

## 利用介质超材料控制太赫兹波的振幅和相位

张学迁<sup>1</sup>, 张慧芳<sup>1</sup>, 田震<sup>1</sup>, 谷建强<sup>1</sup>, 欧阳春梅<sup>1</sup>, 路鑫超<sup>2</sup>, 韩家广<sup>1</sup>, 张伟力<sup>1</sup>

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室 天津大学太赫兹波研究中心, 天津 300072; 2. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 设计了基于介质高阻硅的超材料用于对太赫兹波的透射振幅和相位进行控制。这里组成超材料的基本结构单元为亚波长柱状硅, 相比于基于金属的超材料, 其损耗小, 效率也更高。太赫兹入射到不同尺寸和旋向的柱状硅时, 所透射的太赫兹波的振幅和相位也不同。通过设计不同空间位置处的柱状硅尺寸和旋向, 就可以实现任意的振幅和相位分布, 从而对透射波波前进行完全的控制。实验中, 利用这种硅质微结构设计了三种不同的奇异光栅, 其衍射级次和数目可任意控制。这种基于介质超材料的方法, 设计简单, 加工方便, 在制作太赫兹波段低损耗的功能器件方面有着广泛的应用前景。

**关键词:** 振幅和相位控制; 介质超材料; 太赫兹; 奇异光栅

**中图分类号:** O433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0425004

## Simultaneous control of terahertz amplitude and phase with dielectric metamaterials

Zhang Xueqian<sup>1</sup>, Zhang Huifang<sup>1</sup>, Tian Zhen<sup>1</sup>, Gu Jianqiang<sup>1</sup>, Ouyang Chunmei<sup>1</sup>, Lu Xinchao<sup>2</sup>, Han Jiaguang<sup>1</sup>, Zhang Weili<sup>1</sup>

(1. Center for Terahertz Waves, Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technology (Ministry of Education), School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Dielectric metamaterials based on high-impedance silicon were designed for controlling the amplitude and phase of the terahertz waves. Here, the basic unit cells of the dielectric metamaterials are subwavelength silicon pillars, they have lower loss and thus have higher efficiency compared with the metal based metamaterials. As different silicon pillars with different geometric parameters and orientation angles will have different transmission amplitude and phase when the terahertz wave passes through them, nearly arbitrary spatial amplitude and phase distributions can be achieved by designing the geometric parameters and orientation angles of the silicon pillars at different positions, which allows to fully control the shape of the transmitted terahertz wavefront. In experiment, three different meta-gratings were

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB339800); 国家自然科学基金(61427814, 61138001, 61205098, 61422509);

高等学校博士学科点专项科研基金(20110032120058)

作者简介: 张学迁(1988-), 男, 博士生, 主要从事太赫兹超材料方面的研究。Email: alearn1988@126.com

导师简介: 韩家广(1978-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事太赫兹科学与技术、光与物质相互作用和人工电磁微结构方面的研究。Email: jiaghan@tju.edu.cn

designed using the silicon based structures in which the diffractive orders and their numbers can be arbitrarily controlled. Such dielectric metamaterials are very easy to design and fabricate, making them very promising in developing low-loss terahertz functional devices.

**Key words:** amplitude and phase control; dielectric metamaterials; terahertz; meta-grating

## 0 引言

超材料(metamaterials)是一种由亚波长微结构单元阵列排布所组成的人工材料,在操控电磁波方面有着独特的本领,也因此吸引了研究人员的广泛关注。像组成物质的基本单元为原子一样,超材料的“原子”就是组成它的结构单元。因此,超材料的电磁性质主要来源于这些结构单元的特性,如形状、尺寸和排布方式等等。由于超材料的结构单元是可以随意设计的,所以其电磁响应也可设计,且几乎可以工作在任何波段。特别的,它可以用来实现许多自然界材料所不能实现的功能,例如负折射率<sup>[1]</sup>、隐身<sup>[2]</sup>、超级成像<sup>[3]</sup>、完美吸收体<sup>[4]</sup>和滤波<sup>[5]</sup>等。

