

文章编号: 2095-4980(2015)01-0001-13

太赫兹超材料和超表面器件的研发与应用

王波, 张岩*

(首都师范大学 物理系, 北京 100048)

摘要: 太赫兹光电子学的兴起推动了太赫兹波产生、传输和探测 3 方面理论和器件的快速发展。通过调控亚波长金属结构与太赫兹波相互作用的特异光学响应, 太赫兹超材料和超表面器件已在太赫兹光束整形、导波和调制方面显示了巨大的潜力和优势, 并可能推动太赫兹光源和探测器的发展。进一步发展和丰富太赫兹超材料和超表面器件, 也将对太赫兹波在传感、通信和雷达等应用方面产生有益影响。本文综述了首都师范大学超材料与器件课题组近年来在太赫兹波段开展的基于超材料和超表面材料的光谱调制器件、光场调制衍射光学元件和主动光学元件的工作, 介绍了超材料与器件的基本物理理论以及相应的实验研究成果, 希望能够推动超材料与超表面太赫兹调制器件的发展与应用。

关键词: 太赫兹; 超材料; 超表面; 主动器件

中图分类号: TN29; O439

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0001

Design and applications of THz metamaterials and metasurfaces

WANG Bo, ZHANG Yan*

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Terahertz (THz) optoelectronics has promoted the development of the THz generation, transparent control, and detection methods, and hastened many devices in the past decades. Especially, THz metamaterials and metasurfaces will exhibit extraordinary electromagnetic response when the subwavelength scale metal structure is excited by the THz illumination. Therefore, they have been applied to the devices such as wave beam shaper, waveguide, and modulator etc. The THz metamaterials and metasurfaces also show the potential applications in the research fields such as sensors, communications, and radars. In this paper, the works about the spectrum and wavefront modulation with THz metadevices carried out in our group are summarized. The basic theory and corresponding experiment results for different devices are introduced. It is expected these works can pave the avenue of the application of the THz metadevices.

Key words: terahertz; metamaterials; metasurface; active devices

太赫兹波(terahertz wave)通常是指位于0.1 THz~10 THz之间的电磁波谱, 兼具了电子学和光子学的优势, 近年来吸引了广泛的研究关注。太赫兹波的单光子能量低(1 THz~300 μm ~4.13 meV~33.3 cm^{-1}), 且对非极性分子组成的物质如化纤、棉布等具有很好的穿透性, 大多数生物大分子的特征吸收峰都落在太赫兹波段, 因而在安检、物质鉴别、地质探测和无线通信等领域有重要的潜在应用。

太赫兹波在通信、安检等方面的应用, 迫切需要进行太赫兹光束的全波调制, 即调制太赫兹波在传输过程中的振幅、相位、偏振态、频谱宽度等。超材料与超表面器件利用人工制备的亚波长结构实现对光场的全矢量调控, 近年来逐步成为一个重要的研究热点。本文首先介绍了本课题组在太赫兹波段开展的超材料与超表面器件研究中所使用的设计方法、器件制作及自主实验表征方面积累的经验和发展, 随后从光谱调制(光学增透、高品质因子)

收稿日期: 2014-10-11; 修回日期: 2014-12-01

基金项目: 国家 973 课题资助项目(2013CBA01702); 国家自然科学基金资助项目(11204188;61205097;91233202;11374216;11174211); 北京市自然科学基金资助项目(1132011); 教育部新世纪优秀人才项目(NCET-12-0607); 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(CAEP THZ201306); 北京市教委科学研究发展项目资助项目

*通信作者: 张岩 email: yzhang@mail.cnu.edu.cn

超材料的设计, 光场波前调制(聚焦和成像、计算全息等)超表面器件的开发和应用及光泵浦半导体主动光学元件制备3个方面介绍相关的研究成果。

1 理论和实验基础

太赫兹超材料和超表面器件结合了可见光表面等离子激元光学和微波段经典天线设计理论, 利用亚波长金属结构对太赫兹波的特异响应以实现不同的调制功能。太赫兹波段亚波长金属结构中表面波的激发理论已有文献综述^[1]。本节将侧重于本课题组在太赫兹超材料和器件实验研究中对器件材料的选择、加工工艺、实验表征系统、数值模拟设计和验证等方面的进展与经验。

1.1 太赫兹波段材料的基本性质

在太赫兹超材料和超表面器件的实验研究和设计中, 需综合考虑器件的工作频段和功能特性、制作工艺的复杂度、成本与表征系统的限制等, 以选用合适的材料。常见备选材料包括金属材料、半导体材料(高阻硅、砷化镓和石墨烯等)、玻璃(蓝宝石、石英)、超导体薄膜以及高分子聚合物材料(聚四氟乙烯、聚酰亚胺类柔性材料)等。

在太赫兹波段, 金属材料可视作完美电导体, 即太赫兹波在金属表面的趋肤深度接近于 0, 即被完全反射而无吸收损耗^[2]。在制作金属膜较厚(与波长可比拟)的自支撑器件时, 为节约成本, 可使用铜、铝等常见金属代替金、银等贵金属; 而在金属膜较薄时(100 nm 左右), 为避免长时间存放在空气中被氧化破坏掉, 一般应优先选择抗氧化性较好的金进行制作。

高阻硅、玻璃等电介质则常被选做基底材料, 这是因为其对太赫兹波几乎没有吸收损耗, 同时其较高的折射率($n_{\text{Si}} \approx 3.42, n_{\text{glass}} \approx 2.1$)可以缩小超材料的单元大小以得到相同的电偶极共振频率。石英玻璃又分熔融石英和石英晶体 2 类。石英晶体在太赫兹波段有微弱的双折射效应, 可用于设计制作波片类器件^[3], 熔融石英则是各向同性的。低阻硅由于其高掺杂离子浓度而对太赫兹波具有很强的吸收损耗, 一般不应用在透射式的器件设计中。但低阻硅在某些反射式器件应用中也可被选做基底材料^[4]。

1.2 样品的加工制作

本课题组主要使用高阻硅作为支撑基底制备亚波长金属超材料器件, 这可以利用常规的硅基半导体工艺和光刻方法进行加工。此外还摸索了利用三维激光直写工艺制作亚波长结构样品的方法, 形成了模板制作、金属镀膜、图形转移、离子束刻蚀的整套工艺, 不仅可实现一维与二维金属结构在硅基底和玻璃基底上的制备, 并且在光波导端面 and 侧面器件、三维光子晶体和自定义复杂三维空间曲面与结构等方面具有简便快捷的优势。

1.3 实验表征系统

采用基于飞秒激光器的太赫兹时域光谱系统测量器件的频谱响应, 利用自主研发的太赫兹焦平面成像系统测量器件的近场和远场光场分布。实验室使用飞秒激光放大器(中心波长 800 nm, 重复频率 1 kHz, 脉宽 50 fs, 平均功率 800 mW)作为激励源, 使用<110>晶向的碲化锌(ZnTe)晶体产生和探测太赫兹波, 有效频谱宽度为 0.2 THz~2.6 THz, 频谱分辨率高于 67 GHz。

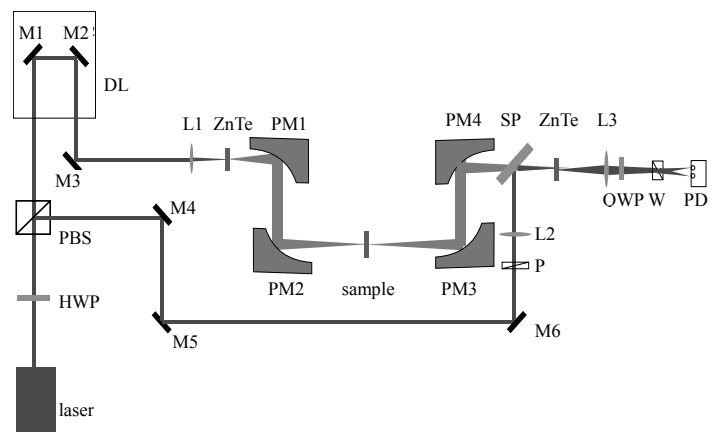


Fig.1 THz time domain spectroscopy system for transparent samples testing
图 1 典型太赫兹时域光谱系统, 适用于样品的透射式测量

