

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 太赫兹矢量光束的研究进展

胡浩, 胡晓雪, 贡丽萍, 席思星, 王晓雷

#### 引用本文:

胡浩, 胡晓雪, 贡丽萍, 等. 太赫兹矢量光束的研究进展[J]. *光电工程*, 2024, 51(8): 240071.

Hu H, Hu X X, Gong L P, et al. Research progress of terahertz vector beams[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240071.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240071>

收稿日期: 2024-03-25; 修改日期: 2024-05-10; 录用日期: 2024-05-16

### 相关论文

#### Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band

Huan Zhao, Xinke Wang, Shutian Liu, Yan Zhang

*Opto-Electronic Advances* 2023, 6(2): 220012 doi: 10.29026/oea.2023.220012

#### 基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展

张寿俊, 曹曦, 田震

*光电工程* 2023, 50(9): 230142 doi: 10.12086/oe.2023.230142

#### 一种多波束可旋转的金属波导太赫兹阵列天线

蒋钊, 黄峻堃, 张敏, 苏红, 李玲, 梁华伟

*光电工程* 2023, 50(9): 230140 doi: 10.12086/oe.2023.230140

#### 基于 $4\pi$ 聚焦系统的电磁矢量光学斯格明子的产生

孙家琳, 王思聪, 周志凯, 郑泽灿, 姜美玲, 宋世超, 邓子岚, 秦飞, 曹耀宇, 李向平

*光电工程* 2023, 50(6): 230059 doi: 10.12086/oe.2023.230059

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240071

## 太赫兹矢量光束的研究进展

胡浩<sup>1</sup>, 胡晓雪<sup>1</sup>, 贡丽萍<sup>2</sup>, 席思星<sup>3</sup>, 王晓雷<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津市微尺度光信息科学与技术重点实验室, 天津 300350;

<sup>2</sup>上海工程技术大学数理与统计学院, 上海 201620;

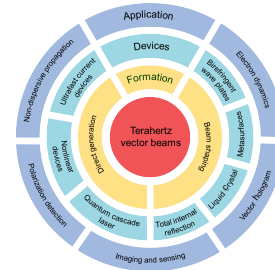
<sup>3</sup>河北工程大学数理科学与工程学院, 河北 邯郸 056038

**摘要:** 近年来, 太赫兹波因其独特的性质而备受关注。其中, 具有不同偏振矢量特性的太赫兹光束展现出新颖的光场分布特性, 并呈现出越来越广泛的应用前景。本综述探讨了太赫兹矢量光束的产生方法、在不同领域的应用以及未来的发展方向。首先, 对太赫兹矢量光束的产生方法进行了系统分类, 并介绍了在太赫兹矢量光束生成方面的研究进展, 详细阐述了这些方法的原理以及生成的矢量光束的特性。此外, 总结了利用太赫兹矢量光束开展的典型应用。最后, 展望了利用不同器件进行太赫兹矢量光场调控所面临的挑战和可能性。这份综述旨在提供对太赫兹矢量光束产生和应用的全面介绍, 并为未来的相关研究和开发提供指导。

**关键词:** 太赫兹波; 矢量光束; 波束整形

中图分类号: O439

文献标志码: A



胡浩, 胡晓雪, 贡丽萍, 等. 太赫兹矢量光束的研究进展 [J]. 光电工程, 2024, 51(8): 240071

Hu H, Hu X X, Gong L P, et al. Research progress of terahertz vector beams [J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240071

## Research progress of terahertz vector beams

Hu Hao<sup>1</sup>, Hu Xiaoxue<sup>1</sup>, Gong Liping<sup>2</sup>, Xi Sixing<sup>3</sup>, Wang Xiaolei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China;

<sup>2</sup>School of Mathematics, Physics and Statistics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

<sup>3</sup>School of Mathematics and Physics, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

**Abstract:** In recent years, terahertz waves have garnered significant attention due to their unique properties. Among them, terahertz vector beams with different polarization characteristics exhibit novel spatial distributions and show increasingly broad prospects for applications. This review explores the generation methods of terahertz vector beams, their applications in various fields, and future development directions. Firstly, the methods for generating terahertz vector beams are systematically classified, and the research progress in terahertz vector beam generation is introduced. The principles of these methods and the characteristics of the generated vector beams are elaborated in detail. In addition, typical applications using terahertz vector beams are summarized. Lastly, the challenges and possibilities of terahertz vector field manipulation using different devices are prospected. The review aims to provide a comprehensive understanding of the generation and application of terahertz vector beams and offer guidance for future related research and development.

**Keywords:** terahertz wave; vector beam; beam shaping

收稿日期: 2024-03-25; 修回日期: 2024-05-10; 录用日期: 2024-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61875093, 12104288, 11904073)

\*通信作者: 王晓雷, wangxiaolei@nankai.edu.cn

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

## 1 引言

太赫兹波通常指频率在 0.1 THz 到 10 THz 范围内的电磁辐射。近年来, 超快激光技术和半导体工艺的发展与成熟为太赫兹波的产生提供了稳定、可靠的激发光源, 推动了太赫兹波的产生和应用的蓬勃发展<sup>[1-3]</sup>。太赫兹波具备独特的相干性、强穿透性、低能性, 以及激发原子和物质的旋转和振动自由度等特点<sup>[4]</sup>。这些优势使得太赫兹波在成像、通信、材料表征等领域具有广阔的应用前景<sup>[5-16]</sup>。在各种太赫兹结构光束中, 具有不均匀偏振态的矢量光束因其独特的光场分布特性在许多领域展现出了显著的应用价值<sup>[17-30]</sup>。矢量光束是指在同一时间同一波动振动面上, 不同位置具有不同偏振态的光束。与标量光束不同, 矢量光束的偏振态会随着空间位置的变化而变化。除了在局部区域内包含线偏振外, 矢量光束还可以包含圆偏振和椭圆偏振, 偏振度的变化使得矢量光场的描述更加复杂<sup>[31-33]</sup>。研究人员通常使用改良庞加莱球来描述具有不同偏振态的矢量光束<sup>[34-35]</sup>。

与可见光和近红外波段相比, 太赫兹矢量光束的研究存在着一些难点和挑战。首先, 太赫兹波的辐射源技术相对复杂, 限制了太赫兹光束的产生和调控。其次, 太赫兹波在大气中的传播容易受到吸收和散射的影响, 导致信号的衰减和失真, 这对于远距离传输和高质量成像提出了挑战。此外, 太赫兹波与物质的相互作用较弱, 使得太赫兹光谱的测量和材料特性的分析具有一定的复杂性<sup>[36-37]</sup>。然而, 太赫兹波的独特性质也使太赫兹矢量光束具备独特的优势。太赫兹波的强穿透性、低能性、以及分子指纹谱等特点使其在成像传感、无损检测、电子动力学等领域具备独特的优势。例如, 太赫兹矢量涡旋光束有望提高成像系统的对比度和对细微结构的探测能力<sup>[25-26]</sup>, 而太赫兹径向偏振光束可用于无色散传输<sup>[17-19]</sup>和高效的粒子加速器<sup>[29-30]</sup>。总体而言, 太赫兹矢量光束的研究面临一些技术挑战, 但其在许多应用场景中的潜力和优势使其成为一个引人注目的研究领域。在太赫兹波段, 矢量光束的研究主要集中在圆柱矢量光束, 所以不宜按照矢量光束的种类对本文的结构进行划分。因此, 本文从产生方式的角度出发, 探讨了使用不同器件产生太赫兹矢量光场的原理和研究进展。

本文将对近年来研究太赫兹矢量光束的生成及其应用的工作进行总结和介绍。首先, 从产生方式出发, 介绍了超快电流器件、非线性器件、量子级联激光器

等直接产生器件, 以及双折射波片、超表面、液晶、全内反射器件等波束整形器件在太赫兹矢量光束生成方面的原理和研究进展。接下来, 介绍了利用太赫兹矢量光束开展的具有代表性的应用, 包括无色散传输、偏振测量、成像传感、矢量全息、电子动力学等领域。太赫兹矢量光束的特性使其在这些应用中具有重要的优势和潜力, 例如提高分辨率和信息传输速率、实现材料特性的精确测量等。最后, 对本文的内容进行概括总结, 并对太赫兹矢量光束在未来的发展及面临的挑战进行展望。通过这篇综述, 读者可以更全面地了解太赫兹矢量光束的产生、特性和应用, 为进一步研究和开发太赫兹技术提供参考和指导。

## 2 太赫兹矢量光束的产生

### 2.1 直接产生器件

近年来, 大型同步辐射光源、自由电子激光、半导体器件以及超快高能激光技术的快速推进, 为各种大功率和宽谱太赫兹辐射源提供了有力支撑。太赫兹辐射常见的实现途径主要有加速的电荷或时变的电流(光电导天线、等离子体等)、非线性介质(光学整流、微波倍频等)以及量子级联效应。在辐射源端通过光、电、磁等物理激励可以实现太赫兹波电磁特性的有效控制, 这是太赫兹波调控技术的重要组成部分。本部分主要介绍使用常见的超快电流器件、非线性器件以及最近兴起的量子级联激光器在辐射源端直接生成太赫兹矢量光束的原理和进展。