超表面(metasurfaces)是近几年来被提出的概念<sup>[6]</sup>,它指的是界面处存在的一层薄薄的亚波长微结构(厚度小于工作波长)。其工作原理不同于超材料利用电磁波在其内部传播来对波进行控制,超表面是通过电磁波穿过它们时所产生的相位突变来控制其传播的。也就是说,当电磁波入射到特殊设计的超表面的时候,透射电磁波的初始相位分布主要由处在不同位置的微结构单元响应来决定。基于这一原理,就可以对透射的电磁波波振面进行调控,许多超薄的光学器件由此被接连地报道出来,包括异常偏折器<sup>[7]</sup>、透镜<sup>[8]</sup>、透镜阵列<sup>[9]</sup>和全息板<sup>[8,10]</sup>等具有广泛应用前景的器件。

目前,得益于金属光刻技术的日益成熟,制作超材料或超表面的材料也主要为金属。金属微结构的优点是电子可以在其中很容易地被外场激发,形成谐振,从而实现各种各样的电磁响应。虽然已取得了巨大的成功,但是金属中存在的欧姆损耗是当今限制超材料和超表面进一步实用化的巨大问题<sup>[11]</sup>。最近,介质超材料逐渐吸引了研究人员的目光。当把介质加工成微结构单元时,其米氏散射效应也可以提供谐振来操控电磁波<sup>[12]</sup>。且很多介质的电磁波吸收系数很小,因此比起金属材料,其对电磁波的损耗更小,有助于提高对电磁波的操控效率。

文中介绍了一种基于介质超材料的操控太赫兹波透射波振面的方法,其原理类似于超表面用不同结构控制出射电磁波初始相位,这里也将透射波的振幅信息也加入到了波振面的调控当中。事实上,如果要实现完全的波振面控制,对振幅的调控也同样重要,且将使超表面的功能更加丰富和完整<sup>[13]</sup>。与之前的基于金属的超表面相比,这种介质超材料的方法对电磁波调控的效率更高。为了证明能够同时进行振幅和相位的调控,设计了三种不同的奇异光栅,给出了对其衍射级次和数目进行控制的方法,实验结果和理论设计及模拟吻合得很好。

## 1 简介

与之前的关于透射体系超表面的工作原理一样,这里对振幅和相位的控制是针对于偏振方向与入射偏振正交的透射电磁波设计的。因为这个偏振的电磁波的相位调控可以覆盖整个 $360^\circ$ 范围,这也是实现任意相位分布的根本。而对于偏振方向与入射偏振相同的出射偏振,很难通过简单的结构来覆盖 $360^\circ$ 范围。国际上虽然也有关于控制其相位的工作,但是其设计原理复杂且加工难度大<sup>[14]</sup>。基于此,需要设计结构使其可把入射偏振进行转化,其中也就涉及到了偏振转换效率的问题。转换效率越高,则被有效操控的电磁波的能量就越大。这个高转换效率对于振幅调制也同样适用,高的转换效率意味着振幅可以在更大的范围内变化,这对于高效操控电磁波也同样重要。目前关于提高效率的方法,国际上采用“光栅+结构+光栅”的方法<sup>[15]</sup>,虽然效率可以在很大程度上提高,但是仍无法避免金属欧姆损耗带来的能量损失。所幸的是,介质超材料为解决这一问题提供了一个有效的手段。

## 2 设计原理

### 2.1 结构设计

这里采用的介质材料为高阻硅( $\epsilon=11.9$ ),其在太

赫兹波段的吸收系数几乎可以忽略。图 1(a)为设计的基于硅的微结构单元,可以看出它是一个硅的立柱,其宽度为  $a$ ,长度为  $b$ ,深度为  $h$ ,周期为  $P$ 。该立柱下面为均匀的硅片基底,它的正面为一倾斜的矩形,其长边与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ ,如图 1(b)所示。根据有效介质理论,在沿着该结构的一个对称轴方向(长边或短边方向)上,如果硅的尺寸越大的话,那么这个方向的有效折射率就越大;反之则越小。有效折射率大说明电磁波在其中传播的速度越慢,称此方向为慢轴;而对应的,与慢轴垂直的方向为快轴。

