

太赫兹波段金属阵列结构的透射及反射宽谱偏振特性

沈云¹, 汪涛¹, 汪云², 邓晓华^{2*}, 曹俊诚³, 谭智勇³, 邹林儿¹, 代国红¹

¹南昌大学物理学系, 江西 南昌 330031;

²南昌大学空间科学与技术研究院, 江西 南昌 330031;

³中国科学院上海微系统与信息技术研究所中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050

摘要 基于计算机仿真技术(CST)软件对二维金属光栅阵列在 0.1~10 THz 波段的偏振特性进行了数值分析, 利用光刻和金属薄膜工艺在 500 μm 厚的高阻硅衬底上沉积了 20 nm 厚的不同结构周期的金属铜光栅阵列, 利用傅里叶变换光谱仪测量了该光栅阵列的透射及反射特性。结果表明: 在太赫兹宽谱范围内, 该光栅阵列的透射和反射都具有良好的偏振特性, 且偏振特性范围可通过调整结构周期进行调节; 该研究对太赫兹偏振器的进一步研究及应用提供了参考。

关键词 集成光学; 偏振特性; 透射及反射特性; 金属光栅阵列; 太赫兹; 宽谱

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0513001

Broad-Band Polarization Characteristics on Transmission and Reflection of Metal Array Structures in Terahertz Region

Shen Yun¹, Wang Tao¹, Wang Yun², Deng Xiaohua², Cao Juncheng³,
Tan Zhiyong³, Zou Lin'er¹, Dai Guohong¹

¹Department of Physics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

²Institute of Space Science and Technology, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

³Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Chinese Academy of Sciences,

Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract On the basis of computer simulation technology (CST) software, the polarization characteristics of two-dimensional metal grating arrays in 0.1-10 THz region are numerically analyzed. Different periodic metal copper grating arrays with 20 nm thickness deposited on 500 μm thick high-resistance silicon substrate are experimentally prepared by photo-lithography and thin-film technology. Then, the transmission and reflection characteristics of the structure are measured by Fourier transform spectrometer. Results show that the grating arrays have good polarization characteristics of the transmission and reflection in terahertz broad-band, and the polarization range can be adjusted by the structural period. Our results provide a reference for the further study and application of THz polarizer.

Key words integrated optics; polarization characteristics; transmission and reflection characteristics; metal grating array; terahertz; broad-band

OCIS codes 300.6495; 040.2235; 130.5440; 080.1238

1 引 言

偏振是电磁波的重要特征之一。利用光的偏振特征可以极大地提高信息的获取与分析能力, 得到

单纯利用光强特征无法得到的目标的特征信息, 如介电常数、复折射率、反射率、表面法线方向等^[1-2]。电磁波的偏振控制可以应用于通信编码、光开关、传感、成像等领域, 尤其是在偏振成像领域, 因其能获

收稿日期: 2017-09-30; 收到修改稿日期: 2017-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61405087)、上海市科技创新行动计划(15DZ0500103)、上海市自然科学基金(17ZR1448300)

作者简介: 沈云(1980—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事 THz 器件及电磁特性方面的研究。

E-mail: shenyun@ncu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: Dengxiaohua0@gmail.com

取目标辐射或反射的额外的偏振多维信息,具有其他成像探测手段难以比拟的优势,在工业检测、环境监测、医学诊断、海洋监测、大气遥感、仿生导航、天文观测以及军事成像等方面具有重要应用^[3-5]。此外,太赫兹(THz)波的波长介于微波和光波之间^[6],其具有的独特性质以及在物理、化学、天文、生命科学等学科的潜在应用近年来备受关注。随着太赫兹辐射源及探测技术的逐渐成熟^[7-8]以及太赫兹技术在通信^[9]、成像^[10]、生物技术、安全检测、光谱检测^[11-12]等领域的迅速发展,作为太赫兹应用系统中不可少的部分——太赫兹功能器件(滤波器^[13-14]、分束器^[15]、偏振片^[16-18]、偏振转换器^[19]等)成为当前的研究热点。