#### 2.1.1 超快电流器件

在目前产生太赫兹辐射的超快电流器件中, 使用飞秒激光激发电导天线(photoconductive antennas, PCA)是比较成熟且已经商用的方法之一。其中, 由钛蓝宝石激光器激发基于 GaAs 的光电导天线是当今最常见的脉冲太赫兹产生系统。光电导天线产生太赫兹波的原理是利用超快激光对光电导天线等进行辐照, 使基底材料中的电子吸收能量并从价带跃迁到导带, 在结构表面瞬间生成光生载流子(电子)。这些电子在偏置电场的加速作用下定向迁移, 生成瞬态光电流, 进而向外辐射太赫兹波。这些光电导天线都是可扩展的, 即可以通过调整电极图案来生成任何所需的辐射模式。因此, 通过设计光电导天线的形状和结构, 就可以通过飞秒激光直接激发产生矢量太赫兹波。

图 1(a)展示了发射径向和角向偏振的光电导天线结构, 可以看出电极的图案与其产生的太赫兹模式的

图案相反, 即角向分布的光电导天线会产生径向偏振光, 而径向分布的光电导天线会产生角向偏振光。早在 2009 年, Winnerl 等人利用图 1(a) 所示的基于半导体 GaAs 的微结构光电导天线实现了径向和角向偏振太赫兹脉冲的发射和检测<sup>[38]</sup>。2013 年, Kan 等人研究了具有径向微结构的光电导天线产生径向偏振太赫兹波的过程<sup>[39]</sup>, 使用光刻技术在半绝缘 InP 晶圆上制造了具有 10  $\mu\text{m}$  线和间距的微结构电极, 其示意图和实物图如图 1(b) 所示, 其中三层光电导天线由飞秒激光器和直流电源驱动。2016 年, Kaltenecker 等人研究了使用太赫兹显微成像提取聚焦的径向偏振光束的横向和纵向场分量的 Gouy 相移<sup>[40]</sup>。太赫兹时域方法能够映射空间中电磁波的振幅和相位, 因此能够直接追踪光电导天线产生的径向偏振光束通过焦点传播时几何相位的演变。该方法还可以应用于确定其他矢量光束的几何相位。2022 年, Deveikis 等人报道了一种多像素光电导发射器<sup>[41]</sup>, 其结构示意图如图 1(c) 所示, 由 16 组具有不同方向的光电导天线组成。通过施加偏置电压, 该发射器可以产生具有角向、径向或线性偏振态的太赫兹光束, 并且不同偏振态之间的切换是纯电的, 避免了对机械偏振光学器件或不同太赫兹发射器进行调整的需要。

基于等离子体辐射的超快电流器件也是直接产生太赫兹波的常见方法。等离子体产生太赫兹辐射的原理包括以下几个步骤: 首先, 当高能电子或离子与气体分子碰撞时, 会发生电离过程, 将部分电子从原子或分子中剥离出来, 形成带正电的离子和自由电子。这些带电粒子的集合称为等离子体。接下来, 在等离子体中, 带电粒子受到外加电场的作用而进行加速运动。在这个过程中, 带电粒子之间会发生碰撞和相互作用, 导致它们的速度和能量发生改变。当带电粒子的速度超过某个阈值时, 它们会辐射出太赫兹波。2021 年, Mou 等人开发了一种新颖的检测方法<sup>[42]</sup>, 首次证明单色激光诱导等离子体细丝会同时发射椭圆和径向偏振的太赫兹辐射。利用图 1(d) 所示的光路进行太赫兹光束的产生和检测, 分析结果表明太赫兹矢量光束是由电四极杆产生的。2022 年, Han 等人提出了一种新的测量方案<sup>[43]</sup>, 通过引入可移动金属掩模, 用于诊断纵向直流偏置等离子体细丝产生的径向偏振太赫兹辐射。使用<110>切割的 ZnTe 晶体测量了径向偏振太赫兹光束的振幅和光谱, 其中太赫兹光束图案由掩模调制。基于该测量方案, 证明了可以通过控

制直流偏置场的强度和位置来操纵来自纵向直流偏置细丝的径向偏振太赫兹辐射的幅度和频谱。2023 年, Wang 等人提出了通过将弱相对论性超短激光离轴注入抛物线等离子体通道, 以产生具有不同偏振分布的太赫兹辐射的方案<sup>[44]</sup>。其原理示意图和辐射光场分布如图 1(e) 所示。通过利用二维细胞内粒子模拟, 证明了太赫兹波的产生涉及两个主要物理机制, 即激光尾场的线性模式转换和等离子体通道内的电磁波导模式激发。这两种辐射模式可以分别导致具有不同的频谱和空间分布的线性偏振和径向偏振太赫兹发射。对于给定的等离子体通道, 可以通过调节激光脉冲的注入位置和注入角度来切换辐射模式。在同一年, Nikolaeva 等人在 0.3~10 THz 的选定频率下, 测量了单色飞秒激光激发细丝产生的太赫兹辐射的能流和偏振的二维分布<sup>[45]</sup>。研究发现, 在大多数频率下, 太赫兹光束呈现出环形分布, 并伴随着角向偏振和径向偏振。2024 年, Jana 等人引入了一种基于量子控制的方法, 能够以全光学方式操纵所生成的光场<sup>[46]</sup>。根据图 1(f) 所示的配置, 利用两种不同频率的光激发基于 GaAs 衬底的等离子体结构, 生成了甜甜圈状的太赫兹脉冲。研究结果表明, 由动态环电流辐射产生的单周期太赫兹脉冲具有方位角极化的电场结构, 并且在空间和时间上具有高能且隔离的纵向磁场分量。紧接着, Pettine 等人介绍了一种矢量光电超表面<sup>[47]</sup>。该超表面利用对称破缺的等离子体纳米结构, 通过超快光脉冲诱导局部定向电流, 实现了可调节响应和低至亚衍射纳米尺度的任意图案化。图 1(g, h) 分别展示了该结构的示意图以及模拟和实验结果。非均匀空间图案可以实现对宏观尺度的空间变化矢量电流分布的几乎任意控制。图 1(h) 清晰展示了径向偏振和角向偏振的太赫兹场, 进一步证实了空间变化的矢量光电流。通过利用空间图案光电流直接生成任意太赫兹矢量场, 可以实现超薄、宽带和单级源, 并且可以通过入射光场或静电门控来主动操纵。

超快激光泵浦的自旋激发太赫兹辐射为可调谐、低成本、超宽带和易集成的太赫兹源提供了新的思路, 这对于太赫兹源调控技术具有重要意义。自旋电子太赫兹发射器通过自旋电流的加速或衰减产生宽带太赫兹辐射。具体来说, 在自旋电子太赫兹发射器中, 首先利用激光或电流激发材料中的载流子, 并通过施加磁场或利用材料的自旋-轨道耦合来实现载流子的自旋极化。当这些自旋极化的载流子受到外部激励时,

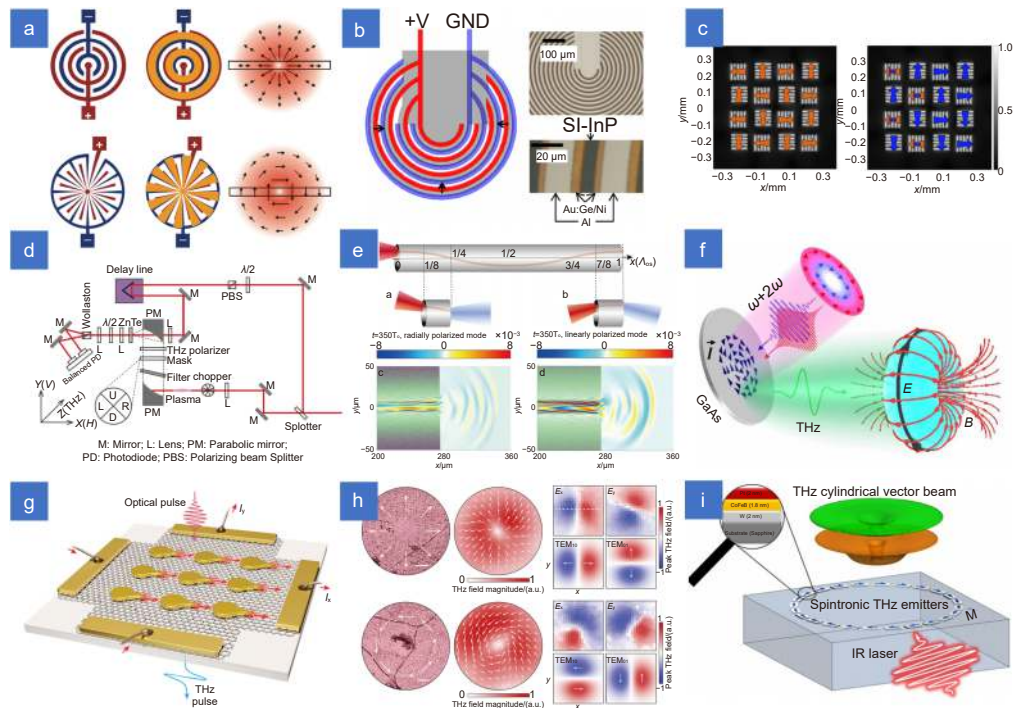


图 1 基于超快电流器件的太赫兹矢量光束的产生。(a) 基于 GaAs 的微结构光电导天线<sup>[38]</sup>; (b) 基于 InP 的微结构光电导天线<sup>[39]</sup>; (c) 多像素光电导发射器<sup>[41]</sup>; (d) 单色激光诱导等离子体细丝发射径向偏振太赫兹波<sup>[42]</sup>; (e) 超短激光离轴注入抛物线等离子体通道发射高强度太赫兹波<sup>[44]</sup>; (f) 动态环电流辐射角向偏振太赫兹脉冲<sup>[46]</sup>; (g, h) 光驱动的纳米级矢量电流辐射太赫兹波<sup>[47]</sup>; (i) 纳米结构自旋电子发射器<sup>[52]</sup>