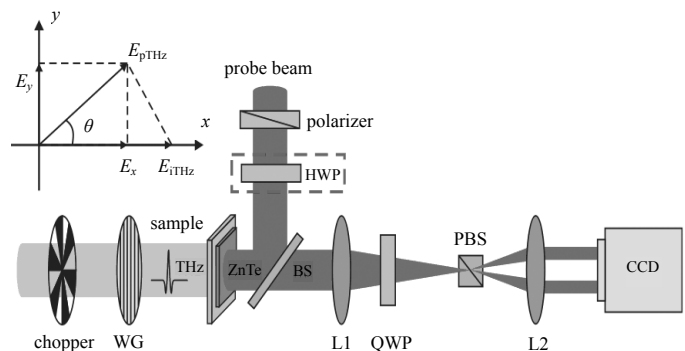


Fig.2 Part of terahertz focal plane imaging system^[11]. The half wave plate (HWP) is used for recording varied polarization state.
图 2 太赫兹焦平面成像系统^[11]的电光探测局部, 此系统在探测光一路放置二分之一波片(HWP)以检测不同的偏振态

图 1 给出了本课题组使用的太赫兹时域光谱系统示意图。该系统适用于分析样品在线偏振太赫兹光束正入射下的垂直反射与透射特性。反射式时域光谱系统常用于表征透过率近乎为 0 的样品,如金属膜、高损耗电介质(极性分子液体^[5-6]、低阻硅)及以其作为基底的样品。透射式时域光谱系统则多用于测量无损耗或低损耗的样品以保证信噪比。

太赫兹焦平面成像系统可大致看作是将时域光谱系统中的差分探测器由光电二极管换为高性能的面成像阵列,并适当扩大探测光束面积至与器件有效面积相当的一种改进,应用于测量由阵列非周期结构组成的衍射光学元件的光场复振幅和偏振态分布。图 2 给出了该系统的电光探测部分,具有较好的扩展性,经适当改装,可进一步用于光泵浦成像、斜入射、左旋和右旋圆偏振、高阶衍射级次、纵向电场分量以及表面波的测量^[7-10]。

1.4 数值模拟验证与设计方法

亚波长尺度器件的近场光学性质通常需要使用三维矢量全波数值模拟方法进行计算。常见的有矩量法、时域有限差分方法、有限元、边界元和严格耦合波展开等多种方法。此外对于某些特定形状(如球形、圆柱)的介质和金属的散射还可以使用 Mie 理论进行解析求解。

本课题组主要采用时域有限差分方法和有限元 2 种方法,结合 2 种方法的优势可以实现对具体问题快速有效的求解。

对于器件的远场光学性质,则可以采用 Fresnel 衍射、瑞利-索莫菲衍射理论或格林函数方法计算太赫兹波在自由空间中的传输。而实现特定的波前调制功能,则需要使用衍射光学元件的设计方法如全息法、相位恢复算法、全局优化算法等。

2 太赫兹超材料对光谱的调制

太赫兹超材料由亚波长金属微结构阵列组成,可以通过调节基底材料折射率、金属膜厚、微结构形状和周期等参数对超材料中电磁共振模式进行调制,不同偏振和入射角的太赫兹光束可表现出相同或相异的光谱特性。本节首先介绍厚金属膜亚波长孔结构中由腔模参与而导致的增透特性,继而介绍薄金属膜闭合缝结构的对称破缺对共振模式幅度和阶次的影响,最后介绍在薄金属膜闭合和劈裂金属环结构中电共振与磁共振模式的激发与耦合以实现高品质因子。

2.1 厚金属膜亚波长孔阵列的增透特性

Ebesen 等^[12]发现了可见光波段亚波长金属结构的场增透特性,即在某些波长范围内观测到大于几何光学预言的透过率(开孔面积对总面积的归一化比例),这揭示了亚波长金属结构特异的光学性质。

本课题组通过设计、制作与表征无基底自支撑的金属亚波长矩孔阵列,于 2008 年开展了此方面的研究^[13]。

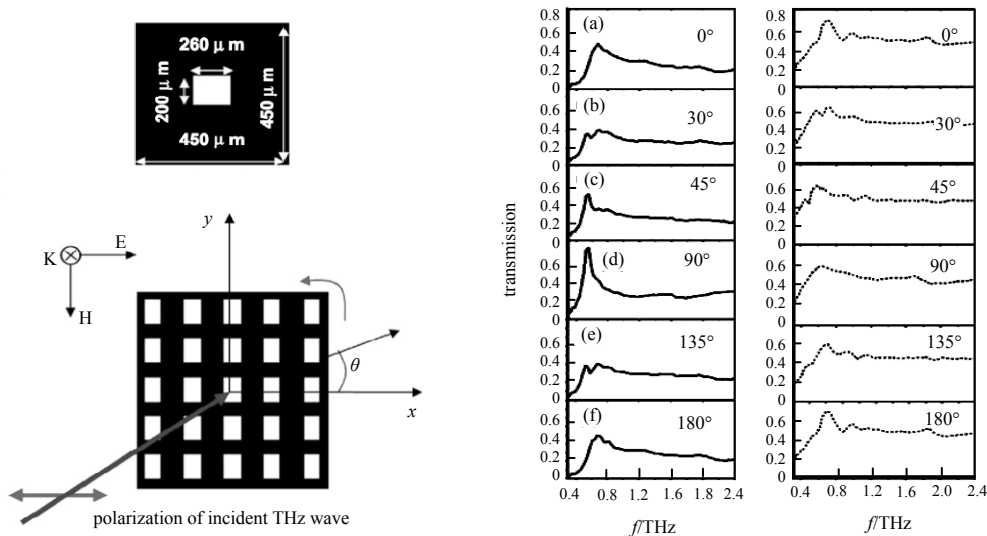


Fig.3 Structure and light illumination of metal hole arrays(left). Measured(solid lines) and simulation results(dotted lines) under different polarization angles(right).

图 3 左侧为结构和入射光束示意图,右侧为在不同偏转角度下的测量结果(实线)和模拟结果(虚线)

在厚度为 $150\ \mu\text{m}$ 的金属铜膜上, 利用光刻工艺制作了周期为 $450\ \mu\text{m}$, 宽度为 $200\ \mu\text{m} \times 260\ \mu\text{m}$ 的矩孔周期结构, 测量了其在正入射情形下共振模式随线偏振旋转角度表现出的峰位和透过率变化, 如图 3 所示。这种变化可以定性解释为线偏振可以分解为沿矩孔宽度方向的正交分量的线性迭加。每个正交分量对应于接近而略有差距的缝宽, 故而在光谱上观测到 2 个相邻的共振峰位。随着线偏振光角度的变化, 2 个正交分量的相对比值也随之改变, 故而光谱上 2 个共振峰位的透过强度也发生改变。

所用金属膜厚为 $150\ \mu\text{m}$, 已与入射太赫兹波长可比拟, 从而在金属缝内观测到上下界面之间的波导共振模式。其与周期结构支持的表面波模式共同作用, 从而实现了某些频率的场增强特性。

2.2 闭合金属缝结构对光谱的调制

光学意义上的薄金属膜一般指其厚度远小于 $1/100$ 个波长。在此类薄膜上, 闭合的金属亚波长缝结构将不再支持缝内厚度方向上的波导模式, 结构中电偶极共振模式将占主导。

通过制作 H 型金属缝结构, 并在保持周长不变的情形下, 调节结构的对称破缺度, 观察到了 H 环结构中的电偶极和高阶电共振模式^[14]。偶数阶($m=2$)电共振模式在对称结构中是暗模式, 无法被有效激发, 而只有在结构发生对称破缺时才能被激发。此外通过对不同形状的闭合金属缝结构进行表征^[15], 可发现在上下基底材质相同时, 只要周长相等, 那么其($m=1$)共振峰位也是相同的, 即共振环的形状对共振峰位的中心频率几乎没有影响。图 4 左侧给出了具有形同周长的 H 型结构, 在中间横梁移动引起的对称性变化的情况下, $m=2$ 模式的强度发生了明显的变化。右侧给出具有相同周长的不同形状的狭缝具有相同的透射谱。