目前,太赫兹的偏振研究包括利用金属^[20-22]、介质材料构成光栅^[23-24]、孔阵列、超表面^[25-28]、超材料^[29]等结构实现太赫兹的偏振功能,以及利用不同物理机制及结构实现偏振分裂、偏振转换、提高偏振消光比、进行偏振调制等。然而,大多数的研究都集中在1 THz附近的窄太赫兹波段,且主要是针对透射光的偏振特性。事实上,具有宽谱特性的偏振能极大地拓展偏振的应用范围,而由于反射光在实际光学系统中不可忽略,因此对它的研究也具有重要意义。基于此,本文利用电磁仿真软件 CST studio suite 2014 对二维金属光栅阵列结构在0.1~10 THz波段的反射、透射偏振特性进行了数值分析,并利用光刻和金属薄膜工艺在500 μm 厚的高阻硅衬底上沉积厚度为20 nm的不同结构周期的铜金属光栅阵列。利用 VERTEX80v 傅里叶变换光谱仪研究该光栅阵列的透射特性及反射特性。结果表明:在宽谱范围内,光栅阵列结构的透射光和反射光都具有良好的偏振特性,可通过调整结构周期来调节其偏振区域。

2 结构和数值模拟

本研究涉及的二维金属阵列结构如图1所示,沿 x 、 y 方向的周期分别为 P_x 、 P_y ,单元周期内的矩形金属沿 x 、 y 方向的长度和宽度分别为 a_x 、 a_y ,厚度为 h 。太赫兹波沿 z 轴(垂直于金属阵列表面)方向入射,定义光波电场 E 的方向与 x - y 平面中的 x 方向之间的夹角为 θ 。主要研究 θ 为 0° [横电(TE)模式]和 90° [横磁(TM)模式]的透射和反射偏振特性。一般来讲,金属阵列的透射与阵列周期、形状及入射模式均密切相关。对于通常的金属孔阵列结构,其表面等离激元极化波与电磁波的耦合会形成异常的透射增强,从而影响透射、反射特性及偏振特

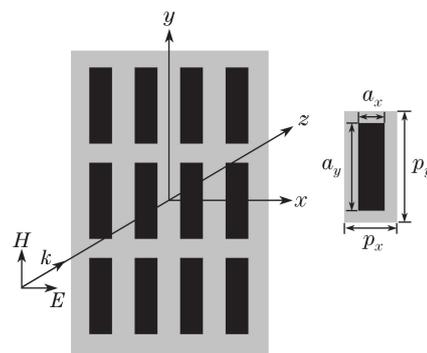


图1 金属阵列结构

Fig. 1 Schematic of metal array structure

性。本研究中的亚波长块阵列与孔阵列的结构稍有不同,其特性更为复杂。现有研究已表明,沿偏振方向垂直于金属块较长一边的TE偏振相对于垂直于短边的TM偏振而言,由于能更好地支持电磁波的金屬表面等离体传播,其透射率较TM偏振的透射率高^[30-32],而且其透射谱中的透射峰、透射谷两个主要特征分别与金属块阵列周期和金属块形状密切相关^[30]。透射峰是由金属块阵列构成的二维金属光栅对入射电磁波的反射光谱的相干叠加形成的。对于一定周期的金属块阵列结构,其反射的电磁波会在某些特定频率处出现相干相消,即形成抗反射现象,透射极大,对应的频率可用瑞利异常公式描述。透射谷的形成源于入射电磁波与金属块的局域化表面等离体偶极子的耦合,在金属块与太赫兹相互作用过程中,金属块可以看作是一个局域化的表面等离体偶极子,入射电磁波激发了金属块结构的电偶极子,从而产生强烈的偶极子共振耦合,结果导致入射波被共振反射,从而形成一个透射谷,共振反射频率由沿电磁场偏振方向的块长度及基底介电常数共同决定^[33]。金属块阵列具体的光学特性可用严格耦合波方法进行分析,也可通过S参数反演法进行分析。本研究选用能直接计算反射系数 S_{11} 、透射系数 S_{21} 等S参数的电磁仿真软件 CST studio suite 2014 对透射、反射偏振特性进行数值分析,对该结构在0.1~10 THz范围内的TM、TE模式谱线进行计算。计算过程中采用unit cell元胞边界,以图1中 P_x 、 P_y 周期单元结构作为元胞。另外,考虑到金属在太赫兹波段的介电常数非常大,计算中将金属设置为理想的导体材料。以金属厚度 $h=20$ nm为例展开研究,当 $P_x=10$ μm 、 $P_y=300$ μm 、 $a_x=5$ μm 、 $a_y=250$ μm 时,计算得到的TM及TE入射波的反射谱线分别如图2(a)中的黑色实线及虚线所示;透射谱线分别如图2(b)中的黑