Fig. 1 Generation of terahertz vector beams based on ultrafast current devices. (a) GaAs-based microstructured photoconductive antenna<sup>[38]</sup>; (b) InP-based microstructured photoconductive antenna<sup>[39]</sup>; (c) Multi-pixel photoconductive emitters<sup>[41]</sup>; (d) Radially polarized terahertz waves from one-color laser-induced plasma filament<sup>[42]</sup>; (e) Ultrashort laser off-axis injecting parabolic plasma channel emits high-field terahertz waves<sup>[44]</sup>; (f) Dynamic loop currents radiates angularly polarized terahertz pulses<sup>[46]</sup>; (g, h) Light-driven nanoscale vectorial currents radiates terahertz waves<sup>[47]</sup>; (i) Nanostructured spintronic emitters<sup>[52]</sup>

它们在材料中运动，并产生特定频率的磁矢量势。根据安培环路定律，这种变化的磁场会激发电场，从而产生太赫兹辐射。此外，通过调整载流子的自旋极化方向和激励条件，可以实现不同偏振和频率的太赫兹辐射。1996年，法国科学家 Beaufrepaire 等人利用飞秒激光在金属镍中首次观察到超快退磁现象。随后，通过对超快退磁机制的研究，利用与电子自旋属性相关的超快电流来产生太赫兹辐射<sup>[48-49]</sup>。2014年，Taira 等人使用 30 MeV 亚皮秒电子束从相干跃迁辐射产生了径向偏振的太赫兹辐射<sup>[50]</sup>。2016年，Jin 等人使用太赫兹时域光谱系统记录了超高对比度超短相对论激光脉冲照射薄箔后产生的径向偏振太赫兹辐射<sup>[51]</sup>。高效的太赫兹发射可归因于目标后鞘电场对激光驱动的热电子进行反射。2022年，Schulz 等人提出了一种基于自旋电子太赫兹发射器的新颖方法，用于在太赫兹范围内生成宽带矢量光束<sup>[52]</sup>。如图 1(i) 所示，通过对电场和磁场多极子进行量化，证明了产生径向或

角向极化宽带太赫兹场的可能性。该纳米结构被证明可以产生高阶电和磁多极以及局部、纵向、宽带电磁太赫兹脉冲。

### 2.1.2 非线性器件

基于光学整流的非线性器件也是产生太赫兹辐射的常用方法之一。当高能量的单色光束在非线性介质中传播时，它会在该介质中发生差频效应，从而产生一个不变的电极化场。电极化场在材料内形成一个直流电场，这种现象被称为光学整流。当超短飞秒脉冲激光在非线性介质中传播时，可以将其视为一组单色光束的叠加。这些单色光束在非线性材料中发生差频效应，生成一个低频振荡的时变电极化场，并向外辐射电磁波。由于激发脉冲是飞秒脉冲，因此通过光学整流产生的电磁波处于太赫兹频段。太赫兹电场的强度与该时变电场对时间的二阶导数成正比。光学整流法的关键在于满足相位匹配条件，即激发脉冲的群速度与太赫兹波的相速度相等。只有在相位匹配条件下，

能量转移才能高效进行, 从而产生强太赫兹辐射。

2007年, Chang 等人使用超快掺镱光纤放大器泵浦<110>切割的 ZnTe 晶体<sup>[53]</sup>, 演示了在切伦科夫几何中通过光学整流生成径向偏振太赫兹脉冲。2012年, Imai 等人提出并演示了一种使用光学整流在具有三重旋转对称性的分段非线性晶体中生成圆柱形矢量光束的方法<sup>[54]</sup>。如图 2(a) 所示, 使用分段的 <111>方向的 GaP 板成功产生了宽带太赫兹圆柱形矢量光束, 并能在径向和角向模式之间切换。2013年, 该课题组又演示了宽带径向偏振太赫兹脉冲光束与裸铜线的高效耦合, 脉冲光束是通过分段 ZnTe 晶体产生的<sup>[55]</sup>。实验结果显示, 总耦合效率高达 16.8%, 在 0.3 THz 时最大耦合效率为 66.3%。同年, Sato 等人提出并演示了一种通过激光脉冲的光学整流来生成特定太赫兹偏振波形的方法<sup>[56]</sup>。使用光脉冲整形器来控制激光脉冲的瞬时偏振态和强度, 产生的左/右旋偏振太赫兹脉冲、光脉冲整形器示意图和能够随时间实现偏振变化的太赫兹脉冲分别如图 2(b) 和 2(c) 所示。激光通过柱面镜逐个颜色地聚焦到空间光调制器的液

晶单元上, 每个颜色分量的相位和方位角由空间光调制器调制, 然后光线穿过四分之一波片入射到 GaP 晶体。同时开发了一种程序, 用于导出脉冲整形器的输入参数, 这些参数足以生成所需的太赫兹偏振波形。2015年, Gaborit 等人基于 ZnTe 晶体中的光学整流, 从理论和实验上证明了矢量太赫兹发射器<sup>[57]</sup>。该装置只需要一个常见的光学半波片和一个固定的立方晶体来生成和旋转横向太赫兹电场, 而无需对太赫兹振幅进行任何修改。此外, 光学整流效率以及太赫兹信号带宽从水平偏振到垂直偏振保持恒定。同样的晶体还可用作太赫兹接收器, 用于对太赫兹脉冲进行矢量分析。2021年, Feng 等人提出并实验演示了一种利用非线性效应直接发射宽带太赫兹圆柱矢量贝塞尔光束的方法<sup>[58]</sup>。如图 2(d) 所示, 通过使用圆偏振飞秒激光脉冲激发涂有氧化铟锡薄膜的轴棱锥, 在宽带太赫兹频率范围内获得了高质量的圆柱矢量贝塞尔光束。2023年, Mou 等人研究了如何在用矢量光束泵浦的 <111> ZnTe 晶体中生成具有定制拓扑电荷的太赫兹矢量光束, 以及如何通过初始偏振角操纵矢量太赫兹

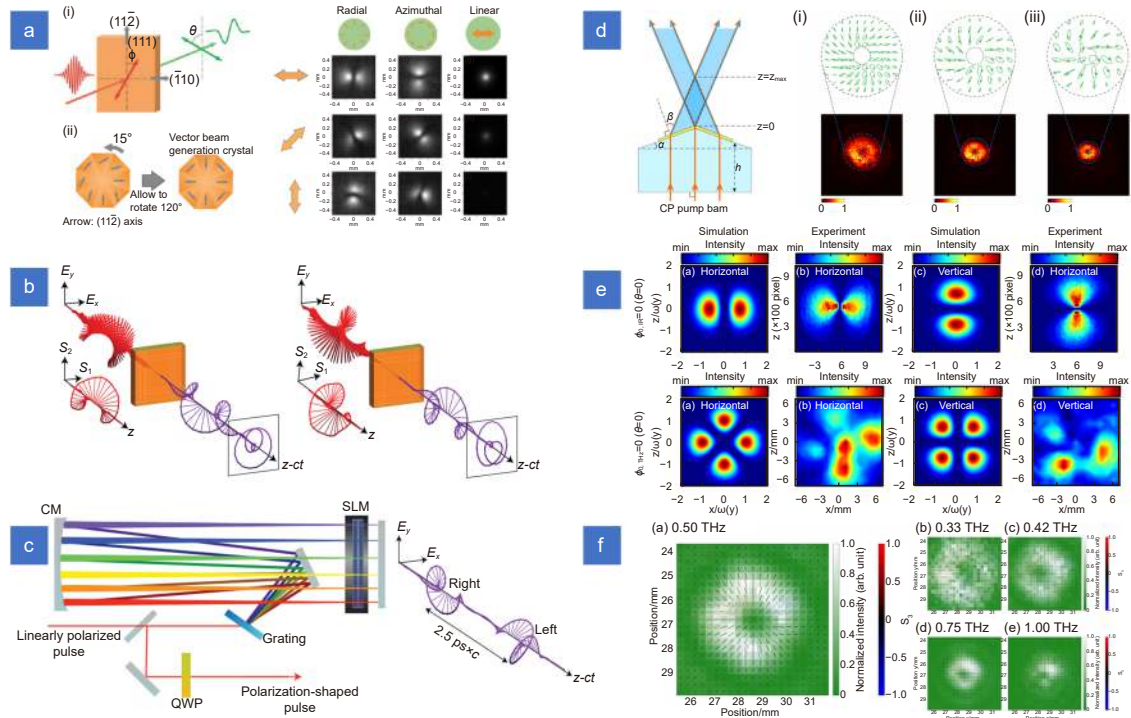


图 2 基于非线性器件的太赫兹矢量光束的产生。(a) 使用分段非线性光学晶体生成太赫兹矢量光束<sup>[54]</sup>; (b, c) 具有任意场控制的太赫兹偏振脉冲整形<sup>[56]</sup>; (d) 宽带太赫兹圆柱矢量贝塞尔光束的直接发射<sup>[58]</sup>; (e) 红外矢量光束泵浦产生具有定制拓扑电荷的太赫兹矢量光束<sup>[59]</sup>; (f) 聚焦脉冲激发 ZnTe 晶体直接产生太赫兹矢量光束<sup>[60]</sup>

Fig. 2 Generation of terahertz vector beams based on nonlinear devices. (a) Terahertz vector beams generation using segmented nonlinear optical crystals<sup>[54]</sup>; (b, c) Terahertz polarization pulse shaping with arbitrary field control<sup>[56]</sup>; (d) Direct emission of broadband terahertz cylindrical vector Bessel beam<sup>[58]</sup>; (e) Infrared vector beam pumping generates terahertz vector beam bearing tailored topological charge<sup>[59]</sup>; (f) Direct generation of a terahertz vector beam from a ZnTe crystal excited by a focused pulse<sup>[60]</sup>