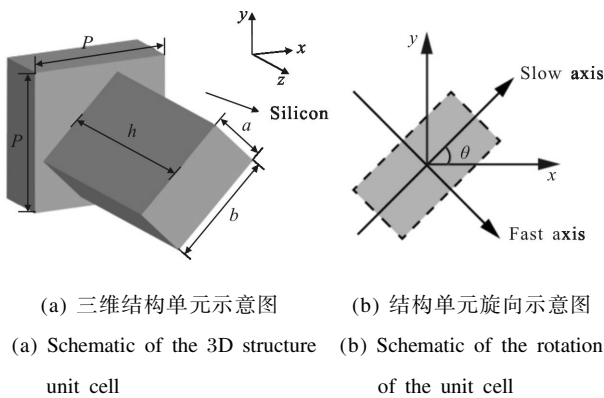


图 1 结构示意图

Fig.1 Structure diagram

### 2.2 振幅和相位控制机理

为了提高被操控电磁波的效率,需要一种高效的偏振转换方法。文中的设计是针对于线偏振入射的情况。通过恰当地设计硅立柱的长和宽,可以使沿快轴和慢轴方向偏振的太赫兹波通过该结构后其光程差在某一波长处正好相差半个波长,即相位差为  $180^\circ$ 。此时,微结构的功能就类似于一个半波片,可以将入射的线偏振光完全转化为另一线偏振光出射。特别的,当结构的旋转角度  $\theta=45^\circ$  的时候,可将入射的  $x$  偏振波近乎完全转换为  $y$  偏振光出射。

图 2(a)和(b)分别给出了用 CST Microwave Studio 软件模拟得到的当  $a=28 \mu\text{m}$ ,  $b=62 \mu\text{m}$ ,  $h=150 \mu\text{m}$ ,  $\theta=0^\circ$  时的透射谱的振幅和相位结果图。其中,  $t_{xy}=E_{xy}/E_i$  代表  $x$  偏振和  $y$  偏振入射的太赫兹波(沿两个对称轴方向),分别透过样品得到的透射系数。 $E_{xy}$  代表  $x$  偏振和  $y$  偏振入射的太赫兹波透过样品后的电场,  $E_i$  是参考电场,代表太赫兹波透过无结构的硅基底后的电场。可以看到,  $x$  和  $y$  偏振入射时,样品的透射振幅在  $1.25 \text{ THz}$  附近范围内大小相近,相位相差

$180^\circ$  左右,符合半波片的特性,且可以在较宽范围内保持很高的偏振转换效率(结构厚度  $h$  选取的依据)。

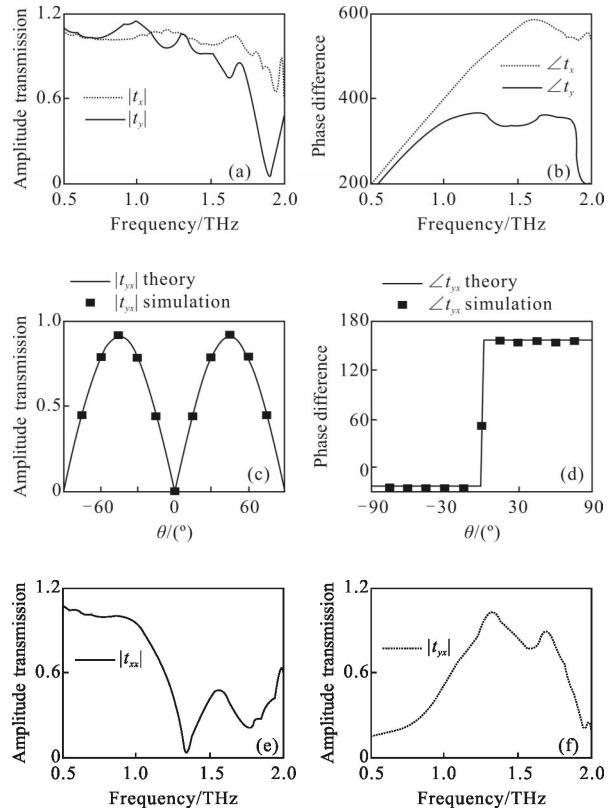


图 2 透射谱和振幅相位控制实例 ((a)、(b) 当  $\theta=0^\circ$  时,  $x$  和  $y$  偏振入射情况下分别得到的透射振幅谱和相位谱; (c)、(d)  $x$  偏振入射情况下,改变结构的旋转角度  $\theta$ , 出射的  $y$  偏振太赫兹波在  $1.25 \text{ THz}$  处的振幅和相位变化情况; (e)、(f) 当  $\theta=45^\circ$  时,  $x$  偏振入射情况下分别得到的  $x$  偏振和  $y$  偏振透射振幅谱)