色实线及虚线所示。由图 2(a)可知:在 0.1~10 THz宽谱范围内,反射谱线都有较好的偏振特性,其 TM 入射波的反射率在 0.6 以上,TE 入射波的反射率在 0.1 以下;随着频率增加,TM、TE 入射波的反射谱线逐渐趋近,偏振效果变差。图 2(b)表明:在 0.1~10 THz 宽谱范围内,透射谱线都具有良好的偏振特性,尤其是在 0.1~8.7 THz 范围内,除个别共振频率点外,TE 入射波的透射率在 0.9 以上,TM 入射波的透射率在 0.1 以下;整体变化趋势同样是随着频率增加,偏振效果逐渐变差。TE 及 TM 入射波的偏振差别再次表明,由于沿偏振方向垂直于金属块较长一边的偏振(TE 偏振)能更好地支持电磁波金属表面等离子体的传播,透射率较垂直于较短一边的偏振高(TM 偏振)^[30-32]。从图 2 也可以看出:TE 的透/反射谱线确有较为明显的峰/谷波动,在某些频率处出现了与金属块阵列周期相关的相干相消抗反射现象,表现出透射极大(反射极小);在另外一些频率处出现了与金属块形状相关的

入射波激发金属块结构的电偶极子产生强烈偶极子共振耦合而导致的共振反射现象,表现为透射极小(反射极大)。

需要说明的是,由于周期结构中多种衍射模式的存在,其反射和透射模式极为复杂,图 2 中所计算的反、透射谱均为 0 级衍射模式的谱线,其他衍射级次因强度较弱而未作主要因素考虑。同时,考虑到在实际制备及集成应用中基底的影响,该金属阵列结构加上 100 nm Si 基底的 TM/TE 的反射及透射谱线分别如图 2(a)和图 2(b)中的灰色实/虚线所示。在计算过程中,Si 的介电常数取 11.7。对比灰色曲线与黑色曲线可知:基底介质的加入会使金属阵列本身结构的高频部分谱线特征向低频移动;同时也会促使 TM 和 TE 模式有靠近的趋势,尤其是在高频部分,使 TE 模式向 TM 模式趋近的趋势随频率增加而变得更加明显,总体上降低了偏振消光效果。需要指出的是,如果考虑基底介质的损耗,偏振效果会进一步降低,且全波段都会受到影响。

为了更进一步研究阵列结构的透射、反射偏振特性,对金属阵列结构 x 方向周期发生变化时的情况也进行了计算。当 $P_y = 300 \mu\text{m}$ 和 $a_y = 250 \mu\text{m}$ 不变, x 方向变为 $P_x = 20 \mu\text{m}$ 和 $a_x = 10 \mu\text{m}$ 时, TM 及 TE 入射波的反射谱线分别如图 3(a)中的黑色实线及虚线所示;透射谱线分别如图 3(b)中的黑色实线及虚线所示。比较图 2 和图 3 中互相对应的黑色实、虚线可知, x 方向周期变大会促使高频部分谱线向低频移动,并促使 TM、TE 模式的透射、反射谱线在高频部分愈发靠近,也就是使高频部分的偏振消光效果变差。由图 2 和图 3 可知:当结构固定时,入射频率越高,即波长越小时,偏振效果越差;当频率或波长固定时,结构的周期 P_x 越大,偏振效果越差。因此,入射波长与 x 方向周期 P_x 两者的比例越大,偏振效果越明显,即:结构越趋于亚波长范围,效果越明显。