光束的偏振态<sup>[59]</sup>。模拟和实验结果如图 2(e) 所示, 上下层分别展示了红外泵浦光和生成的太赫兹矢量光束的光场分布。可以观察到, 在转换过程中产生的太赫兹光束拓扑电荷是红外泵浦光的两倍, 并且呈现相反的符号。鉴于红外矢量光束设计技术的成熟, 这种方法可以用于生成具有定制拓扑电荷的太赫兹矢量光束。同年, Iwase 等人使用在 ZnTe 晶体上紧密聚焦泵浦光束的方式产生矢量光束<sup>[60]</sup>。经过计算, 确定了 ZnTe 晶体中<111>和<100>方向分别作为产生拓扑电荷为+1 和-1 的太赫兹矢量光束的最佳候选方向。利用所提出的方法, 演示了太赫兹径向偏振光束的生成, 其中圆偏振脉冲聚焦在<111>方向上, 图 2(f) 展示了不同频率下的光场偏振分布。

### 2.1.3 太赫兹量子级联激光器

太赫兹量子级联激光器 (quantum cascade laser, QCL) 是一种新型半导体激光器。相对于大功率气体太赫兹激光器, 量子级联激光器具有体积小、能耗低和集成度高等优势, 更适用于构建应用系统。此外, 量子级联激光器还具有调制能力, 因此在太赫兹领域具有广阔的应用前景。传统的半导体激光器是通过半导体材料中导带的电子和价带中的空穴复合释放光子来实现。这种激射过程的发射波长由半导体材料的禁带宽度决定。然而, 由于禁带宽度的限制, 传统半导体激光器很难发射中远红外和太赫兹波段的激光。量子级联激光器基于量子级联效应原理, 激光器中的半导体晶体由多层的量子阱结构组成。这些量子阱结构相互堆叠, 每个结构都对应着特定频率的能带。当电流通过半导体晶体注入到量子阱结构中时, 电子在能带之间发生跃迁, 释放能量并跃迁到低能带, 同时产生太赫兹辐射。辐射的频率取决于量子级联激光器的设计和结构。另外, 半导体晶体的两端形成了谐振腔结构, 放大太赫兹辐射, 当辐射受到足够放大并达到临界值时, 即可形成激光。

量子级联激光器的首次研究是基于传统的光电导发射器实现的<sup>[61]</sup>, 得益于发射器的可扩展性, 其性能不断取得提升<sup>[62-66]</sup>。近年来, 随着技术的不断进步, 量子级联激光器开始被用作太赫兹源, 并且在输出功率、工作温度、激射频率和波长覆盖范围等方面取得了重要的研究成果, 朝着高性能的方向不断发展。2023 年, Han 等人通过实验演示了一种光子模拟的量子级联激光器<sup>[67]</sup>。如图 3(a) 所示, 该电泵浦拓扑激光器在量子级联芯片上单片实现。利用图 3(b) 中的简单

光路, 成功产生和测量了具有非零偏振缠绕的圆柱形矢量光束。此外, 该课题组还展示了另一种在太赫兹频率范围内工作的电泵浦拓扑体量子级联激光器<sup>[68]</sup>, 观察到图 3(c) 所示的远场发射的圆柱形矢量光束。同年, Cui 等人通过合并基于太赫兹量子级联芯片的两种连续体束缚态 (bound-states in the continuum, BIC) 模式, 演示了电泵浦的连续体束缚态激光器<sup>[69]</sup>, 发射出如图 3(d) 所示的圆柱形矢量光束。

## 2.2 波束整形器件

太赫兹源虽然可以在外加物理场控制下实现电磁参数可调谐的辐射, 但通常需要增加辐射结构或系统的设计复杂度, 并且可调控的参数往往很少。与之相比, 波束整形器件对太赫兹波的调控更加灵活。它可以在同一个太赫兹信号上随意切换不同的调控功能, 并能够实现更多参数及时空维度的调控。太赫兹波段可供利用的自然材料种类非常有限, 传统的太赫兹器件大多采用效率低下、功能单一、价格昂贵且体积庞大的材料。因此, 针对太赫兹波的各种高效率、多功能、低成本、结构紧凑的新型调控功能器件的开发设计还有很大的发展空间。在这方面, 3D 打印制造的双折射波片在太赫兹波段具有广泛适用性, 同时超表面研究的快速发展也为太赫兹器件的开发提供了全新的技术方案。本部分主要介绍使用常见的双折射波片、超表面和全内反射器件等生成太赫兹矢量光束的原理及进展。

### 2.2.1 双折射波片

传统光学中, 通常使用线双折射晶体制成的半波片和四分之一波片来实现偏振旋转和变换。具有圆双折射特性的材料, 如磁光材料和手性介质, 也可实现微弱的偏振操控。众所周知, 一束完全偏振光可以分解为具有特定相位差和振幅比的正交线偏振或圆偏振分量, 只需改变不同分量之间的相位差或振幅比即可调控偏振。双折射波片通过在正交方向设置不同的折射率来引入相位差, 从而实现偏振调控。图 4(a) 总结了使用四分之一波片和半波片模式转换器 (Q 板) 生成矢量光束的各种设置方案, 通过改变四分之一波片和 Q 板的相对位置可以生成矢量光束或矢量涡旋光束<sup>[70]</sup>。2016 年, Minasyan 等人提出了一种使用由空变双折射板制成的几何相位元件的太赫兹拓扑光束整形策略<sup>[71]</sup>。太赫兹涡旋光束和矢量光束是使用几何相位元件生成的, 并在振幅和相位上进行了表征。2017 年, Hernandez-Serrano 等人提出了在太赫兹频

率下具有连续双折射变化的 Q 板的设计、制造和表征<sup>[72]</sup>。如图 4(b) 所示, 该 Q 板是通过 3D 打印制造的, 是生成圆柱形矢量光束的简单解决方案。2019 年, Dong 等人同样提出使用 3D 打印低折射率介质光栅

实现 Q 板<sup>[73]</sup>。如图 4(c) 所示, 通过分段旋转实现圆柱矢量光束发生器。由于低折射率材料的弱衍射和适当的本征模色散, 可以提供宽带且高效的矢量光束生成。2022 年, Koral 等人报道了具有固定光轴变化率

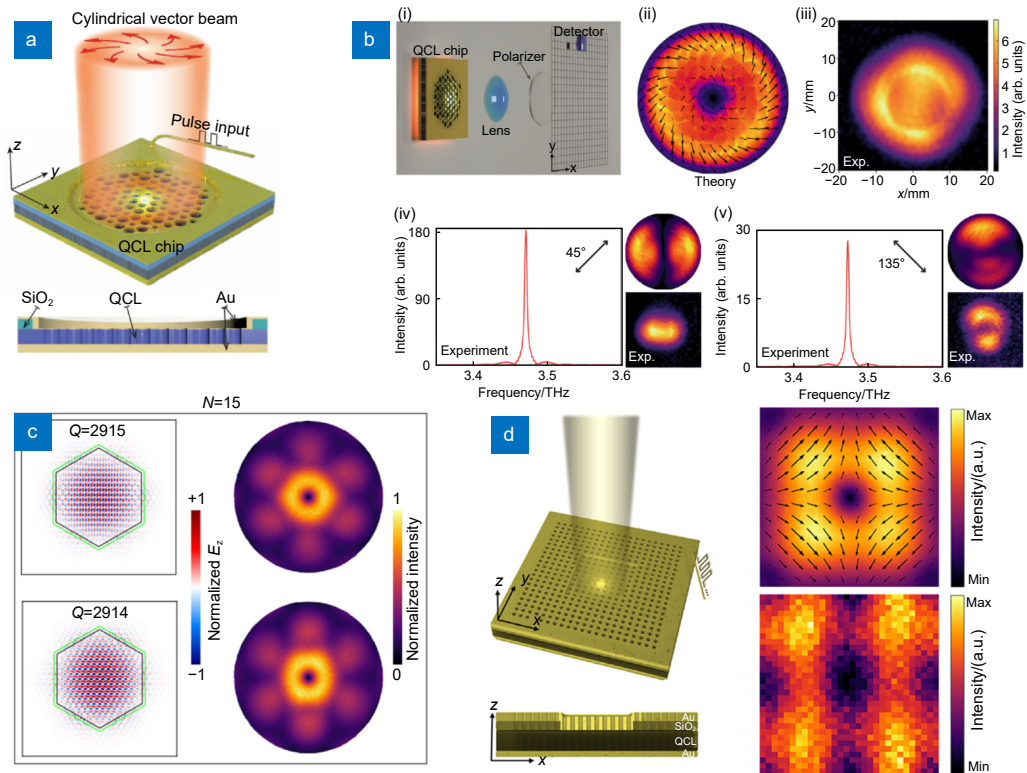


图 3 基于量子级联激光器的太赫兹矢量光束的产生。(a, b) 具有偏振缠绕发射的量子级联激光器<sup>[67]</sup>;  
(c) 电泵紧凑型拓扑体激光器<sup>[68]</sup>; (d) 单模电泵浦太赫兹激光器<sup>[69]</sup>

Fig. 3 Generation of terahertz vector beams based on quantum cascade lasers. (a, b) Quantum cascade laser with polarization-winding emission<sup>[67]</sup>; (c) Electrically-pumped compact topological bulk lasers<sup>[68]</sup>; (d) Single-mode electrically pumped terahertz laser<sup>[69]</sup>