Fig.2 An example structure of transmission spectra and the control of the amplitude and phase ((a), (b) Amplitude transmission and phase difference under  $x$ - and  $y$ -polarization incidences when  $\theta=0^\circ$ , respectively; (c), (d) The changes of the structure in amplitude and phase of the outgoing  $y$ -polarized wave at  $1.25 \text{ THz}$  as  $\theta$  varies under  $x$ -polarization incidence, respectively; (e), (f) Amplitude transmission of the  $x$ - and  $y$ -polarization waves under  $x$ -polarization incidence when  $\theta=45^\circ$ )

图 2(c)和(d)给出了根据图 2(a)和(b)中的结果计算得到的当结构旋转角度  $\theta$  变化时,保持入射偏振为  $x$  方向不变,透射的  $y$  偏振太赫兹波在  $1.25 \text{ THz}$  处的振幅和相位变化结果。该计算可通过一个简单的矩阵旋转操作得到:

$$\begin{bmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{bmatrix} = M^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} t_x & 0 \\ 0 & t_y \end{bmatrix} M(\theta) \quad (1)$$

式中： $M(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$  代表结构单元的旋转操作；

$t_{ij}$  代表  $j$  偏振入射时得到的  $i$  偏振波的透射系数， $i, j \in \{x, y\}$ 。根据公式(1)就可得到图 2(c)和(d)中的曲线结果。可以看到，透过的  $y$  偏振的振幅变化正比于  $|\sin(2\theta)|$ ，当  $\theta = \pm 45^\circ$  时，振幅达到最大，约 0.91 (1.34 THz 处振幅为 1)，远高于单层金属结构的转换效率，这归功于基于半波片的原理设计。而相位变化很有意思，当角度为正或为负的时候，其大小基本不变，而当角度从正变到负的时候，其角度突然变化了  $180^\circ$ 。为了印证这一计算，通过在模拟中设置单元的旋转角度 ( $0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 75^\circ$ )，也得到了透射的  $y$  偏振太赫兹波在 1.25 THz 处的信息，如图 2(c)和(d)中的方块所示，可以看到，它们和计算结果吻合得很好。为了更加清晰地显示此设计结构的偏振转换本领，图 2(e)和(f)给出了模拟得到的当上述结构在  $\theta = 45^\circ$  时(对应转换效率最大的角度)，在  $x$  偏振波入射的情况下，透射的  $x$  偏振波和  $y$  偏振波的透射振幅谱线  $t_{xx}$  与  $t_{yx}$ 。可以看到，在很宽的频率范围内， $x$  偏振波被很大程度上转换成了  $y$  偏振波，在 1.31 THz 处效率最高，达 100%，非常类似半波片的性能。

这样就找到了一种平滑的控制透射太赫兹波振幅的方法，即通过旋转单元的角度。这种方法的一大优点是，在不改变角度  $\theta$  的符号的情况下，改变角度的大小是不会影响相位的。对于相位的控制，是通过设计不同的结构单元来实现的。根据模拟设计，4 个不同的结构被选取了出来，它们的厚度  $h$  相同，均为  $150 \mu\text{m}$ ，但是宽度  $a$  和长度  $b$  各不相同，分别为  $(a, b) \in [(40 \mu\text{m}, 80 \mu\text{m}), (34 \mu\text{m}, 79.5 \mu\text{m}), (27 \mu\text{m}, 80.5 \mu\text{m}), (28 \mu\text{m}, 62 \mu\text{m})]$ 。这 4 个结构的特点是相邻两个结构单元之间透射相位差为约  $45^\circ$ ，且偏振转换的本领类似。再结合改变旋转角度  $\theta$  的符号时，相位会突变  $180^\circ$  的特性，就可以用这 4 种参数的结构来使其相位覆盖  $360^\circ$  的范围。