另外, $P_x = 20 \mu\text{m}$ 、 $a_x = 10 \mu\text{m}$ 结构加上 100 nm Si 基底的 TM/TE 反射和透射谱线分别如图 3(a)、(b)中的灰色实、虚线所示,基底影响与图 2 中基底的影响类似。

3 实验测量与分析

3.1 样品制备

在 500 μm 厚的高阻硅上分别制备了 $P_x = 10 \mu\text{m}$ 、 $a_x = 5 \mu\text{m}$ 和 $P_x = 20 \mu\text{m}$ 、 $a_x = 10 \mu\text{m}$ 的两种金属阵列结构(其他结构参数为 $P_y = 300 \mu\text{m}$ 、

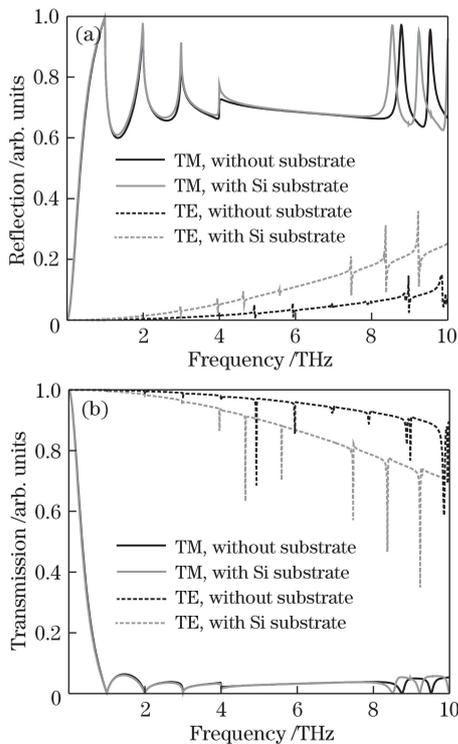


图 2 $P_x = 10 \mu\text{m}$ 、 $a_x = 5 \mu\text{m}$ 、 $P_y = 300 \mu\text{m}$ 、 $a_y = 250 \mu\text{m}$ 时,金属阵列结构有无 Si 时 TM/TE 模式的 (a)反射谱线和(b)透射谱线

Fig. 2 (a) Reflection spectrum lines and (b) transmission spectrum lines for TM/TE mode of metal array with and without Si substrate when the parameters of the array are $P_x = 10 \mu\text{m}$, $a_x = 5 \mu\text{m}$, $P_y = 300 \mu\text{m}$, and $a_y = 250 \mu\text{m}$

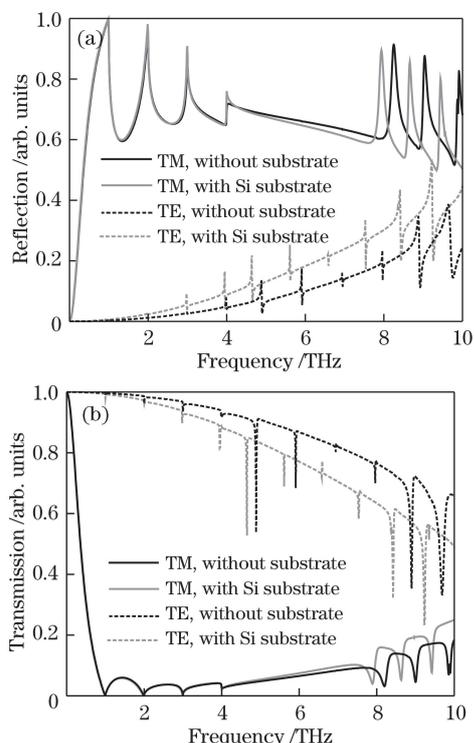


图 3 $P_x=20\ \mu\text{m}, a_x=10\ \mu\text{m}, P_y=300\ \mu\text{m}, a_y=250\ \mu\text{m}$ 时, 金属阵列结构有无 Si 基底时 TM/TE 模式的 (a) 反射谱线和 (b) 透射谱线

Fig. 3 (a) Reflection spectrum lines and (b) transmission spectrum lines for TM/TE mode of metal array with and without Si substrate when the parameters of the array are $P_x=20\ \mu\text{m}, a_x=10\ \mu\text{m}, P_y=300\ \mu\text{m}$ and $a_y=250\ \mu\text{m}$