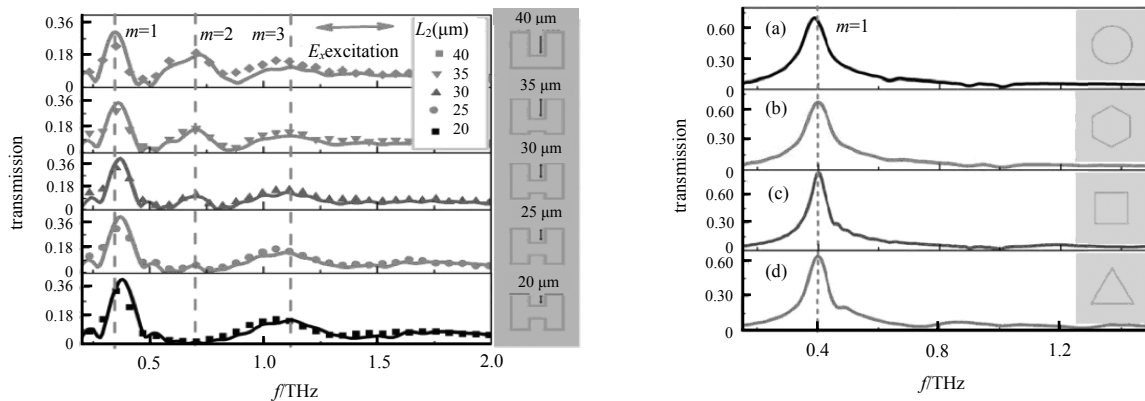


Fig.4 Transmission of H-rings with varied asymmetry(left). Transmission of closed rings with different shapes but same circumference(right).
图 4 左侧为相同周长的 H 形金属缝中不同对称破缺度对各阶次共振模式的调制, 右侧为周长相等的不同形状的太赫兹频谱透过率。

2.3 劈裂金属环结构对光谱的调制

劈裂环结构可认为是闭合结构上制作一个或多个开口。劈裂结构因其对于相同的电偶极共振波长, 需要比闭合结构更小的周期, 常用于缩小器件单元面积。此外劈裂环结构利于实现更高的品质因子。高品质因子的劈裂环结构可以用于高分辨率的折射率传感, 一方面是因为高品质因子的共振峰更窄, 从而有利于在频谱上分辨出峰位的移动; 另一方面, 则是因为共振通常使场强局限在更小的模式体积内, 从而可以将待测样品放置于更小的敏感区域内, 以缩小对样品量的需求。同时高品质因子意味着共振幅度更显著, 从而可以提高测量的信噪比。

品质因子与损耗相关。在超材料中, 损耗分为吸收损耗和辐射损耗两部分。由于在太赫兹波段, 金属是理想电导体, 没有吸收损耗, 因此只需要抑制辐射损耗就可以获取高的品质因子。此前的文献中通过利用电偶极矩与电偶极矩、电四极矩的耦合 Fano 共振模式以得到较高的品质因子, 但得到的品质因子均在 40 以下。也有利用 Rayleigh

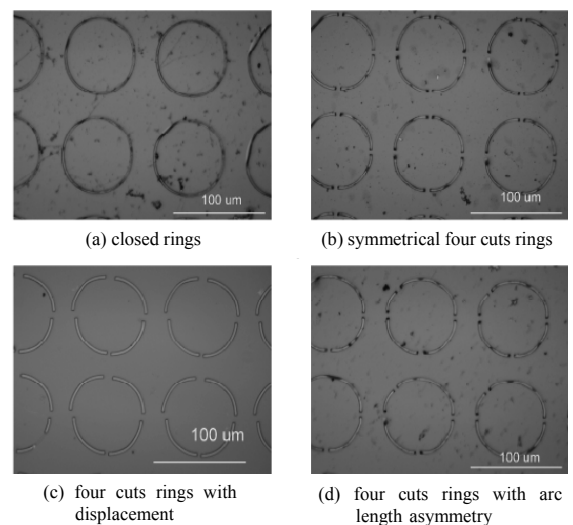


Fig.5 Optical views of metallic rings deposited on silicon plates
图 5 硅基底上的金属环结构: (a) 闭合的金属环, (b) 对称的四分环, (c) 位置破缺的四分环, (d) 弧长破缺的四分环

反常共振模式来实现高品质因子^[4]。

本文通过在对称破缺的四分环结构中，激发暗模式的环磁共振模式，并与亮模式的电偶极共振耦合产生 Fano 谱形，得到了一个高达 397.5 的品质因子^[16]。此外，通过调节入射偏振方向，更能得到高品质因子，性能优于已报道的器件。图 5 给出了本课题组制备的各种硅基底上的金属环结构，图 6 给出了位置破缺的四分环(图 5(c))在不同偏转角的线偏振入射下的透过率，可以看到在 0.8 THz 附近有一个尖锐的透射共振，这就是对称破缺的四分环结构中环磁模式和电偶极共振模式耦合得到的 Fano 共振。图中偏振角 0°和 90°时的透过率强度是相同的。

上述高品质因子的共振峰是通过 Fano 共振实现的。而电磁诱导透明现象作为一种特殊的 Fano 共振模式，近年来也有大量研究。电磁诱导透明现象的产生需要亮模式和暗模式的中心共振频率相同。图 7 给出了弧长破缺的四分环结构中的电磁诱导透明现象。在四分环结构中，通过调节第一、二象限内金属弧长的比例(图 5d)，破坏结构的对称性，可观测到不同的弧长比例下，亮模式和暗模式的中心共振频率逐渐接近并最后重叠，导致电磁诱导透明现象。

2.4 小结

对于薄金属膜上的闭合缝结构或环结构，其共振模式以电偶极共振模式为主要模式，而高阶次共振模式则较弱，共振波长通常为结构等效周长二分之一的整数倍：

$$\lambda_{\text{resonant}} \approx n_{\text{eff}} l_{\text{average}}, n_{\text{eff}} = \frac{n_{\text{sub}} + n_{\text{air}}}{2}, l_{\text{average}} = \pi(r_{\text{inner}} + r_{\text{outer}}) \quad (1)$$

式中： n_{eff} 为等效折射率，其计算通常只有上下两层均为厚介质时才成立； n_{sub} 和 n_{air} 分别是基底介质和空气的折射率； r_{inner} 和 r_{outer} 分别是金属圆环或缝的内径和外径， l_{average} 则是平均周长。但若结构上还附有较薄的介质层，那么需要修正该公式^[17]。

在设计器件时，还应注意选择亚波长金属结构是相同形状的环或其补结构(缝)，以及入射光束的激励方向(基底一侧入射或从结构一侧入射)。相同形状的环与缝从几何上是互补的，常与几何光学中的巴比涅原理做比较，而推论环与缝的光谱响应也是互补的。而互逆的入射方向则常与几何光学的光路可逆原理相比较，即认为分别从两侧入射得到的光谱响应是一致的。

从图 8 的计算结果看，环与缝的光谱响应互补，与几何光学的巴比涅原理对应，即在共振峰位处，圆环结构产生波谷而圆缝产生波峰。但需注意，这通常只在薄金属结构以及结构上下方没有较薄的介质层时才符合^[17]。

在低于 2 THz 的频段，从基底和结构两侧照射太赫兹波，其透过率结果是一致的，即光路可

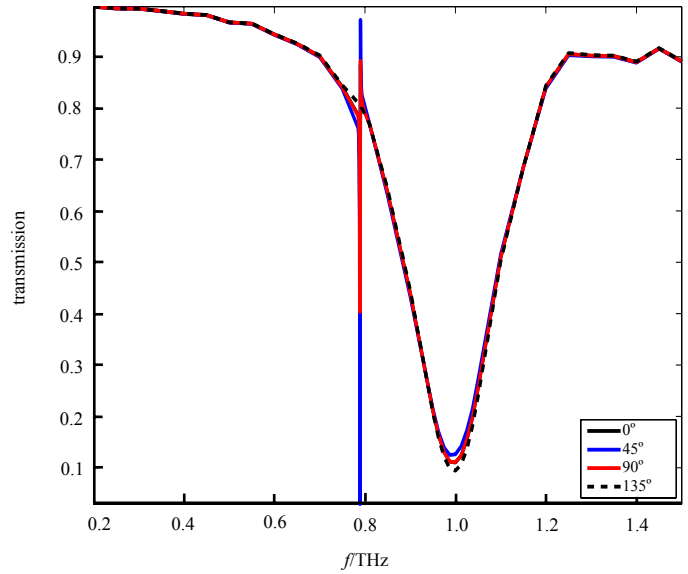


Fig.6 Transmission of four cuts rings with displacement asymmetry under different polarization angles
图 6 位置破缺的四分环(图 5(c))在不同偏转角的线偏振入射下的透过率(与硅基底透过率归一化)