### 2.3 奇异光栅设计

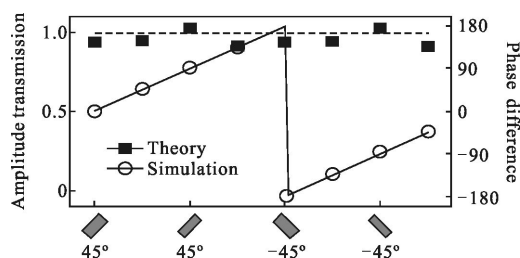
为了证明利用这种基于介质硅超材料来进行振幅和相位调控的本领，设计了 3 种不同的奇异光栅来分别控制透射的太赫兹波的衍射级次和数目。传

统的光栅一般是由大量的等间距狭缝或凹槽组成的，虽然光栅也分为振幅型光栅和相位型光栅，但是目前还很难实现任意的振幅和相位同时分布，因此其衍射级次和数目也很难实现同时调控。而超材料的出现为解决这一难题提供了很好的解决办法。其结构单元的亚波长特性使得它可以在很小的尺度范围内实现对波振幅和相位的操控，以此便可实现任意的振幅和相位分布。这里，将由超材料微结构单元组成的光栅称为奇异光栅。

为了实现这一目的，太赫兹透过一个界面，其透射系数分布需满足如下公式：

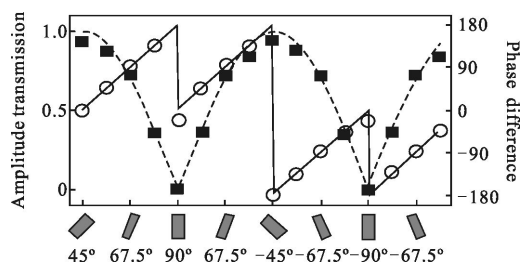
$$t_x = \sum_n A_n \exp(-i2n\pi x/d) = A(x) \exp[i\Phi(x)] \quad (2)$$

式中： $n$  代表衍射级次； $d$  代表奇异光栅的周期； $A(x)$  和  $\Phi(x)$  分别代表透射波的振幅和相位的分布。图 3(a)~(c) 分别给出了利用公式(2)计算得到的，只有一个第 1 衍射级，只有第 1 和第 3 两个衍射级和只有第 1, 2, 3 三个衍射级时(这里，每个衍射级的振幅都被设置成了一样的)时，它们对应的一个最小周期内的振幅(虚线，左侧坐标轴)和相位(实线，右侧坐标轴)分布情况。可以看到，当只有一个衍射级时，其振幅分布是均匀的，且相位分布是线性变化的。而当有两个和两个以上的衍射级时，由于叠加的缘故，振幅和相位分布变得不再均匀了。



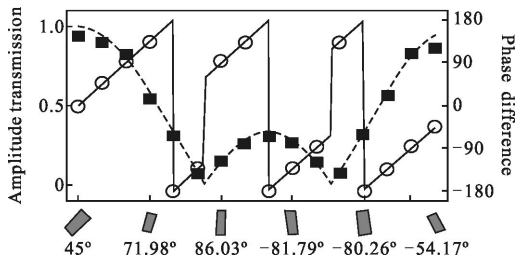
(a) 只有第 1 衍射级时

(a) Only the 1st diffraction order



(b) 只有第 1 和 3 两个衍射级时

(b) Only the 1st and 3rd diffraction orders



(c) 只有第 1,2,3 三个衍射级时

(c) Only the 1st, 2nd and 3rd diffraction orders

图 3 奇异光栅透射系数分布

Fig.3 Distributions of the transmission coefficient of the meta-gratings respectively

