$  (*TM* 波) 时其透过率最高为 0.966; 随着夹角的减小,偏振度渐变弱,金属狭缝阵列与太赫兹电场偏振方向夹角为  $0^\circ$  (*TE* 波) 其透过率最低为 0.063。通过对不同角度的透过率比较计算可以得到金属狭缝阵列结构的偏振度  $P = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}}$  为 88%。

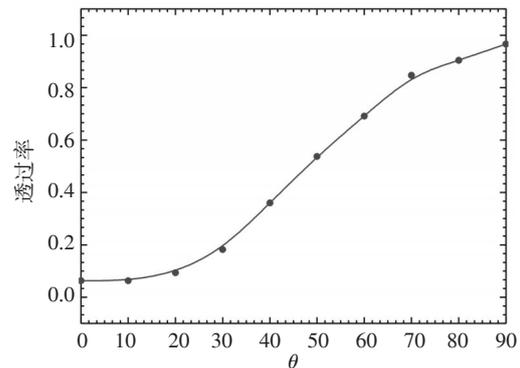


图5 金属狭缝阵列与太赫兹偏振方向不同夹角时的透过率

### 3 结论

利用太赫兹时域光谱技术,测量了金属狭缝阵列结构的太赫兹透射特性和偏振特性。结果表明金属狭缝阵列与太赫兹偏振方向夹角为  $90^\circ$  时,出现超强透射,这种太赫兹偏振的超强透射来源于金属表面等离子体的共振透射增强。金属狭缝阵列与太赫兹偏振方向夹角为  $0^\circ$  时,偏振透射率较低,这是因为对于金属狭缝阵列结构中的金属线条来说只支持垂直偏振电磁波的金属表面等离子体波传播,当夹角为  $0^\circ$  时即电磁波偏振与金属线条方向平行时不支持金属表面等离子体波传播。利用金属狭缝阵列结构的表面等离子体共振效应,可以制备具有高透射率和高偏振度的太赫兹偏振器件。

### 参考文献

- [1] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007.
- [2] 张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [3] 赵国忠. 太赫兹光谱和成像应用及展望[J]. 现代科学仪器,2006(2):36-37.
- [4] 张兴宁,陈稷,周泽魁. 太赫兹时域光谱技术[J]. 激光与光电子学进展,2005,42(7):35-38.

(下转第48页)

$$SNR = 10 \lg \left( \frac{I_t - I_b}{\sigma} \right) \quad (8)$$

式中,  $I_t$  为目标点灰度, 计算中取该点附近  $10 \times 10$  邻域范围内的灰度最大值作为目标点的灰度值。  $I_b$  为背景灰度,  $\sigma$  为噪声的标准差。

利用式(8), 对图3中的各红外图像的信噪比进行计算, 结果如表1所示。

表1 图像信噪比较

图像	信噪比		
	原图	传统形态学方法	文中形态学方法
图3a	3.0	6.0	7.0
图3b	3.0	10.0	11.8
图3c	3.0	12.0	15.1

表1中给出的结果表明, 图像经过文中算法的处理后可以获得较大的信噪比, 再次证明了所提出的环带结构形态学处理方法比传统形态学方法在背景杂波抑制方面更为有效, 可为后续的目标检测提供保证。

#### 4 结束语

文中在分析红外弱小目标成像特征和几何形态学原理的基础上, 设计了基于环带结构的形态学红

外目标检测方法, 对传统的Top-Hat算法进行了改进, 提高了复杂背景杂波的抑制效果, 基于真实红外图像的处理结果验证了本方法的有效性。但文中算法针对的是单帧红外图像, 未考虑目标的临近飞行所带来的目标成像区域增大问题, 需要进一步考虑随目标面积变化的结构元素尺度的大小自适应性问题。

#### 参考文献

- [1] Cafer C E, Silveanna J, Mooney J M. Optimization of point target tracking filters[J]. IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, 2008, 36(1):15-25.
- [2] 余农, 吴常泳, 汤心溢, 等. 红外目标检测的自适应背景感知算法[J]. 电子学报, 2005, 33(2):200-204.
- [3] 朱金标. 低信噪比红外图像弱小目标检测研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] 徐杰. 数字图像处理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
- [5] 蔡阳, 林再平, 周一宇. 基于形态学滤波的红外弱小目标背景抑制[J]. 电子信息对抗技术, 2012, 27(6):38-41.
- [6] 孙新德, 方桂珍, 李玲玲, 等. 联合形态滤波和MRF模型的红外弱小目标检测[J]. 计算机工程, 2012, 38(14):153-156.
- [7] 王学伟, 王春歆, 张玉叶. 点目标图像信噪比计算方法[J]. 电光与控制, 2010, 17(1):18-21.
- [8] 曹俊诚. 太赫兹辐射源与探测器研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2003(2):111-117.
- [9] 李雅卓, 李向军, 洪治. 基于太赫兹时域光谱的半导体材料参数测量[J]. 半导体技术, 2008(12):1074-1077.
- [10] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. Nature, 1998, 391(6668):667-669.
- [11] Hsieh C F, Lai Y C, Pan R P, et al. Polarizing terahertz waves with nomadic liquid crystals [J]. Opt. Lett., 2008, 33(1):1174-1176.
- [12] Awasthi S K, Srivastava A, Maaviya U, et al. Wide-angle broadband plate polarizer in Terahertz frequency region[J]. Solid State Commun., 2008, 146(11):506-509.
- [13] Yamada I, Takano K, Hangyo M, et al. Terahertz wire grid polarizes with micrometer pitch Al gratings [J]. Opt. Lett., 2009, 34(3):274-276.
- [14] Sun L, Lv Z H, Wu W, et al. Double grating polarizer for Terahertz radiation with high extinction ratio [J]. Appl. Opt., 2010, 49(10):2066-2071.
- [15] J W Yao, C Y Zhang, H Y Liu, et al. High spatial frequency periodic structures induced on metal surface by femtosecond laser pulses [J]. Opt. Express, 2012, 20(2):905-911.
- [16] Ruan Z, Qiu M. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: the role of localized waveguide resonances[J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 96(23):233901-4.

(上接第36页)