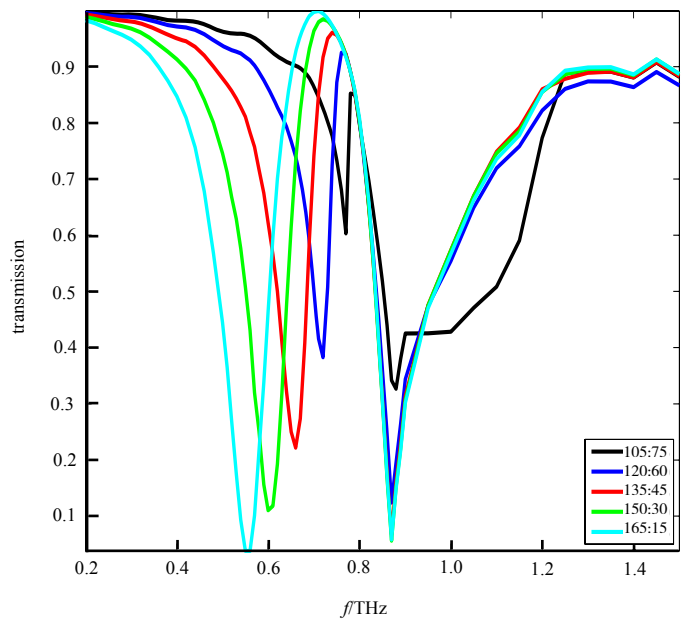


Fig.7 Electromagnetic induced transparency in the four cuts rings with arc length asymmetry. The colors indicate different arc ratios. The red line is corresponding to the structure in Fig5(d)
图 7 弧长破缺的四分环结构中的电磁诱导透明现象。不同颜色的线条表示不同的弧长比例。红色线条对应图 5(d)所示的结构。

逆。但在高频处，透过率将会变得不同。这是因为低频段对应0级衍射，而在高频段有高阶的衍射级次。由光栅方程可知，分别从上下基底两侧入射时，0级衍射的截止频率是一致的，但高级次的截止频率则会不同。

本节总结了本课题组在超材料增透、高阶次共振模式调制与磁共振激发致高品质因子等方面开展的实验研究。在此基础上，将针对超材料器件的丰富光学响应(共振峰的中心频率、线宽、阶次和发生机制，共振对偏振态和入射角度的响应等)继续开展研究，大致可分为以下几个方面：

1) 闭合金属结构形状对共振峰位的半高全宽的影响机制。虽然共振峰位中心频率只与周长有关，但从图4可以看到形状对峰位的谱宽是有影响的，对一些特定的应用，透过峰的宽度是一个重要因素。

2) 超材料在不同照射角度和探测角度的频谱响应特性。入射角度可能导致共振峰位的劈裂^[18]和透射衍射级次的变化。限于现有的实验条件，只开展了正入射下光谱特性的研究表征，但随着基于光纤耦合的太赫兹时域实验系统的投入使用，将能有效地研究入射角度的影响，位于不同衍射角度的高阶衍射级次的特性以及雷达散射截面特性等。

3) 开发多层金属结构组成的超材料器件。多层结构较之单层结构在谱宽、入射角度敏感性和偏振转换效率等方面更有优势。但多层超材料在加工上存在对准问题，尚需进一步改进器件的加工工艺。

4) 开发替代的纯电介质器件。利用波长量级电介质颗粒结构的Mie散射特性，可开发出带宽更宽的低通器件等。

5) 研究超材料的各向异性特性，实现偏振转换和手性调制等。引入各向异性或非均匀的介质(如电泵浦的石墨烯)，基于变换光学原理开发相应的器件。

6) 开发高频谱分辨率太赫兹光谱系统以测量高品质因子器件。

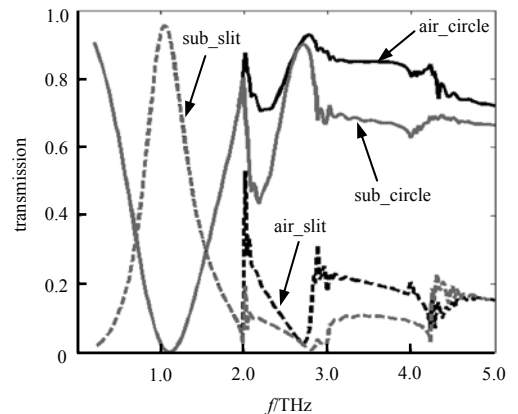


Fig.8 Transmission of metallic rings and slits illuminated from the structure side and substrate side. The solid lines indicate rings, while the dash lines indicate slits. The rings and slits are with the same period $100\ \mu\text{m}$, outer radius $45\ \mu\text{m}$, width $10\ \mu\text{m}$ and refractive index of substrate 1.5.

图8 薄金属膜上分别从结构和基底一侧入射时相同形状的金属环和缝的总透过率。实线为圆环，虚线为其补结构(缝)。周期 $100\ \mu\text{m}$ ，外径 $45\ \mu\text{m}$ ，宽度 $10\ \mu\text{m}$ ，基底折射率 1.5。

3 超表面器件对光场的调制

本节将着重介绍单色光的光场波前调制。这方面的工作结合了亚波长金属天线对太赫兹波的相位调制特性和衍射光学元件设计方法，为集成化高性能的太赫兹波片、信息处理和光学逻辑门等设计提供了新的思路。

光场的波前调制最基本的就是对光束振幅和相位的调制。在光场调制器件中，最重要的一类是纯相位型调制器件，因其对光场没有吸收损耗和较小的反射损失而有较高的衍射能量效率。而现在广泛使用的电介质型器件难以加工到波长量级，极大限制了其在集成系统中的使用。

Capasso 组^[19]于 2011 年提出了在近红外波段可以利用线偏振光入射激发亚波长金属 V 形天线中的 2 种不同表面波谐振模式，实现微尺度上的正交线偏振方向透射光场高达 2π 的相位调制，从而开启了超表面器件这一研

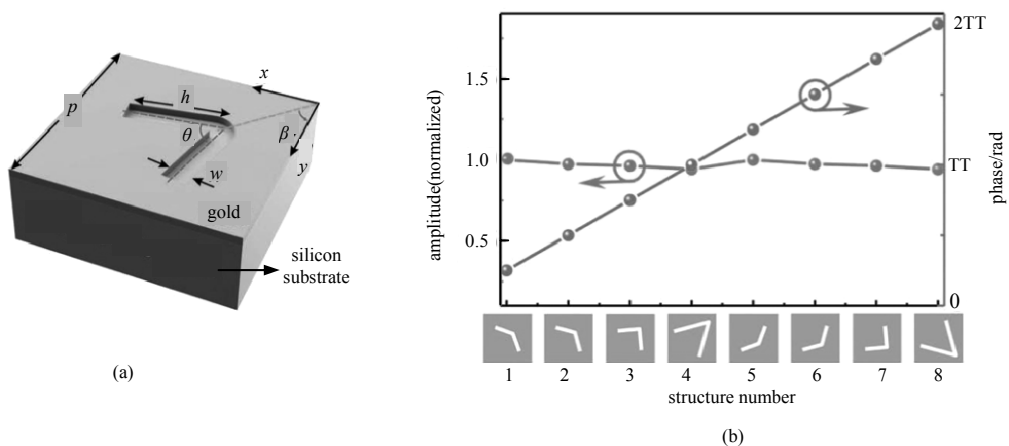


Fig.9 (a)Unit cells for pure phase modulator and (b)transmit amplitude and phase of unit cells
图 9 (a)超表面器件所用的纯相位调制单元结构示意图和(b)振幅相位调制

究领域。需要注意的是，实现相位调制的透射光束的偏振方向与入射偏振正交，而与入射偏振相同偏振态的出射光束基本没有调制。这与此前利用金属-介质-金属波导模式实现相同偏振方向相位调制研究^[20-22]是不同的。

本课题组开展了太赫兹超表面器件用于光束控制应用的研究^[23-25]，首次验证了超表面平板透镜的成像功能，并测量了涡旋光束在传播过程中光场相位的演化。此外设计实现了线聚焦和点聚焦平板聚焦透镜、长焦深透镜和计算全息相位板等多种器件，展示了基于超表面的太赫兹衍射光学元件的应用前景。

如图9所示，超表面器件由8个大小为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 的相位调制单元组成。每个调制单元均为宽度为 $10\ \mu\text{m}$ 的V形金属缝结构，具有不同臂长 h 、开口角度 θ 和旋转方向(1~4号结构角平分线沿 $y=x$ 方向，5~8号结构则沿 $y=-x$ 方向)。入射光沿 x 轴方向入射时，将对沿 y 方向偏振的出射光实现相位调制 2π 范围内的8阶量化。V形结构下方为高阻硅衬底，金属膜厚为 $100\ \text{nm}$ ，器件的工作频率为 $0.75\ \text{THz}$ 。