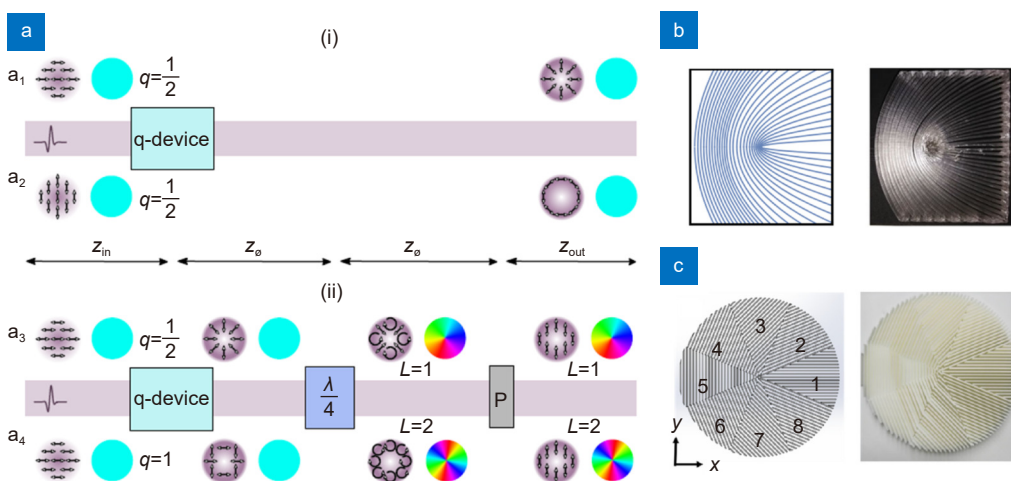


图 4 基于双折射波片的太赫兹矢量光束的产生。(a) Q 板用于矢量光束整形的不同方案<sup>[70]</sup>;  
(b) 3D 打印的连续 Q 板<sup>[72]</sup>; (c) 3D 打印的分段 Q 板<sup>[73]</sup>

Fig. 4 Generation of terahertz vector beams based on birefringent wave plates. (a) Different schemes of Q-plate for vector beam shaping<sup>[70]</sup>;  
(b) 3D printed continuous Q-plate<sup>[72]</sup>; (c) 3D printed segmented Q-plate<sup>[73]</sup>



的太赫兹全电介质多模 Q 板的设计、制造和实验验证<sup>[74]</sup>。该设备由使用熔融挤出的丙烯腈丁二烯苯乙烯 (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) 3D 打印制造的空间变化双折射板组成, 能够以离散频率间隔实现径向和角向矢量光束。

### 2.2.2 超表面

超表面 (Metasurface) 是由微纳结构排列而成的二维器件, 通过设计亚波长结构单元的形状、空间朝向和对称性等特性, 可以实现所需的振幅、相位和偏振响应。相较于传统的三维结构, 超表面具有体积更小、制备更容易、控制更精准的优势。近年来, 超表面已广泛应用于光学器件的设计和制备, 如透镜、偏振器、分束器、光学互联器和光学传感器等, 推动了光学技术的快速发展。超表面实现电磁波波前调控的主要原理可以分为传输相位型、几何相位型和共振相位型。传输相位型超表面主要利用电磁波在传播过程中累积的相位差来实现相位调控。通过调节每个单元的尺寸, 可以改变赋予入射光束的传输相位。几何相位型超表面则利用电磁波在偏振态转换过程中由于几何路径的不同而产生的相位差。几何相位在超表面设计中多基于 Pancharatnam-Berry (PB) 相位原理。当光束发生偏振变换时, 由于路径不同, 产生额外的 PB 相位差。共振相位型超表面通过合理设计微结构单元的几何形状、尺寸和材料参数来控制共振频率。当入射电磁波的频率与共振频率匹配时, 会出现共振现象, 导致相位突变, 从而实现对电磁波相位的调控。利用超表面的小型化和易于集成的优势, 可以方便灵活地生成具有不同特性的太赫兹矢量光束<sup>[75-81]</sup>。

早在 2003 年, Papakostas 等人就提出, 打破面内镜像对称性和高阶旋转对称性的手性超表面具有偏振旋转特性<sup>[82]</sup>。2012 年, Kang 等人提出了一种基于局域波导谐振机制的超材料设计, 用于实现非均匀和各向异性的有效介质<sup>[83]</sup>。该设计成功地产生了混合矢量场, 特别是带有涡旋相位的角向偏振的扭曲矢量场, 为在太赫兹范围内创建突破现有矢量场功能的奇异矢量场带来了希望。2015 年, Xie 等人提出了一种矢量太赫兹光束产生方案<sup>[84]</sup>。该方案利用亚波长金属光栅调节太赫兹辐射的偏振, 并通过光生载流子的太赫兹计算全息图动态调节太赫兹光束的振幅和相位分布, 生成了一束径向偏振太赫兹光束和一束拓扑电荷为 1 的矢量太赫兹涡旋光束。2017 年, Guo 等人提出了一种使用单层超表面同时调制入射波的振幅和偏振的

新方法<sup>[85]</sup>。这种超表面设计可以产生径向偏振洛伦兹光束, 并可用于生成各种复杂的光场和计算机生成的偏振全息图的重建。2020 年, Xu 等人提出了一种有效生成携带轨道角动量的太赫兹圆柱形矢量光束的通用方法<sup>[86]</sup>。其原理示意图如图 5(a) 所示, 多通道传输是通过使用空间变化介电超表面, 利用两个圆偏振分量之间的干涉实现的。这种方法通过同时操纵每个结构的动态相位和几何相位, 赋予矢量光束设计更大的自由度, 成功实现了偏振相关的太赫兹矢量涡旋光束和矢量贝塞尔光束。2021 年, Zhou 等人提出了一种在太赫兹频率下工作的超薄独立式超表面<sup>[87]</sup>, 基于线偏振激发可有效生成具有任意定义的拓扑电荷的矢量涡旋光束。这种超表面由薄石英板隔开的双层金属图案组成, 其中一层控制透射偏振, 另一层控制透射相位。通过制造两个超表面, 成功生成了具有均匀相位和涡旋相位的径向偏振矢量光束, 并在 0.14 THz 下进行了测试。Wu 等人提出并演示了一种通用设计策略, 以实现相位、振幅和偏振的完全控制<sup>[88]</sup>。通过在元分子设计中引入多个元原子, 获得了四个几何自由度, 从而实现了基于偏振相关干涉的正交线性偏振的振幅和相位的独立控制。作为概念验证演示, 提出了偏振无关、偏振相关和矢量元全息图并进行了实验表征。图 5(b) 展示了偏振相关元全息图的元原子排列和振幅与相位的实验结果, 实现了高成像质量。2022 年, Wu 等人通过将螺旋相位板、轴棱锥和傅立叶变换透镜的功能集成到单层超表面中<sup>[89]</sup>, 实现了基于单层全介质超表面的完美涡旋光束发生器, 实现了偏振无关和自旋复用的完美涡旋光束。通过叠加两个完美涡旋, 证明了在混合阶庞加莱光束表面任意位置均可以产生完美庞加莱光束。接下来, Li 等人提出了一种全局调谐的石墨烯元器件<sup>[90]</sup>, 用于实现太赫兹波前的动态控制。通过耦合模式理论分析, 为此类元器件建立了通用相图, 揭示了门控石墨烯作为可调损耗, 可以驱动整个元器件在具有完全不同反射波前的两个功能之间进行切换。基于这一机制, 提出了一种如图 5(c) 所示的石墨烯控制的元器件, 可以在选通时产生偏振分布连续变化的太赫兹矢量光束。Zhao 提出了一种三层金属太赫兹超表面, 用于多通道偏振生成和相位调制<sup>[91]</sup>。设计实现的角向偏振太赫兹矢量光束发生器可用作太赫兹偏振分析仪。2023 年, Li 等人展示了一种受二进制编码方法启发的多功能设计, 用于在全硅超表面上生成离轴矢量太赫兹光束<sup>[92]</sup>。所提

出的设计可以在预定义平面上生成任意阶的矢量涡旋光束。通过引入纬向偏振控制因子，具有高空间分辨率的超表面器件可以在焦平面的原始中心周围引入不同的相位差，从而能够有效操纵具有不同偏振剖面的三维太赫兹矢量场。Ke 等人介绍了一种利用低折射率超材料设计的透射型圆柱矢量光束发生器<sup>[93]</sup>。采用 3D 打印技术制备了矢量光束发生器模块和超透镜模块，并在太赫兹频段对样品进行了近场测试。图 5(d) 展示了超材料矢量光束发生器与超光栅透镜物

理级联后获得的矢量光场的紧聚焦特性。

除了上述介绍的标量太赫兹波通过波束整形超表面后直接生成矢量光束外，在传播方向上从标量场逐渐演化为矢量场的时空变换光束具有更加吸引人的特性<sup>[32]</sup>。在这方面，天津大学姚建铨院士领导的团队展开了一系列成效显著的工作。2022 年，首次提出了一种通用的全介电超表面平台<sup>[94]</sup>，可在太赫兹频段产生纵向变化的矢量涡旋光束，如图 5(e) 所示。通过表征一系列矢量涡旋光束的拓扑电荷和偏振态演化的超