($a_y=250\ \mu\text{m}, h=20\ \text{nm}$)。具体制备过程如下: 首先利用设计的金属阵列结构图案制备了光刻掩模板, 然后在 $500\ \mu\text{m}$ 厚的高阻硅抛光面上涂上一层均匀的光刻胶, 将光刻胶烘干后放入光刻机内, 在其上放置样品掩模板进行曝光、显影、定影处理, 留下金属阵列结构的图案, 将处理后带有光刻胶的硅片放置在蒸镀机中蒸镀一层 $20\ \text{nm}$ 厚的铜膜, 蒸镀后带有图案的硅片经过显影和定影处理后剥离掉阵列图形空隙处的铜膜, 制备成实验样品。图 4 为 $P_x=10\ \mu\text{m}, a_x=5\ \mu\text{m}$ 的金属阵列结构的实验样品的光学显微图及局部放大图。

3.2 实验结果

采用 Bruker 公司的 VERTEx80v 型傅里叶变换光谱仪测量样品的透射比谱和反射比谱, 测量环境为粗真空, 环境压强为 $2\sim 3\ \text{hPa}$, 光谱测量所用激光源为光谱仪内置的 globar 光源, 分束片为 Mylar 膜, 厚度为 $50\ \mu\text{m}$, 探测器采用光谱仪内的热探测器, 测量的波数范围为 $50\sim 680\ \text{cm}^{-1}$, 对应频率为 $1.5\sim 20.4\ \text{THz}$, 测量的波数分辨率为 $2\ \text{cm}^{-1}$ 。

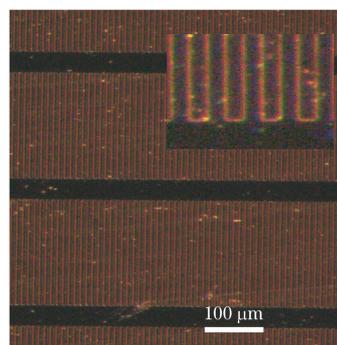


图 4 $P_x=10\ \mu\text{m}, a_x=5\ \mu\text{m}$ 金属阵列结构的 光学显微图及局部放大图

Fig. 4 Optical micrograph and partial enlarged detail of the metal array with $P_x=10\ \mu\text{m}$ and $a_x=5\ \mu\text{m}$

实验中, 样品放置于光谱仪的一个透反射架上, 太赫兹辐射以 11° 的入射角到达样品, 透反射架采用特殊的光路结构设计, 可以同时收集透过样品和被样品反射的太赫兹信号, 并以电机驱动的方式选择透射光和反射光, 然后将透射光和反射光送入探测器进行信号探测、采集和傅里叶变换, 最后获得样品的透射谱线和反射谱线。通过与背景进行对比, 可以获得相应的比谱。测量光路如图 5 所示。

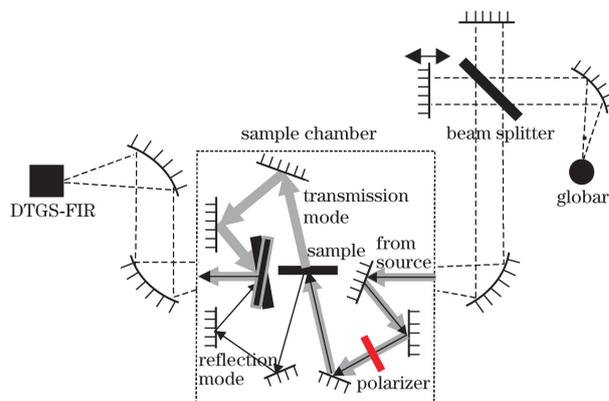


图 5 透射谱线及反射谱线的测量光路示意图

Fig. 5 Schematic of light path of measuring transmission spectrum lines and reflection spectrum lines

图 6 为 $P_x=10\ \mu\text{m}, a_x=5\ \mu\text{m}$ 时, 测量得到的金属阵列结构的反射谱和透射谱; 图 7(a)、(b) 分别为金属阵列结构 ($P_x=20\ \mu\text{m}, a_x=10\ \mu\text{m}$) 的反射及透射实验测量谱线。