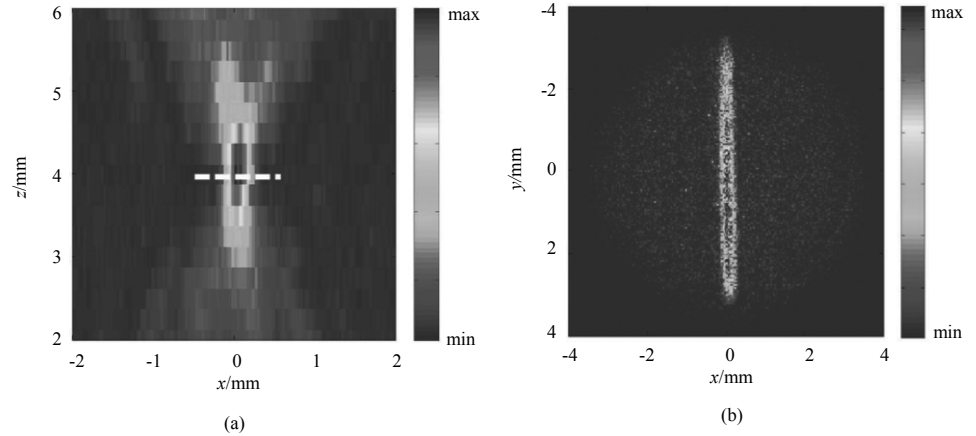


Fig.10 Recorded intensity along the transparent direction(a) and at focal plane(b) of a cylinder plane plate lens

图 10 (a)线聚焦平板透镜传播方向的光场强度分布和(b)焦平面的光场强度分布

3.1 聚焦和成像平板透镜

按照等光程原理，设计并制作了共 40×40 个像素的平板柱透镜和球透镜^[23]，两者的焦距均为 $4\ \text{mm}$ 。从图10(a)中可以看到沿传播方向(z 轴)以步长 $0.25\ \text{mm}$ 扫描得到的光场强度分布，清楚地展示了光束的聚焦过程，在 $4\ \text{mm}$ 处的焦点上达到最大值。在焦平面实验测得的光斑图10(b)则表明了线聚焦特性。焦斑的半高全宽为 $270\ \mu\text{m}$ ，略大于二分之一波长，与相同数值孔径的传统透镜的聚焦能力($255\ \mu\text{m}$)相仿。

平板球透镜将光束聚焦到空间中的一点而非一条直线上。图11(a)中给出了平板球透镜的光学图像，图11(b)显示了焦平面上的光场强度分布，光场能量被强烈会聚，而在光场中央形成了锐利的亮斑。平板球透镜的重要潜在应用是集成到微成像系统，应用于手机摄像头或光纤内窥镜等设备中。对3个刻透在不锈钢板上的线宽为 $1\ \text{mm}$ 的字符图案的成像结果如图11(d,e,f)所示，图案被较好地传递给探测元件。

除了常规的柱透镜和球透镜，还开发了设计了长焦深的平板透镜^[25]。此类长焦深透镜拥有更大的成像景深，可用于某些太赫兹雷达系统中。长景深透镜的设计不再有解析公式可用，需要使用迭代优化算法实现。使用

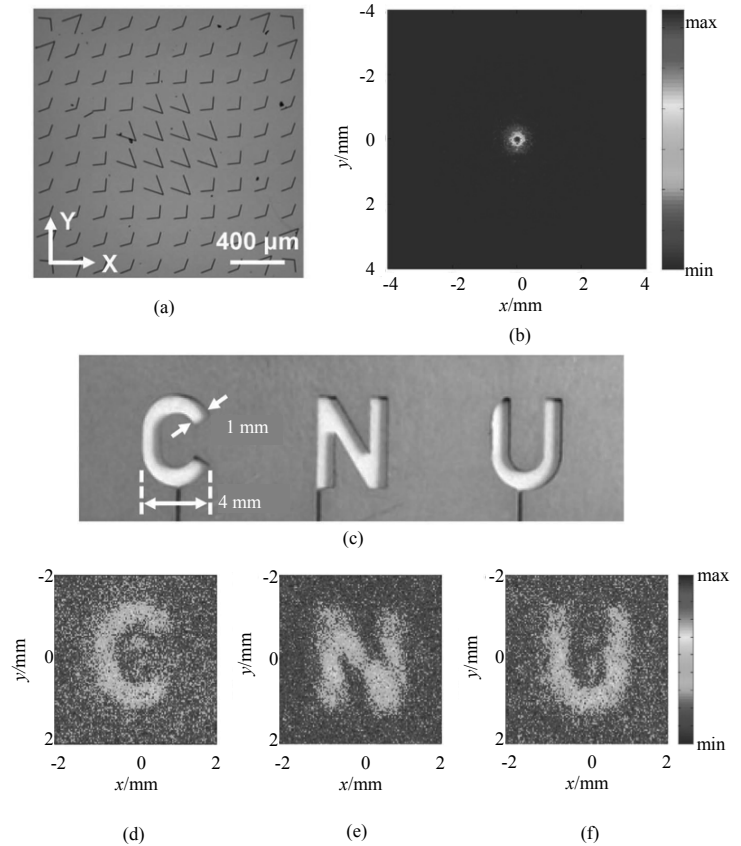


Fig.11 (a)Part view of plane plate sphere lens. (b)Recorded intensity on the focal plane. (c)Objects with characters "C","N","U". (d,e,f) The detected images.

图 11 (a)平板球透镜的结构局部，(b)焦平面实测光场强度分布，(c)待成像物体和(d,e,f)像平面测量结果。

杨顾算法, 实现了焦深 8.40 mm 的平板球透镜(如图 12 所示), 比等光程原理的理论焦深 2.41 mm 大了 3 倍以上。

3.2 全息相位板

计算全息相位板是相位衍射元件的一个重要应用, 其先将强度信息转变为相位编码, 再通过衍射传播在特定的距离再现, 广泛应用于光学显示和光学逻辑器件设计中。通过盖师贝格-撒克斯通(Gerchberg-Saxton, GS)算法, 文中设计制作了 2 个计算全息相位板, 分别在传播 4 mm 以后显示“C”和“N”2 个字符^[23]。设计和实验结果见图 13。设计结果中的噪声是由于器件的像素数量不足而使空间带宽较低导致的。如果器件具有更多的像素, 设计结果中的显示字符将更清晰锐利。

3.3 涡旋光束产生

涡旋光束因其中心的相位奇点和量子化轨道角动量等性质, 一直是光学操控和光信息传输的研究热点。由于太赫兹对非极性介质的良好穿透性, 太赫兹涡旋光束有望作为光镊捕捉操控半导体颗粒等。对于不同大小的颗粒, 光学力中起主导作用的分别是场强梯度、光束动量变化等, 而光束传播过程中相位的变化则直接显示了光束动量的改变。本课题组通过超表面器件产生太赫兹涡旋光束, 并利用太赫兹焦平面成像系统同时测量振幅和相位信息的特点, 首次记录了太赫兹涡旋光束在传播过程中的相位变化, 观察到与设计值相符的结果^[24]。可以看到涡旋光束在传播光程中, 在中心始终存在场强为 0 的奇点, 而相位分布则始终成螺旋状。图 14(a)给出了实验测量系统, 图 14(b)给出了涡旋光束在传播中的振幅, 而图 14(c)给出了相应的相位分布。

3.4 小结

本课题组基于 V 形金属缝天线设计制作了聚焦和成像透镜, 计算全息板和涡旋光束相位板等超薄太赫兹超表面衍射光学元件, 为进一步控制太赫兹光束的传播打下了基础。针对实际的光束控制需要, 应进一步研究以下方面: 三维物体编码再现、复振幅物体编码、多焦点透镜、波分复用器件等。此外超表面器件还具有很好的偏振态调制特性, 其对于具有正交性的偏振态有很好的调制, 如偏振方向夹角为 90° 的线偏振光、左旋和右旋的圆偏振光、偏振方向沿径向和角度方向的特殊偏振光等。这将有望用于线偏振态控制器件(波片、偏振片)、圆偏振态手性鉴别、径向偏振和角向偏振控制等。

此类器件的真正实用化, 还应着力解决偏振态的转化效率。现有最好的单层超表面器件的偏振转换效率约为 40%, 进一步的提高可能需要使用多层结构。此外还应改善此类器件的宽谱性能、可观测角度以及空间带宽积等。