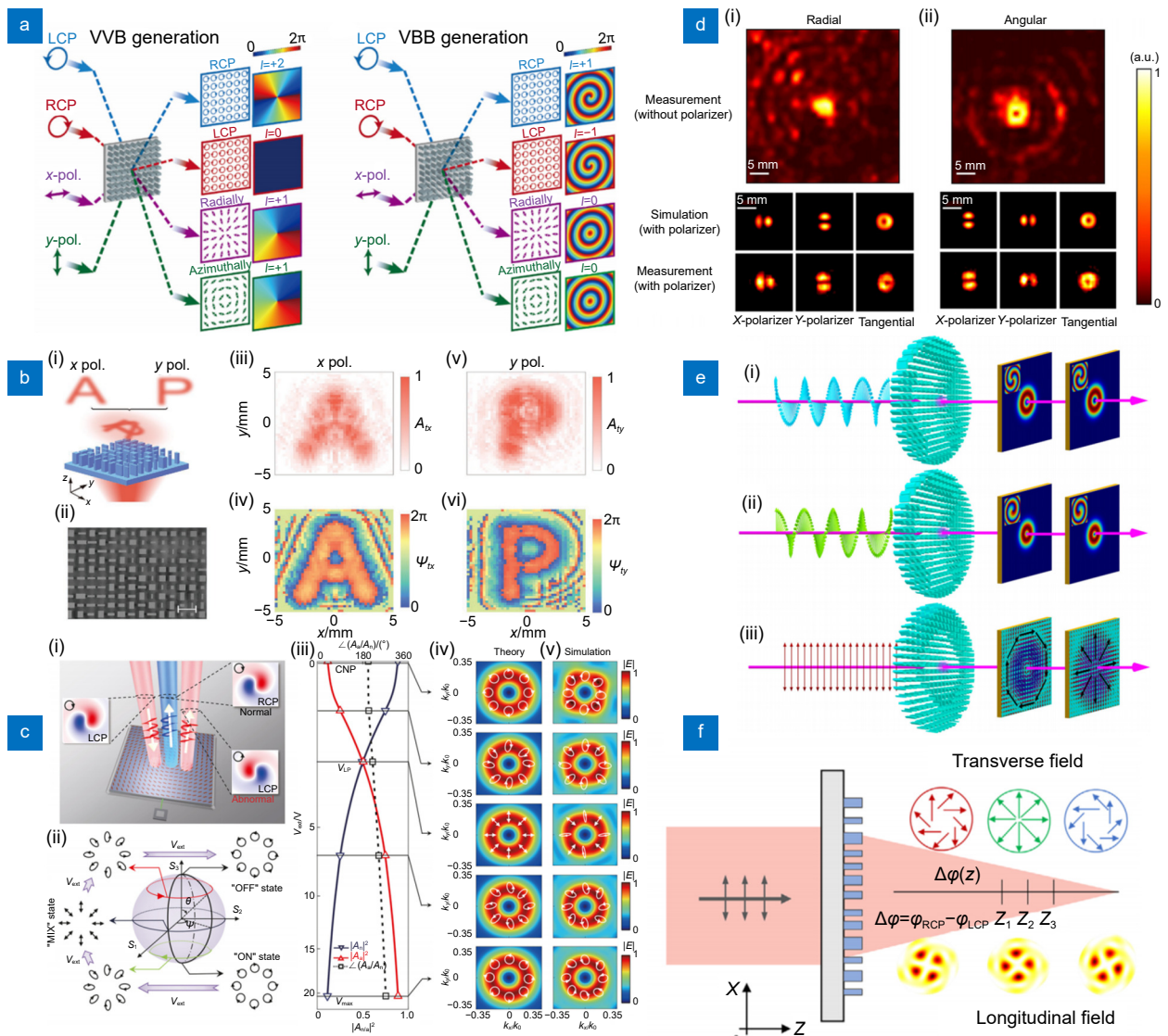


图 5 基于超表面的太赫兹矢量光束的产生。(a) 基于自旋解耦相位控制的介电超表面<sup>[86]</sup>；(b) 用于完全控制相位、振幅和偏振的介电超表面<sup>[88]</sup>；(c) 动态控制太赫兹波的石墨烯元器件<sup>[90]</sup>；(d) 圆柱矢量光束紧聚焦场<sup>[93]</sup>；(e) 纵向变化的矢量涡旋光束<sup>[94]</sup>；(f) 沿传播方向的结构矢量场操控<sup>[95]</sup>

Fig. 5 Generation of terahertz vector beams based on metasurfaces. (a) Dielectric metasurfaces via spin-decoupled phase control<sup>[86]</sup>; (b) Dielectric metasurfaces for complete control of phase, amplitude, and polarization<sup>[88]</sup>; (c) Graphene meta-devices for dynamically controlling terahertz waves<sup>[90]</sup>; (d) Tight focusing field of cylindrical vector beams<sup>[93]</sup>; (e) Longitudinally varying vector vortex beams<sup>[94]</sup>; (f) Structured vector field manipulation of along the propagation direction<sup>[95]</sup>

表面示例, 充分验证了该方案的可行性。随后, 又提出了一种沿传播方向生成和操纵结构化矢量光场的新方法<sup>[95]</sup>, 并使用全硅超表面在太赫兹波段进行了演示。如图 5(f) 所示, 通过长焦深和多焦点超透镜实现了正交圆偏振太赫兹波的相干叠加, 并通过路径累积或初始相位设计在传播方向上引入变化的相位差, 从而获得连续变化或独立设计的多平面矢量偏振分布。紧接着, 又利用在太赫兹频段工作的单层全硅超表面实现了沿传播方向具有不均匀偏振轮廓的铅笔状光束<sup>[96]</sup>。通过引入代表初始相位差的纬向偏振控制因子, 能够根据扩展的焦深实现近乎均匀地操纵纵向偏振态的演化趋势。通过操纵两个正交圆偏振通道内的拓扑电荷实现相干叠加, 可以在所需平面上生成具有矢量特性的聚焦涡旋光束。2023 年, 使用自旋偏振复用编码技术设计全硅超表面, 证明了从标量涡旋到矢量涡旋光束的纵向演化<sup>[97]</sup>。制造了一系列全硅样品, 以实验评估从标量光束到涡旋光束的转换能力, 为多维光学捕获提供了极大的便利。然后, 又提出了一种用于双通道太赫兹波传输控制的新型圆极化复用超表面<sup>[98]</sup>。基于两个异质元原子(分别为自旋去耦和各向同性), 通过空间集成实现了同时使用四个相位通道, 从而在沿光路的不同圆偏振通道中实现了矢量和标量光束之间的切换。为了控制更多的电场分量, 将聚焦波前设计与矢量或标量场相结合, 并利用聚焦诱导的自旋轨道耦合效应, 实现了纵向电场分量的复振幅切换。除此之外, 国内外的其他团队也开展了一些相关的工作。2024 年, Hu 等人提出了两种用于纵向空间偏振操纵的全介电太赫兹超表面<sup>[99]</sup>: 每个焦点处具有不同偏振状态的纵向双焦点超透镜, 以及可以同时生成均匀偏振的聚焦光束和沿传播路径具有不同偏振的矢量光束的多功能超透镜。此外, 展示了基于超透镜的偏振调制特性测量电介质厚度的可行性。He 等人提出了一种自旋解耦的空间分割方法, 以根据需要生成具有可定制模式数的复杂 3D 矢量光场<sup>[100]</sup>。作为概念验证演示, 设计了能够生成纵向变化的高阶圆柱矢量场的超表面, 实验结果证明了该方法能够以任意模式组合精确控制 3D 矢量光场的有效性和潜力。

### 2.2.3 液 晶

液晶也是适用于太赫兹矢量光束调制器的有前景的各向异性材料, 能够通过几何相位整形来操纵太赫兹波前。这是因为液晶分子具有可控的长短轴分布,

并且对外部电场、磁场和温度敏感<sup>[101-106]</sup>。由于在太赫兹波段, 所需液晶层的厚度较大, 并且外部工作电压或磁场大, 导致预取向困难、响应速度慢等问题, 因此液晶分子的高双折射对于精确的偏振控制就显得非常重要。在常用的液晶材料中, 最适合太赫兹光束整形应用的是 LC NJU-LDn-4, 在 0.5~2.5 THz 范围内平均双折射为 0.306<sup>[107]</sup> 和向列液晶 E7, 在 0.2~1.2 THz 频率范围内双折射率为 0.130<sup>[108-109]</sup>。迄今为止, 针对反射或透射操作模式、相位转换和高保真度, 已经提出了一些基于液晶的太赫兹偏振器件<sup>[107-112]</sup>。并且通过液晶引入连续且一致变化的相移, 可以形成不同阶数的涡旋光束<sup>[113-115]</sup>。通过将液晶与超表面相结合, 可以获得液晶调制与超表面调制共同作用的太赫兹调制器<sup>[116-121]</sup>。由于超表面的设计不依赖于传统的斯涅尔定律和传播相位累积, 因此可以更加紧凑、高效、快速地实现任意功能, 这些方案同样适用于太赫兹矢量光束的生成。2024 年, Wang 等人就提出了一种基于液晶超表面的可调谐太赫兹偏振涡旋光束发生器<sup>[122]</sup>, 还通过实验证明了偏振图案和圆柱矢量光束的电可调生成。图 6(a) 展示了基于液晶的可调谐圆柱矢量光束发生器的示意图, 该装置由两层金属层和中间的液晶夹层组成。圆偏振光入射的情况下, 当电压偏置关闭时, 反射光束为径向偏振光束, 当电压偏置打开时, 反射光束切换为角向偏振光束。晶胞结构分解图如图 6(b) 所示, 顶层和底层是 500  $\mu\text{m}$  厚的石英基板, 200 nm 厚的金膜结构制作在石英基板上, 中间层为 25  $\mu\text{m}$  厚的液晶。图 7(c) 和 7(d) 分别是可重构偏振图案和矢量光束的测量结果, 充分证明了该方案能够生成可重构的太赫兹矢量光束, 可以为无线通信和超分辨率成像应用开辟新的可能性。