可想而知,如果能实现如图 3(a)~(c)所示的振幅和相位分布,便可以得到它们对应的奇异光栅衍射性能。为了得到这样的分布,文中利用选取得到的 4 个结构单元,并且对其进行了等间距,离散型的排布,如每个图横坐标下面的结构示意图所示。图中的方块和空心圆点分别代表这些结构本身对应的透射振幅和相位信息(1.25 THz 处)。排布的方法是,首先通过相位值的大小在 4 个结构单元中选取满足该值的结构单元,再依照该相位值对应的振幅值大小,利用  $|\sin(2\theta)|$  的关系确定结构单元的旋转角度即可,对于相位值在  $-180^\circ \sim 0^\circ$  的情况,可将  $0^\circ \sim 180^\circ$  对应的结构单元的角度  $\theta$  置为负值。可以看到,通过这样的排布和旋转,模拟得到的透射系数分布和计算得到的分布可以吻合地很好,各个结构单元的旋转角度大小见图 3(a)~(c)的最底层。在排布过程中,这三种奇异光栅中结构单元的间距都为  $100 \mu\text{m}$ ,因此它们对应的光栅周期  $d$  大小分别为  $800 \mu\text{m}$ 、 $1600 \mu\text{m}$  和  $1600 \mu\text{m}$ 。

### 3 模拟和实验结果

为了验证设计的有效性,分别对这三个设计进行了模拟分析和实验表征。模拟中,用  $x$  偏振入射,来探测  $y$  偏振透射波的透射情况。图 4(d),(f)和(h)分别为模拟得到的不同角度的透射结果,其中横坐标为角度,纵坐标为频率,颜色值代表透射率(振幅的平方,代表透射能量比例)。可以看到,该设计具有一个宽带的特性,不同的频率透射的角度也不同,衍射级次的分布也和设计的非常吻合,有效的工作范围可达  $0.75 \sim 1.5 \text{ THz}$ 。虽然在偏低频部分,有一些透

射的太赫兹波也向负向的角度偏转了,这是由于在低频范围,结构的振幅和相位分布与理论设计的差别变大,普通的光栅衍射效应占据了主导。由于总的入射能量不变,随着级次的增加,每个级次所分配到的能量也会随之减小,所以对应的效率也变低了,如对应模拟结果图右侧的颜色值指示图所示。图中的虚线是按照广义的斯涅尔定律计算得到的结果<sup>[6-7,13]</sup>,可以看到模拟得到的每个衍射级次的偏转角度和理论非常的一致。在计算过程中,对于不同的衍射级次,其相位梯度应为  $d\Phi_n/dx=2n\pi/d$ 。

实验上,为了加工出设计的样品,采用了深度离子束刻蚀(Deep RIE)的方法。加工出来的三个样品的正面部分照片如图 4(a)~(c)所示,分别对应三个

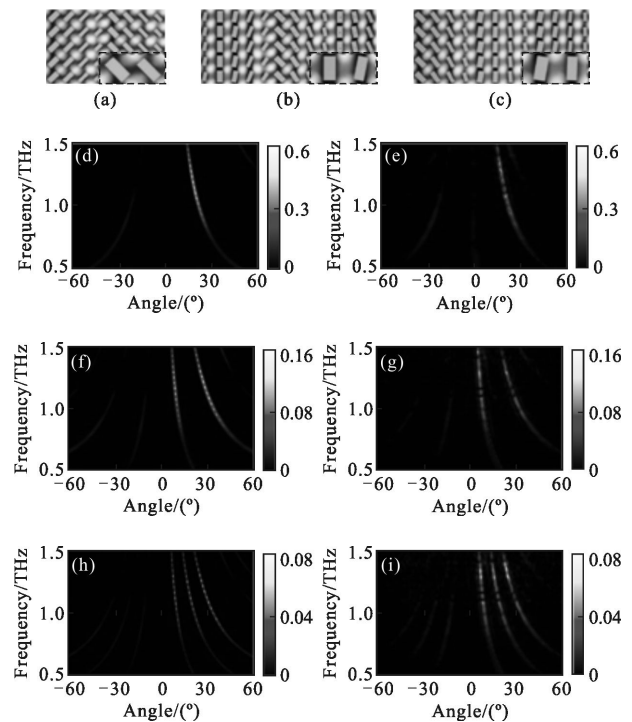


图 4 样品照片及模拟和实验结果 ((a)~(c) 三个样品实物正面部分照片,其中右下角的插图有部分结构的放大照片; (d),(f),(h) 三个样品对应的模拟结果; (e),(g),(i) 三个样品对应的实验结果)