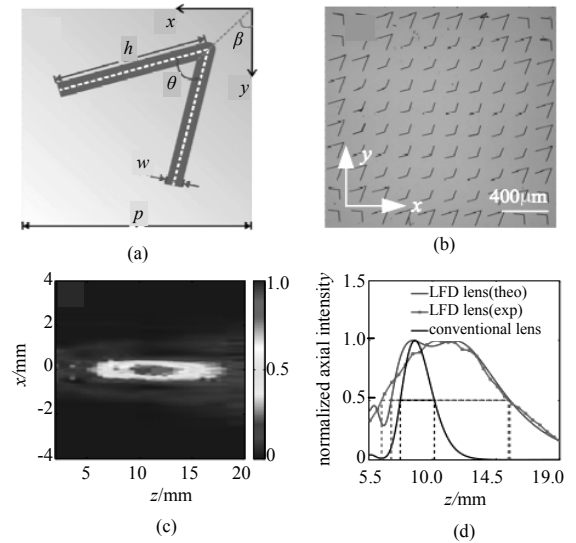


Fig.12 (a)Antenna unit cell, (b)The part view of the long axial focal depth lens, (c)The intensity along axial direction, (d)The measured and simulation results of the focal depth

图 12 (a)长焦深平板球透镜的相位调制单元, (b)局部结构, (c)传播方向光场强度, (d)实验和数值计算的焦深比较

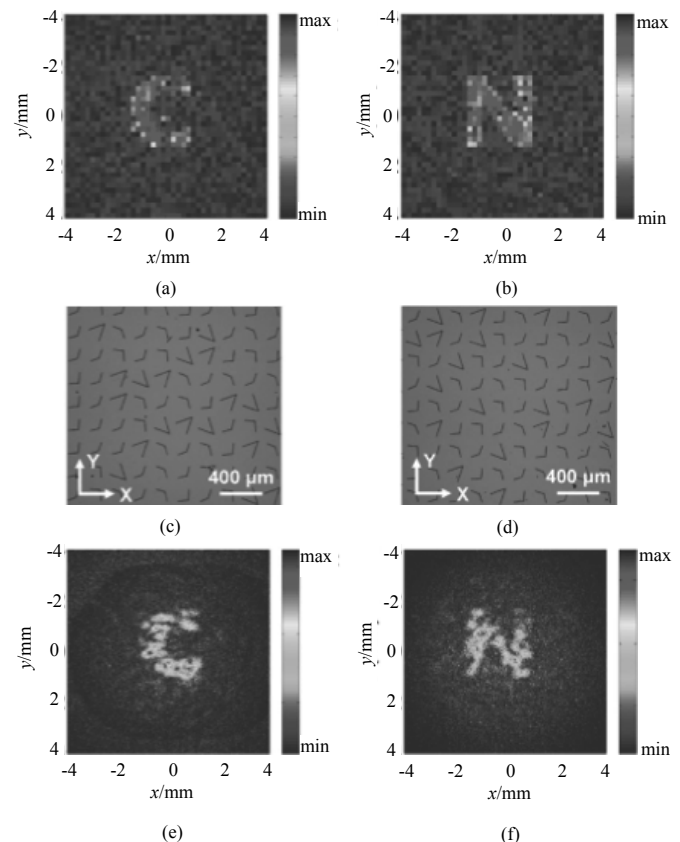


Fig.13 Designed results of the holography masks(a,b), the part views of masks(c,d), and the measured reconstructed images(e,f).

图 13 (a,b)计算全息超表面相位板的目标设计结果, (c,d)局部结构和(e,f)成像再现结果。

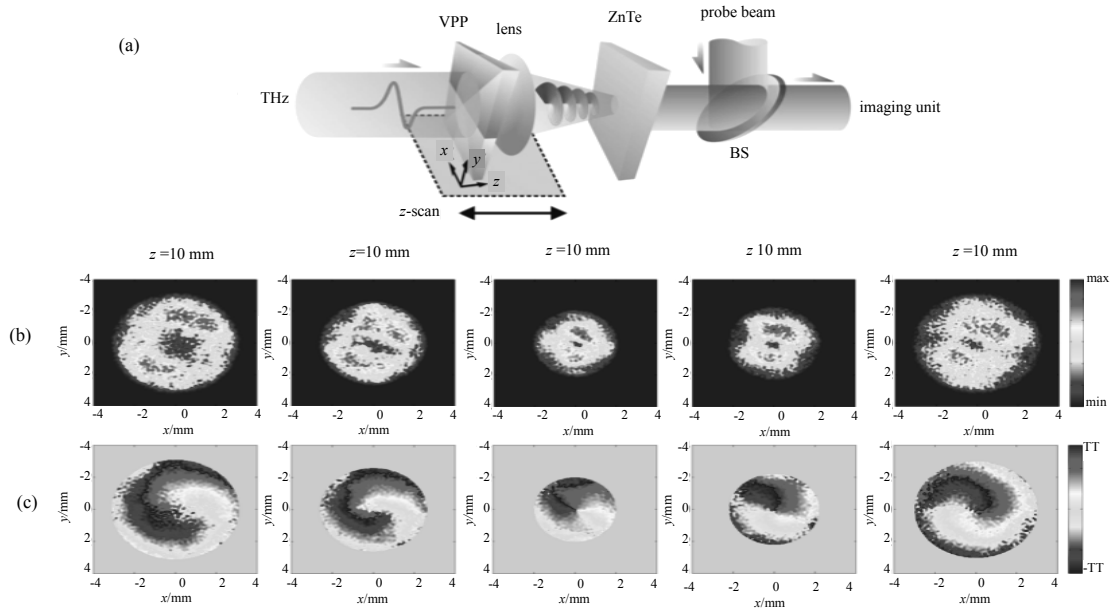


Fig.14 Experiment setup(a) and the measured amplitude(b) and phase(c) of vortex at different transparent distances
图 14 (a)实验测量系统和涡旋光束在不同传播距离上(b)振幅和(c)相位的分布

4 光泵浦主动调制器件的研制

光调制器件是光通信的基础核心器件。鉴于第一代光调制器采用电控光机制而难以突破调制速率，第二代光调制器件则着力于研发具有更快调制速率的光控光器件。本课题组通过研究高阻硅等半导体材料在飞秒激光泵浦下电子跃迁致电导率的变化，进行了相应太赫兹调制器的开发。

4.1 光泵浦硅对太赫兹透过率的调制

利用高功率的近红外飞秒激光器，进行了不同泵浦光功率密度下硅片对太赫兹光束透射性能的研究。测量结果见图 15，可以看到随着泵浦光功率的提高，太赫兹的透过率急速下降，在泵浦功率密度为 0~120 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的范围内可以实现对太赫兹透过约 90%的调制度^[26]。从透过率的变化则可计算出相应的光致电导率。

4.2 光泵浦超材料的频谱调制

对 2.2 节中的 H 形超材料的硅基底进行光泵浦^[27](如图 16 所示)，可看到超材料各级次共振峰的幅度随泵浦功率的提高而渐次下降，且泵浦功率较低时下降幅度变化大，泵浦功率较高时下降幅度则变平缓。这是因为硅基底在光泵浦下发生了电导率变化，相当于为超材料结构增加了一层较薄的结构而导致的。这种透过率幅度上的变化可用作光开关等。

但此类器件需要事先在硅基底上制作金属微结构，才能对太赫兹共振进行调制，因此限制了此类器件的应用。若能 将泵浦光以特定图案入射到硅片上以实现对太赫兹共振的调制将大幅拓展其应用前景。

4.3 光泵浦振幅型太赫兹空间光调制

由硅片在不同功率光泵浦下的太赫兹透过率变化，可以看到其可以作为一个二值化的振幅型太赫兹空间光调制器。即没有被光泵浦的硅片部分，太赫兹透过率为 1，被高功率光泵浦的硅片部分透过率为 0。基于此，本课题设计实现了太赫兹波带片^[28]、振幅编码计算全息和振幅编码涡旋光束产生^[26]。