### 2.2.4 全内反射器件

到目前为止, 在太赫兹频率范围内已经开发出了几种全内反射器件<sup>[123-125]</sup>, 这些器件的工作原理是通过全内反射引入非对称相移, 从而改变局部的偏振态。需要强调的是, 由于这些材料在太赫兹频率范围内具有平坦的色散特性, 因此全反射相移与波长无关。这使得全内反射器件成为宽频率范围内消色差器件最有前途的候选者之一。2015 年, Wakayama 等人使用一种由聚四氟乙烯制成的太赫兹消色差轴对称波片<sup>[123]</sup>, 能够测量在 0.1~1.6 THz 频率范围内任意偏振光束的偏振态。通过图 7(a) 所示的光路, 偏振太赫兹光束被转换成没有空间或波长色散的太赫兹矢量涡旋光束,

并成功重建了入射太赫兹光束的未知偏振态。2018年, 该课题组又在另一项研究中, 利用了一种消色差非轴对称波片<sup>[124]</sup>, 首次演示了通过减小涡旋相位实现具有径向偏振的纯矢量光束, 如图7(b)所示。实验成功产生了0.36 THz的具有径向偏振和均匀相位的矢量光束, 其中矢量光束的涡旋相位低于4%。2021年, Niwa 等人提出并演示了一种从自旋电子太赫兹

兹发射器产生太赫兹圆柱形矢量光束的方法<sup>[125]</sup>。通过将自旋电子发射器放置在两个极性相反的磁体之间, 如图7(c)所示, 产生了HE<sub>21</sub>模式, 这是一种类似于四极分布的极化模式。通过使用三角硅棱镜实现适当的模式转换, 获得了角向和径向的太赫兹矢量光束。

除了上述介绍的常见波束整形器件之外, 还存在其他一些用于产生太赫兹矢量光束的方法。例如,

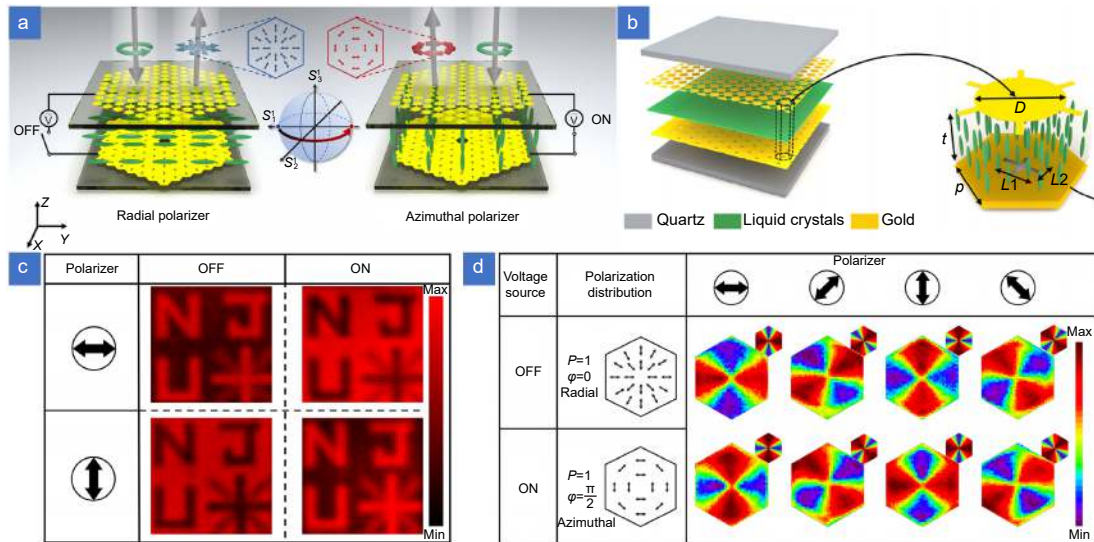


图6 基于液晶的太赫兹矢量光束的产生<sup>[122]</sup>。(a)可调谐圆柱矢量光束发生器的示意图; (b)晶胞结构分解图; (c)可重构偏振图案的测量结果; (d)可重构矢量光束的测量结果

Fig. 6 Generation of terahertz vector beams based on liquid crystal<sup>[122]</sup>. (a) Schematic of tunable cylindrical vector beams generator; (b) Exploded view of the structure of a unit cell; (c) Measurement results of reconfigurable polarization patterns; (d) Measurement results of the reconfigurable vector beams

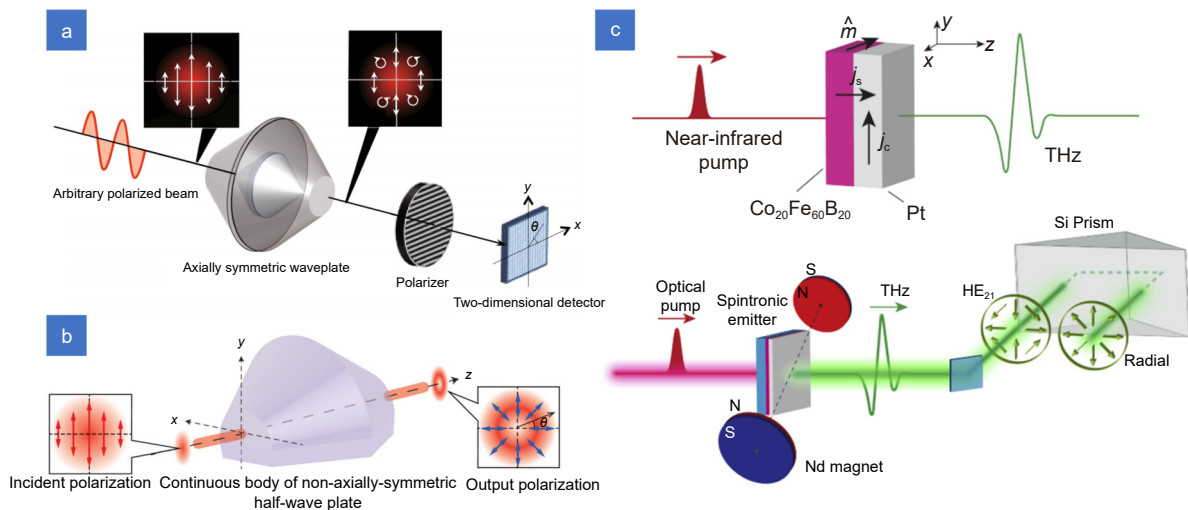


图7 基于全内反射器件的太赫兹矢量光束的产生。(a)消色差轴对称波片<sup>[123]</sup>; (b)消色差非轴对称波片<sup>[124]</sup>; (c)自旋电子太赫兹发射器生成角向和径向偏振太赫兹光束<sup>[125]</sup>

Fig. 7 Generation of terahertz vector beams based on total internal reflection device. (a) Achromatic axially symmetric wave plate<sup>[123]</sup>; (b) Achromatic non-axisymmetric wave plate<sup>[124]</sup>; (c) Generation of azimuthally- and radially-polarized terahertz beams from a spintronic terahertz emitter<sup>[125]</sup>

2008年, Grosjean 等人提出了一种无源系统, 能够将线偏振太赫兹光束转换为径向偏振光束<sup>[126]</sup>。这是通过将基于光纤模式选择的概念扩展到太赫兹频率和波导来实现的。在 0.1 THz 频率下进行了验证, 并成功在圆形波导的输出端产生径向偏振光束。另外, 在 2022 年的一项研究中<sup>[127]</sup>, Fan 等人提出了使用金属波导阵列同时操纵两个正交偏振分量的波前和相位差, 以实现相位和偏振方向的独立空间分布。通过使用紧凑的金属波导阵列, 可以实现多个太赫兹器件的功能集成, 包括分别将透镜与四分之一波片、半波片和矢量光束发生器进行集成。

### 3 太赫兹矢量光束的应用

太赫兹矢量光束结合了太赫兹波的独特性质和矢量光束的特点, 在多个领域中展现了广泛且显著的应用潜力。首先, 太赫兹矢量光束在通信和信息技术领域具有重要应用。其高频率和宽带特性使其成为高速数据传输和无线通信的理想选择。此外, 太赫兹矢量光束的独特偏振状态和复杂空间结构为信息编码和加密提供更加丰富的复用空间。其次, 太赫兹矢量光束在材料科学和表征方面发挥关键作用。太赫兹波与物质相互作用的特性使得太赫兹矢量光束能够研究材料的电磁特性、晶体结构和分子振动等信息。这种能力使其在研究太赫兹波与物质的相互作用动力学等方面具备潜在应用价值。另外, 太赫兹矢量光束在生命科学领域也具有重要的应用前景。它可用于分析生物大分子的结构以及研究蛋白质折叠和药物相互作用等动态过程。同时, 太赫兹矢量光束对生物组织有较强的穿透能力, 因此在医学影像学和生物医学诊断方面也具备潜在的用途。本部分将主要介绍太赫兹矢量光束在无色散传输、偏振测量、成像传感、矢量全息和电子动力学等领域的典型应用。

#### 3.1 无色散传输

径向偏振光束由于其对称性, 非常适合在介质波导中高效传输。径向偏振的太赫兹波可以通过金属线上的等离子体引导传输, 称为索末菲波, 具有低衰减和低色散的特性。与线偏振光束的模式转换相比, 直接生成径向偏振光束的耦合效率更高。早在 2004 年, Wang 等人就展示了如何使用简单的波导(即裸金属线)来传输几乎无色散、低衰减且结构简单的太赫兹脉冲<sup>[17]</sup>。图 8(a) 展示了用于表征金属线波导上电磁模式传播的光学装置。水平偏振的太赫兹脉冲通过光纤