Fig.4 Sample photos, simulated and experimental results

((a)~(c) photos of parts of the three fabricated samples on the front side, the insets at the right-bottom corners are the enlarged photos of two selected structures; (d), (f), (h) simulated results of the three samples; (e), (g), (i) experimental results of the three samples)

奇异光栅的设计。为了测量这三个样品的透射情况,我们自主搭建了一套光纤化的角度分辨的太赫兹时域频谱系统,可以在很大角度范围内测量样品在各个角度上的透射信息。入射的太赫兹波偏振方向为 $x$ 方向,从样品基底的那侧照射到样品上,接着,在各个角度上对透射的 $y$ 偏振太赫兹波进行了测量,每间隔 $1^\circ$ 测量一个太赫兹时域信号,最后再进行合成。实验中,为了使入射和透射的偏振更加纯粹,分别在样品前后加上了金属线栅偏振片,用以分别筛选出 $x$ 和 $y$ 偏振分量。图4(e),(g)和(f)分别为实验得到的这三个样品的透射结果图,可以看到其结果和模拟结果吻合的很好,证明了这种方法的可行性。虽然在衍射角度上和广义斯涅尔定律的计算有些出入,这是由于实验中样品角度摆放的误差所导致的。另一点与模拟稍有不同的就是衍射效率,实验得到的效率和模拟相比略小,这是由于样品加工时的误差导致的。

#### 4 结论

文中介绍了一种利用基于介质硅的超材料,用于控制透射太赫兹波的振幅和相位。这里硅微结构单元为立柱,振幅和相位的变化是通过改变结构的尺寸和旋向实现的。每个结构的设计原理,都根据半波片的原理,使两个对称轴方向的相位相差 $180^\circ$ ,以此来得到很高的偏振转换效率,其效率比用金属结构的转换效率更高,最高可接近100%,且具有宽谱有效特性。为了验证结构的相位和振幅控制能力,选取了4种不同几何参数的结构。通过控制它们的旋转方向,设计了三种奇异光栅,可以实现对透射衍射级的控制,实验结果和数值模拟及理论预测吻合的很好。这种介质超材料的方法,设计简单,加工方便,对电磁波的操控效率高,损耗小,为实现太赫兹波段的空间波调制器件提供了一个有效且实用的方法。

#### 参考文献:

[1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292: 77-79.  
 [2] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial

electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314: 977-980.

- [3] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. *Science*, 2005, 308: 534-537.  
 [4] Gong Q, Liu X, Duan Z, et al. Study on absorbing properties and mechanism of cross-shaped metamaterial absorber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1528-1532. (in Chinese)  
 [5] Cao X, Yao J, Che Y. Transmission characteristic of asymmetric double-split ring resonator in terahertz wavelength [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3854-3858.  
 [6] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334: 333-337.  
 [7] Zhang X, Tian Z, Yue W, et al. Broadband terahertz wave deflection based on c-shape complex metamaterials with phase discontinuities [J]. *Adv Mater*, 2013, 25: 4567-4572.  
 [8] Hu D, Wang X, Feng S, et al. Ultrathin terahertz planar elements [J]. *Adv Opt Mater*, 2013, 1: 186-191.  
 [9] Wang Q, Zhang X, Xu Y, et al. A broadband metasurface-based terahertz flat-lens array [J]. *Adv Opt Mater*, 2015, 3: 779-785.  
 [10] Huang L, Chen X, Mühlender H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nature Commun*, 2013, 4: 2808.  
 [11] Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials[J]. *Nature Photon*, 2011, 5(9): 523-530.  
 [12] Yang Y, Kravchenko I I, Briggs D P, et al. All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency [J]. *Nature Commun*, 2014, 5: 5753.  
 [13] Liu L, Zhang X, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude [J]. *Adv Mater*, 2014, 26: 5031-5036.  
 [14] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surface: tailoring wave front with reflectionless sheets [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 197401.  
 [15] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction [J]. *Science*, 2013, 340: 1304-1307.