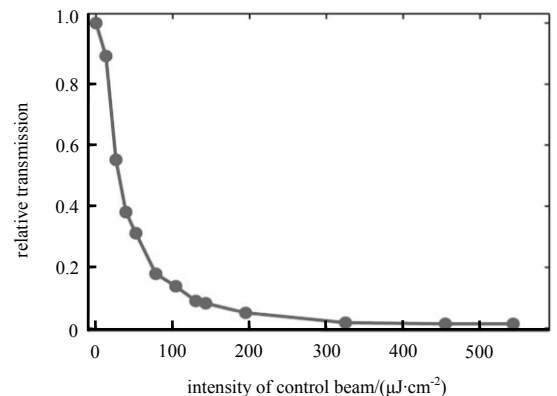


Fig.15 Transmission of THz beam through high resistance silicon plate under varied pump power of laser pulse
图 15 高阻硅片的太赫兹透过率随激光泵浦功率的变化

波带片是一类常用的振幅调制型聚焦和成像器件,通过调制不同的半波带宽度可以实现不同焦距的聚焦和成像功能。通过在高阻硅片表面投影一个波带片图案的泵浦光斑,利用硅片泵浦后太赫兹透过率的二值调制特性,即可实现光控太赫兹波带片^[28]。投影到硅片上的泵浦光图案可通过对泵浦光整形得到,图17给出了实验结果。在实验中由一块制作在2 mm厚石英基底上的11组1 μm厚的条纹组成的铬制波带片,使用透镜成像系统投射到硅片上得到,从而形成了一个焦距90 mm,工作频率1 THz的光控波带片。通过对此光控波带片的聚焦色散特性、成像放大率等的实验研究,充分展示了此类器件应用于全光调制的可行性。

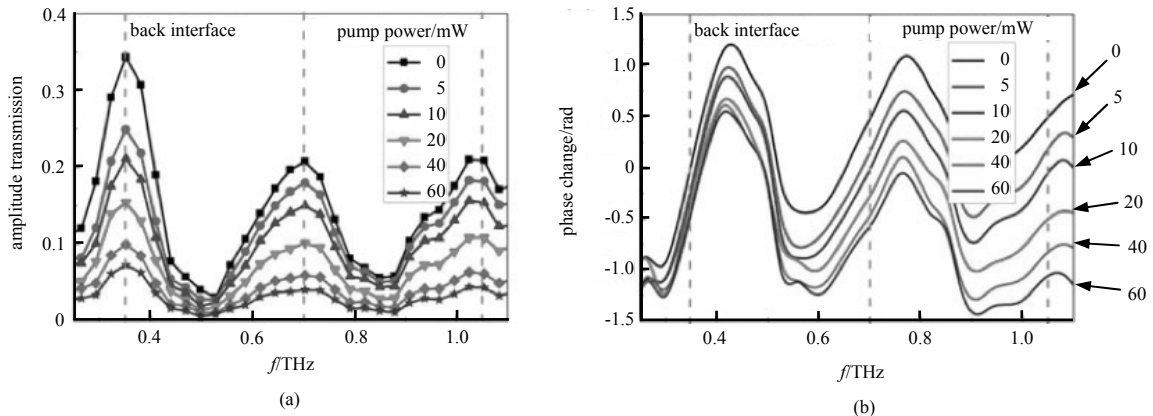


Fig.16 Amplitude and phase spectrum of electric dipolar and multipolar resonance in the H-rings with high resistance silicon substrate under varied pump power of laser pulse.

图16 高阻硅基底的H形超材料在光泵浦下电偶极和高极共振峰透过率幅度(a)和相位(b)随泵浦光功率的改变

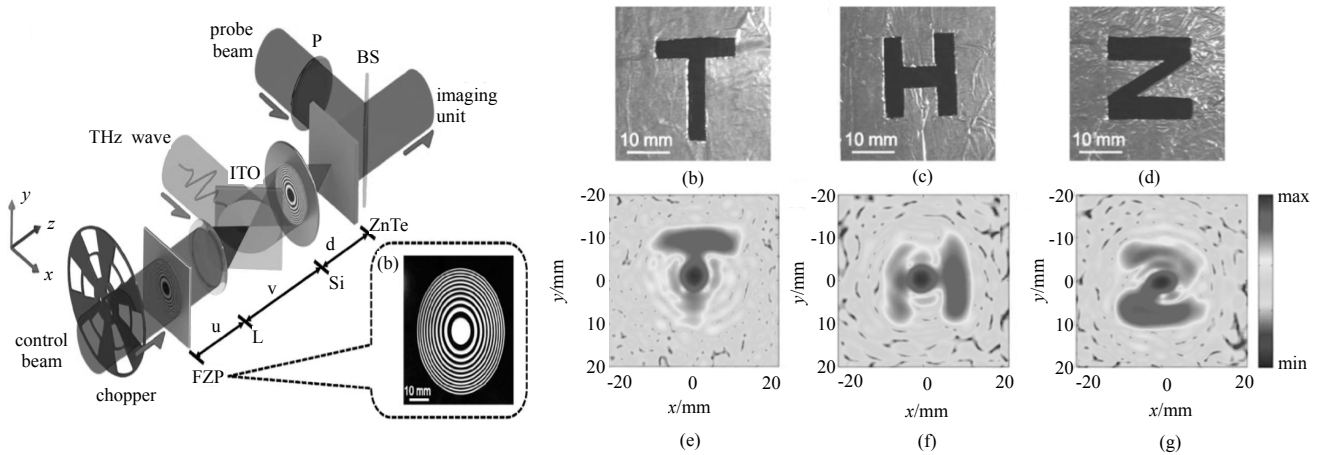


Fig.17 (a)Experiment setup and THz Fresnel zone plates. (b,c,d)Objects with character patterns. (e,f,g)Detected images

图17 (a)太赫兹主动控制波带片的实验装置, (b,c,d)待成像物体, (e,f,g)测量到的波带片所成的实像

将实物器件投影到高阻硅片以实现泵浦光束整形限制了器件的刷新频率,使用空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)实现对泵浦光束的整形将具有更好的刷新率和可调制度。通过在 SLM 上加载图案并通过泵浦光投影到硅片上以控制透射太赫兹波束的振幅和相位,实现了全息图的再现和涡旋光束的产生^[26]。需要注意的是,不同于第3节中金属天线超表面器件使用的相位编码型全息再现和涡旋光束产生,此处使用的是振幅(强度)编码型。

图18给出了实验结果,实验中使用的振幅编码是根据全息原理设计的,若太赫兹光束垂直入射,透射的同方向上将是始终为亮点的0级光斑,而携有信息的出射太赫兹光将在 ± 1 级衍射级次上。为了测量方便,在实验中使用斜入射,那么出射角为零的方向上将是携带有信息的+1级衍射。

4.4 小结

本节介绍了利用硅片在光泵浦下表现出的电导率变化性质,实现对太赫兹波的振幅型调制,从而设计出光控的波带片、全息图和涡旋光束产生等,展示了光控波前调制器件的应用前景。但振幅型调制通常受限于衍射效率

低和信息编码空间带宽积不足的问题,因此有必要开发相位型的太赫兹波调制器。光泵浦下硅片表层表现出的金属性已有文献报道^[29],当泵浦光以亚波长的长条阵列投影到硅片上时,可实验观测到长条天线散射谱的共振峰位。若能进一步直接用泵浦光在硅片表面投影生成第 3 节中的天线结构,利用天线结构的表面波共振特性,则可实现对太赫兹光束偏振态、振幅和相位的完全调制以实现各种调制器件的设计。

但要完全达到金属结构超材料和超表面器件的性能仍面临许多挑战。比如需要明确硅片表面光泵浦导致的电导率在横向和纵向的扩散深度和梯度以进行相位调制天线参数的设计,以及如何实现将激光器出射的泵浦光调制为需要的天线阵列图案,且清晰锐利地投影到硅片上。此外石墨烯在电泵浦下以及二氧化钒薄膜^[30]在热泵浦下也表现出对光透射率的二值调制特性,亦可应用于太赫兹波调制器设计。