3.3 结果分析与讨论

由图 6 可知, 在 $1.5\sim 8\ \text{THz}$ 宽谱范围内, 根据金属阵列结构 $P_x=10\ \mu\text{m}, a_x=5\ \mu\text{m}$ 的反射 [图 6(a)] 及透射 [图 6(b)] 谱线都能将 TM、TE 模式区分开来, 即: 两者具有良好的偏振特性。相较而言, 低频部分的偏振消光特性比高频部分的好, 随着频率增加, TE、TM 谱线逐渐靠近, 表明结构越趋近

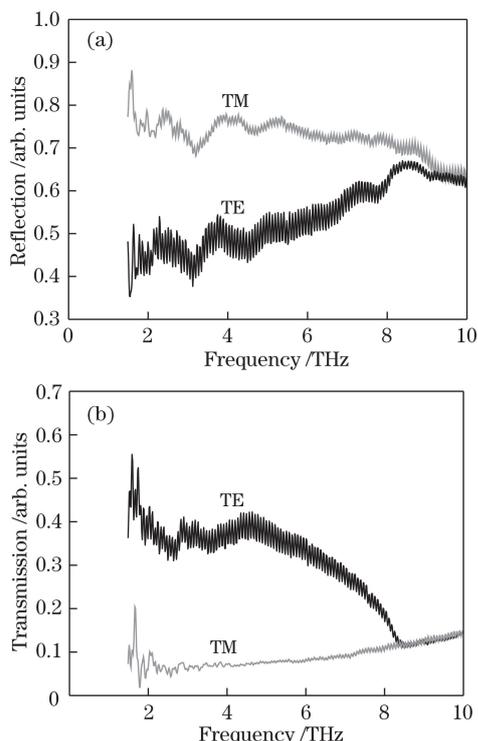


图6 金属阵列结构参数为 $P_x=10\ \mu\text{m}$ 、 $a_x=5\ \mu\text{m}$ 以及 Si 基底厚度为 $500\ \mu\text{m}$ 时测得的(a)反射谱线和(b)透射谱线

Fig. 6 Measured (a) reflection spectrum lines and (b) transmission spectrum lines when the parameters of metal array are $P_x=10\ \mu\text{m}$, $a_x=5\ \mu\text{m}$, and the thickness of Si substrate is $500\ \mu\text{m}$

于亚波长,偏振特性越好。该实验结果与图 2(a)、(b)的理论计算结果趋势一致,但实验结果中 TM、TE 模式谱线趋近的趋势在低频部分的平移更加明显。一方面, $500\ \mu\text{m}$ 厚 Si 基底的加入会使谱线向低频部分移动,这在图 2(a)、(b)中的理论计算中已被证实;相较于单一的金属阵列结构[图 2(a)、(b)中的黑色曲线],基底的加入[图 2(a)、(b)中的灰色曲线]促使 TM/TE 曲线更加趋近。另一方面,由于 Si 损耗的存在以及检测过程中空气未抽干而导致的对入射波的吸收使透射谱线降低,因结构不平整而导致的散射使反射增加,从而使 TM、TE 谱线更加趋近,表现为图 6(a)、(b)中反射/透射曲线整体上升/下降,而 TE 在上升/下降的下/上边缘较 TM 的影响更为明显,整体效果使得 TM、TE 更加趋近。与图 6 相比,图 7 中的偏振范围向低频方向平移,从实验上证实了理论模拟的结果,即 P_x 越大,波长与 P_x 的比越小,偏振效果越好。