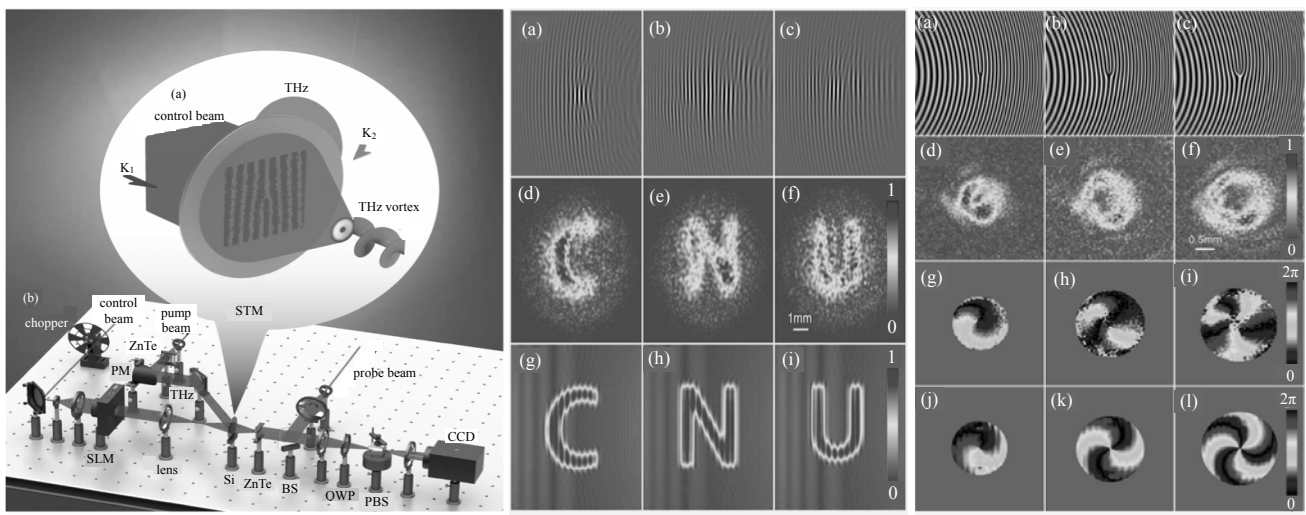


Fig.18 Measurement setup(left); design and reconstructed results of holography about characters “C”,“N” and “U”(middle); design mask, recorded amplitude and phase of vortex(right).

图 18 左侧为实验光路,中间为全息的设计和再现结果,右侧为涡旋的设计和测量的振幅和相位分布结果

5 结论

本课题组以实时全光太赫兹调制为目标,在太赫兹超材料、超表面以及主动调制器件 3 方面开展了对太赫兹波频谱、偏振、振幅和相位调制的理论和实验研究工作,形成了以结合表面等离子体波理论和衍射光学元件设计方法为特色的阶段性成果。在频谱调制方面,研究了闭合和劈裂共振环结构这类频率选择表面器件对太赫兹波电偶极共振和环磁共振模式在不同偏振态和结构对称破缺时的调制;在金属超薄超表面光场调制方面,设计实现了偏振相位转换调制天线结构,并应用于聚焦和成像平板透镜、全息显示和涡旋光束产生等方面;在光控太赫兹波振幅型调制器方面,研究了光泵浦半导体硅片中载流子迁移致电导率的变化和对太赫兹波透过率的调制,并应用于菲涅耳波带片、全息显示和涡旋光束产生等方面。在开展这些实验研究的过程中,相继建成和稳定运行了透射式、反射式太赫兹时域光谱系统和拥有专利的焦平面太赫兹成像系统,满足了对光谱测量、透射光场和表面波光场测量以及偏振测量的需求。

太赫兹技术领域的不断发展催生了对各种新颖超材料和超器件的需求,同时也激发新的研究兴趣。利用超表面器件对太赫兹波的振幅和相位调制能力,不仅可以调制透射光场,亦可用于调制反射光场以及沿界面传输的表面波光场;利用超材料器件中高品质因子形成的强烈的光场局域增强特性,可以开展太赫兹波非线性光学研究;进一步发展太赫兹探针隧穿成像和太赫兹显微成像系统,将为研究半导体和/或金属超材料和超表面器件的机制与应用提供新的手段。

参考文献:

- [1] 潘学聪,姚泽瀚,徐新龙,等. 太赫兹波段超材料的制作、设计及应用[J]. 中国光学, 2013,6(3):283-287. (PAN Xuechong, YAO Zehan, XU Xinlong, et al. Fabrication, design and application of THz metamaterials[J]. Chinese Optics, 2013,6(3): 283-287.)

- [2] SUN W,WANG X,ZHANG Y. Measurement of refractive index for high reflectance materials with terahertz time domain reflection spectroscopy[J]. Chinese Physics Letters, 2009,26(11):114210–114214.
- [3] 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.
- [4] DENG L P,HENNING T,KLAR P J,et al. Optimization of the Rayleigh anomaly of metallic gratings for terahertz sensor applications[J]. Journal of Optics, 2014,16(9):094015–094017.
- [5] LIU C,ZHANG Y. Measurement of optical parameters of organic solvents by THz time-domain reflection spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012,32(6):1471–1475.
- [6] SUN W,WANG X,ZHANG Y. A method to monitor the oil pollution in water with reflective pulsed terahertz tomography[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2012,123(21):1980–1984.
- [7] WANG S,ZHAO F,WANG X,et al. Comprehensive imaging of terahertz surface plasmon polaritons[J]. Optics Express, 2014,22(14):16916–16924.
- [8] WANG X,WANG S,XIE Z,et al. Full vector measurements of converging terahertz beams with linear,circular,and cylindrical vortex polarization[J]. Optics Express, 2014,22(20):24622–24634.
- [9] 郑显华,王新柯,孙文峰,等. 太赫兹数字全息术的研发与应用[J]. 中国激光, 2014,41(2):0209003. (ZHENG Xianhua, WANG Xinke,SUN Wenfeng,et al. Developments and applications of the terahertz digital holography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014,41(2):0209003.)
- [10] 崔焯. 太赫兹光谱技术在食品安全中的应用[D]. 北京:首都师范大学, 2009. (CUI Ye. Application of THz spectrascopy in food safety[D]. Beijing,China:Capital Normal University, 2009.)
- [11] WANG X,CUI Y,SUN W,et al. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection[J]. Journal of Optical Social of American A:Opt Image Sci Vis, 2010,27(11):2387–2393.
- [12] GENET C,EBBESSEN T W. Light in tiny holes[J]. Nature, 2007,445(7123):39–46.
- [13] HU D,ZHANG Y. Localized surface plasmons-based transmission enhancement of terahertz radiation through metal aperture arrays[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2010,121(15):1423–1426.
- [14] HU D,XIE C,LIU M,et al. High transmission of annular aperture arrays caused by symmetry breaking[J]. Physical Review A, 2012,85(4):0459011–4
- [15] HU D,FENG S,DONG B,et al. Standing-wave plasmonic resonance in terahertz extraordinary transmission[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013,19(1):8400606–8400609.
- [16] WANG B,XIE Z,FENG S,et al. Ultrahigh Q-factor and figure of merit Fano metamaterial based on dark ring magnetic mode[J]. Optics Communications, 2015,335:60–64.
- [17] MUNK B A. Appendix D:Effective reflection and transmission coefficients for a stratified medium[M]. [S.l.]:John Wiley & Sons,Inc. 2000.
- [18] CHEN L,ZHU Y,ZANG X,et al. Mode splitting transmission effect of surface wave excitation through a metal hole array[J]. Light:Science & Applications, 2013,2(3):60–64.
- [19] YU N,GENEVET P,KATS M A,et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011,334(6054):333–337.
- [20] WANG B,WU X,ZHANG Y. Multiple-wavelength focusing and demultiplexing plasmonic lens based on asymmetric nanoslit arrays[J]. Plasmonics, 2013,8(4):1535–1541.
- [21] ZHU Q,WANG D,ZHENG X,et al. Optical lens design based on metallic nanoslits with variant widths[J]. Applied Optics, 2011,50(13):1879–1883.
- [22] ZHU Q,YE J,WANG D,et al. Optimal design of SPP-based metallic nanoaperture optical elements by using Yang–Gu algorithm[J]. Optics Express, 2011,19(10):48–51.
- [23] HU D,WANG X,FENG S,et al. Ultrathin terahertz planar elements[J]. Advanced Optical Materials, 2013,1(2):186–191.
- [24] HE J,WANG X,HU D,et al. Generation and evolution of the terahertz vortex beam[J]. Optics Express, 2013,21(17):20230–20239.
- [25] JIANG X Y,YE J S,HE J W,et al. An ultrathin terahertz lens with axial long focal depth based on metasurfaces[J]. Optics Express, 2013,21(24):30030–30038.
- [26] XIE Z,WANG X,YE J,et al. Spatial terahertz modulator[J]. Scientific Reports, 2013,3(3347):1–4.
- [27] HU D,LIU C P,ZHANG Y. Active control of terahertz multimode resonance transmission through subwavelength metal annular aperture arrays[J]. Journal of Modern Optics, 2013,60(18):1548–1553. (下转第 18 页)