4 结 论

利用 CST 对二维金属光栅阵列结构在 $0.1\sim$

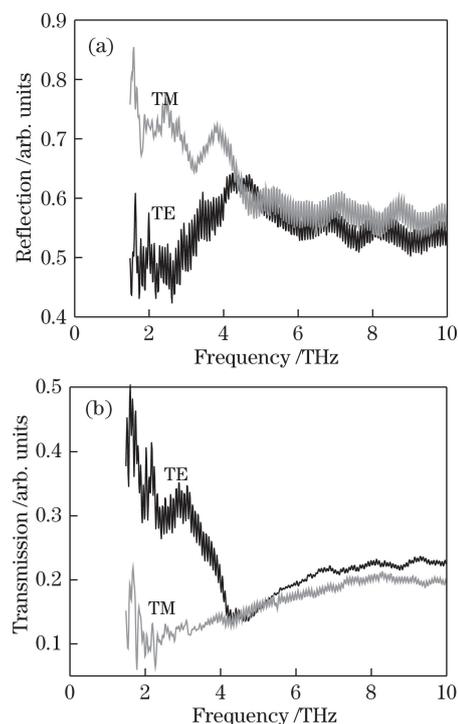


图7 金属阵列结构参数为 $P_x=20\ \mu\text{m}$ 、 $a_x=10\ \mu\text{m}$ 以及 Si 基底厚度为 $500\ \mu\text{m}$ 时测得的(a)反射谱线和(b)透射谱线

Fig. 7 Measured (a) reflection spectrum lines and (b) transmission spectrum lines when the parameters of metal array are $P_x=20\ \mu\text{m}$, $a_x=10\ \mu\text{m}$, and the thickness of Si substrate is $500\ \mu\text{m}$

10 THz波段的反射、透射偏振特性进行了数值分析,并在 $500\ \mu\text{m}$ 厚的高阻硅衬底上制备了厚度为 $20\ \text{nm}$ 的不同结构周期的铜金属光栅阵列。傅里叶变换光谱仪测试结果表明,光栅阵列结构在宽谱范围内的透射光和反射光都具有良好的偏振特性,且其偏振特性和结构周期有关。该研究对太赫兹偏振器的进一步研究提供了参考,对高消光比宽谱太赫兹偏振器的设计和应用具有一定的促进作用。

参 考 文 献

- [1] Liu S L, Bo B X, Zou Y X, *et al.* Ultrawide-band terahertz beam-splitter based on ultrathin metallic films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1131002. 刘松林, 薄报学, 邹仪宣, 等. 超薄金属薄膜结构的超宽频太赫兹分束研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1131002.
- [2] Jiang C Y, Cai R, Liu J S, *et al.* Measurements of terahertz wavelength using metallic mesh Fabry-Perot interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112009. 蒋呈阅, 蔡瑞, 刘劲松, 等. 金属网栅法布里珀罗干涉仪测量太赫兹波波长[J]. *光学学报*, 2012, 32(11):

- 1112009.
- [3] Awartani O, Kudenov M W, O'Connor B T. Organic photovoltaic cells with controlled polarization sensitivity[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(9): 093306.
- [4] Cao N W, Liu W Q, Zhang Y J. Quantitative study of improvements of the imaging contrast and imaging range by the polarization technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(1): 61-66.
曹念文, 刘文清, 张玉钧. 偏振成像技术提高成像清晰度、成像距离的定量研究[J]. *物理学报*, 2000, 49(1): 61-66.
- [5] Li H S, Li B, Wang S R. Polarization performance in space ultraviolet remote sensing spectral instruments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0112006.
李寒霜, 李博, 王淑荣. 空间紫外遥感光谱仪器偏振特性研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0112006.
- [6] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [7] Carr G L, Martin M C, McKinney W R, *et al.* High-power terahertz radiation from relativistic electrons[J]. *Nature*, 2002, 420(6912): 153-156.
- [8] Li Z Y, Yao J Q, Xu D G, *et al.* High-power terahertz radiation from surface-emitted THz-wave parametric oscillator[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(5): 054207.
- [9] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 371-379.
- [10] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, *et al.* Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605-609.
- [11] Tu S, Zhang W T, Xiong X M, *et al.* Principal component analysis for transgenic cotton seeds based on terahertz time domain spectroscopy system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(4): 0430001.
涂闪, 张文涛, 熊显名, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的转基因棉花种子主成分特性分析[J]. *光子学报*, 2015, 44(4): 0430001.
- [12] Wang H, Zhao G Z. Terahertz spectroscopic inspection of several kinds of plastic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(7): 1185-1188.
王鹤, 赵国忠. 几种塑料的太赫兹光谱检测[J]. *光子学报*, 2010, 39(7): 1185-1188.
- [13] Melo A M, Kornberg M A, Kaufmann P, *et al.* Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(32): 6064-6069.
- [14] Yuan M H, Zhao D. A tunable terahertz bandpass filter with a slit aperture flanked by symmetrically distributed parallel grooves on both sides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(3): 0323003.
袁明辉, 赵堤. 一种双面周期开槽型可调太赫兹带通滤波器[J]. *光子学报*, 2014, 44(3): 0323003.
- [15] Lin C J, Li Y T, Hsieh C F, *et al.* Manipulating terahertz wave by a magnetically tunable liquid crystal phase grating[J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 2995-3001.
- [16] Doradla P, Alavi K, Joseph C S, *et al.* Terahertz polarization imaging for colon cancer detection[C]. *SPIE*, 2014, 8985: 89850K.
- [17] Hangyo M, Tani M, Nagashima T. Terahertz time-domain spectroscopy of solids: a review[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 26(12): 1661-1690.
- [18] Huang Z, Park H, Parrott E P J, *et al.* Robust thin-film wire-grid THz polarizer fabricated via a low-cost approach[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(1): 81-84.
- [19] Kaveev A K, Kropotov G I, Tsygankova E V, *et al.* Terahertz polarization conversion with quartz waveplate sets[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): B60-B69.
- [20] Costley A E, Hursey K H, Neill G F, *et al.* Free-standing fine-wire grids: their manufacture, performance, and use at millimeter and submillimeter wavelengths[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, 67(7): 979-981.
- [21] Ren X P, Fan R H, Peng R W, *et al.* Nonperiodic metallic gratings transparent for broadband terahertz waves[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(4): 045111.
- [22] Suzuki T, Nagai M, Kishi Y. Extreme-sensitivity terahertz polarizer inspired by an anisotropic cut-through metamaterial[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 325-328.
- [23] Yang Y P, Cui B, Geng Z X, *et al.* Terahertz magnetic and electric Mie resonances of an all-dielectric one-dimensional grating[C]//40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. [S.l.]: IEEE, 2015: 928-936.
- [24] Zhang B H, Gong Y D. Achromatic terahertz quarter waveplate based on silicon grating[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14897-14902.
- [25] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, *et al.* Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [26] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, *et al.* A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 148-151.
- [27] Yang Y M, Huang R, Cong L Q, *et al.* Modulating the fundamental inductive-capacitive resonance in asymmetric double-split ring terahertz metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(12): 121114.

- [28] Karl N, Reichel K, Chen H T, *et al.* An electrically driven terahertz metamaterial diffractive modulator with more than 20 dB of dynamic range[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(9): 091115.
- [29] Zou T B, Hu F R, Xiao J, *et al.* Design of a polarization-insensitive and broadband terahertz absorber using metamaterials[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 178103.
邹涛波, 胡放荣, 肖靖, 等. 基于超材料的偏振不敏感太赫兹宽带吸波体设计[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 178103.
- [30] Kong H, Li G F, Ma G H, *et al.* Terahertz wave transmission in subwavelength metal stripe[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(8): 888-892.
孔辉, 李高芳, 马国宏, 等. 亚波长金属块阵列中太赫兹波的传输特性研究[J]. 光子学报, 2012, 41(8): 888-892.
- [31] Liu H Y. Research on terahertz polarization transmission characteristics of metal sub-wavelength slit array structure[J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(4): 34-36.
刘海英. 金属亚波长狭缝阵列结构的太赫兹偏振透射特性研究[J]. 光电技术应用, 2013, 28(4): 34-36.
- [32] Liu L M, Zhao G Z, Zhang G H, *et al.* Polarization characteristics of one-dimensional metallic wire-grating polarizer in terahertz frequency range[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0311001.
刘立明, 赵国忠, 张杲辉, 等. 太赫兹波段一维金属线栅的偏振特性研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0311001.
- [33] Lu X C, Han J G, Zhang W. Resonant terahertz reflection of periodic arrays of subwavelength metallic rectangles[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(12): 121103.