耦合的光电导发射器产生, 并聚焦到直径为 0.9 mm 的不锈钢波导上。在焦点处放置第二根垂直于波导的不锈钢丝, 作为输入耦合器, 在波导周围的空间中可激发径向偏振模式。同时, 使用光纤耦合的光电导接收器在波导末端检测传播脉冲的电场。2006 年, 他们使用有限元法模拟计算了输入耦合效率, 并进行了实验验证<sup>[18]</sup>。仿真结果表明, 一种新型的径向对称光电导天线可以代替标准线性偶极子天线, 实现大于 50% 的耦合效率。实验结果证实, 这种天线可以产生太赫兹辐射, 耦合到径向波导模式, 效率大大提高。径向偏振模式被激发并在 27 cm 长的线波导上传输, 在波导末端检测到的峰值太赫兹电场的大小比在移除波导的相同位置检测到的电场大二十倍。2013 年, Zheng 等人演示了宽带径向偏振太赫兹脉冲光束与裸铜线的高效耦合<sup>[55]</sup>。实验装置是如图 8(b) 所示的太赫兹时域光谱, 泵浦光束通过分段半波片模式转换器产生径向偏振太赫兹光束, 然后经透镜聚焦耦合到一根长 20 cm、半径为 0.5 mm 的直铜线, 在铜线的另一端放置光电导天线用于太赫兹检测。测量到总耦合效率高达 16.8%, 在 0.3 THz 时, 最大耦合效率为 66.3%。图 8(c) 中黑线代表输出平面处的太赫兹波电场的波形, 红线分别代表从装置中移除铜线的情况下测量的波形和在方位角偏振模式输入耦合的情况下测量的波形, 证明了只有径向偏振模式能够高效耦合到波导中进行传输。2016 年, Navarro-Cía 等人演示了利用半导体表面产生太赫兹脉冲的效应, 将太赫兹脉冲发射到同轴波导中<sup>[19]</sup>。通过控制光学激发光束的直径, 可以调节生成的径向偏振太赫兹脉冲的空间轮廓, 并实现与空心同轴太赫兹波导模式的有效耦合, 其原理示意图如图 8(d) 所示。这种方法导致宽带太赫兹脉冲的准单模无色散传输, 与之前演示的支持基本径向偏振模式的同轴波导激励方案不同, 所提出的方法不需要外部偏置, 并且可以针对各种直径的同轴波导进行调整。

#### 3.2 偏振测量

矢量光束通过偏振器后具有特定的光场分布, 这为精确偏振测量带来了希望。2015 年, Wakayama 等人使用太赫兹消色差轴对称波板确定任意偏振太赫兹光束(0.1~1.6 THz)的偏振态<sup>[123]</sup>, 该板由聚四氟乙烯制成。偏振太赫兹光束被转换为没有空间或波长色散的太赫兹矢量涡旋光束, 并且重建了入射太赫兹光束的未知偏振态, 还在 0.16 和 0.36 THz 频率下演示了

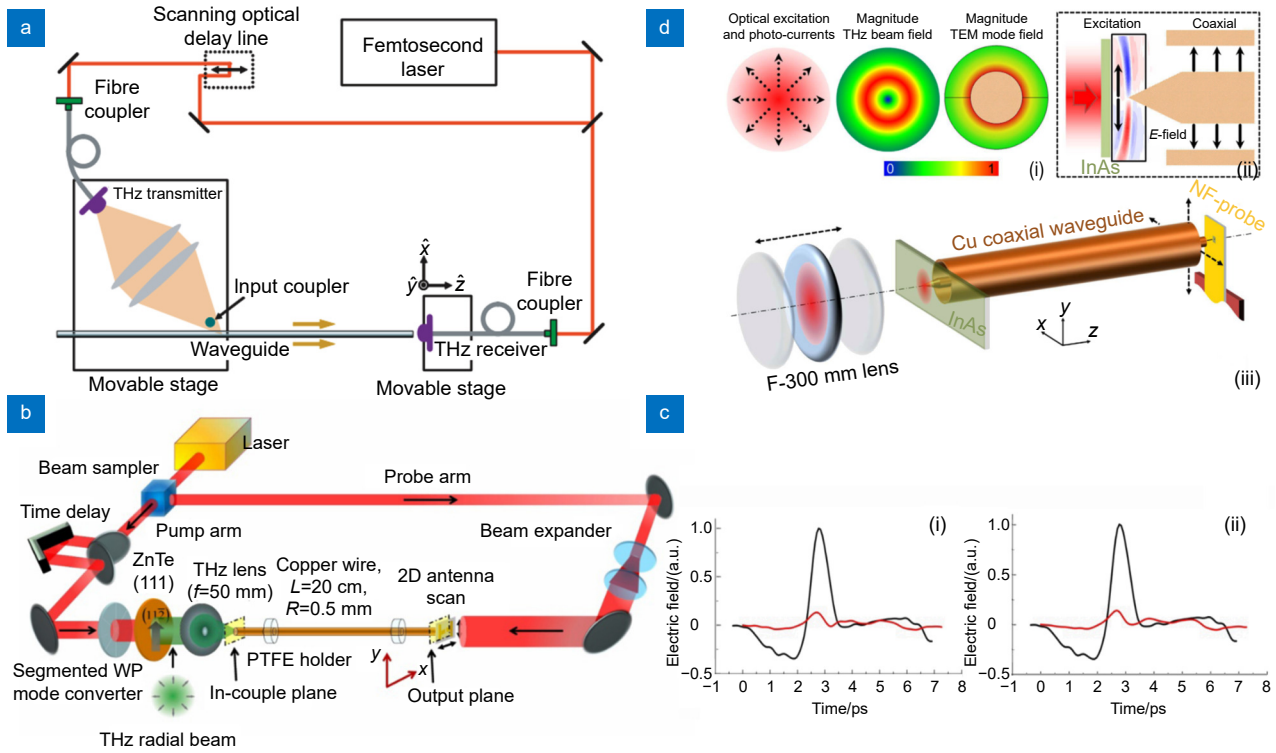


图 8 太赫兹脉冲的无色散传输。(a) 金属波导无色散传输太赫兹脉冲<sup>[17]</sup>；(b, c) 宽带径向偏振太赫兹脉冲光束与波导的高效耦合<sup>[65]</sup>；(d) 半导体表面产生太赫兹脉冲发射到同轴波导<sup>[19]</sup>

Fig. 8 Non-dispersive transmission of terahertz pulses. (a) Non-dispersive transmission of terahertz pulses through metal waveguides<sup>[17]</sup>; (b, c) Efficient coupling of broadband radially polarized terahertz pulse beams to waveguides<sup>[65]</sup>; (d) Launching terahertz pulses generation at the semiconductor surfaces into coaxial waveguides<sup>[19]</sup>

偏振测量。图 9(a) 展示了入射太赫兹光束为线偏振和任意偏振时测量的图像和相应的入射及测量的偏振态。这种矢量涡旋分析能够从太赫兹图像中确定入射太赫兹光束的偏振态。2020 年, Yue 等人利用设计的超表面产生高阶矢量光束, 实现了高灵敏度偏振旋转测量<sup>[28]</sup>, 其动态范围达到 180°, 灵敏度约为 0.01°。图 9(b) 展示了该装置的光路示意图和测量结果。通过叠加两个携带相反轨道角动量的涡旋光束, 该装置能够产生与方位角相关的偏振分布的矢量光束, 经过线偏振器后, 光束的空间强度分布变为 60 个波瓣。通过在相机上跟踪其中两个波瓣的位移, 可以高分辨率地获取输入偏振态的旋转信息。2024 年, Tian 等人提出了一种将离轴双焦点与矢量涡旋光束集成用于偏振检测的超紧凑介电超表面<sup>[20]</sup>, 使用三个不同焦平面上的不同偏振状态来评估偏振检测能力。其原理示意图如图 9(c) 所示, 第一和第二列分别是不同偏振光入射时  $x-z$  焦平面和  $x-y$  焦平面中的强度分布, 第三列是相应的相位分布。太赫兹波的椭圆率和手性可以通过两个离轴聚焦点的电场强度比来确定。线性偏振波

的长轴方向可以通过提取矢量涡旋光束的方位角来确定。图 9(d) 展示了对椭圆率、手性和长轴方向的测量结果。椭圆率的相对偏差在 0%~5.3% 的范围内, 使用 15 阶矢量涡旋光束的长轴方向的相对偏差约为 0.01%, 长轴方向的灵敏度约为 6°。高阶矢量涡旋光束得益于其高角分辨率特性表现出增强的灵敏度。

### 3.3 成像传感

与线偏振光束相比, 太赫兹矢量光束可以更紧密地聚焦, 并且在焦点处具有更强的纵向电场/磁场分量, 为研究太赫兹波与物质相互作用提供了新的可能性。2019 年, Fujita 等人探索了使用角向偏振光束来研究和控制物质的电磁特性<sup>[21]</sup>, 证明太赫兹脉冲的角向偏振光束可以作为独特而强大的工具, 用于对物质的磁特性进行时间分辨光谱的测量, 从而加深对物质非平衡磁特性的理解。图 10(a) 展示了紧密聚焦的角向偏振光束的示意图, 其中箭头表示电磁场的方向, 可以看出在焦点附近, 光束的方位角分量较小, 而磁场的纵向分量则变得突出。与传统的高斯光束相比, 小样品的电场对光的吸收被强烈抑制。方位角电

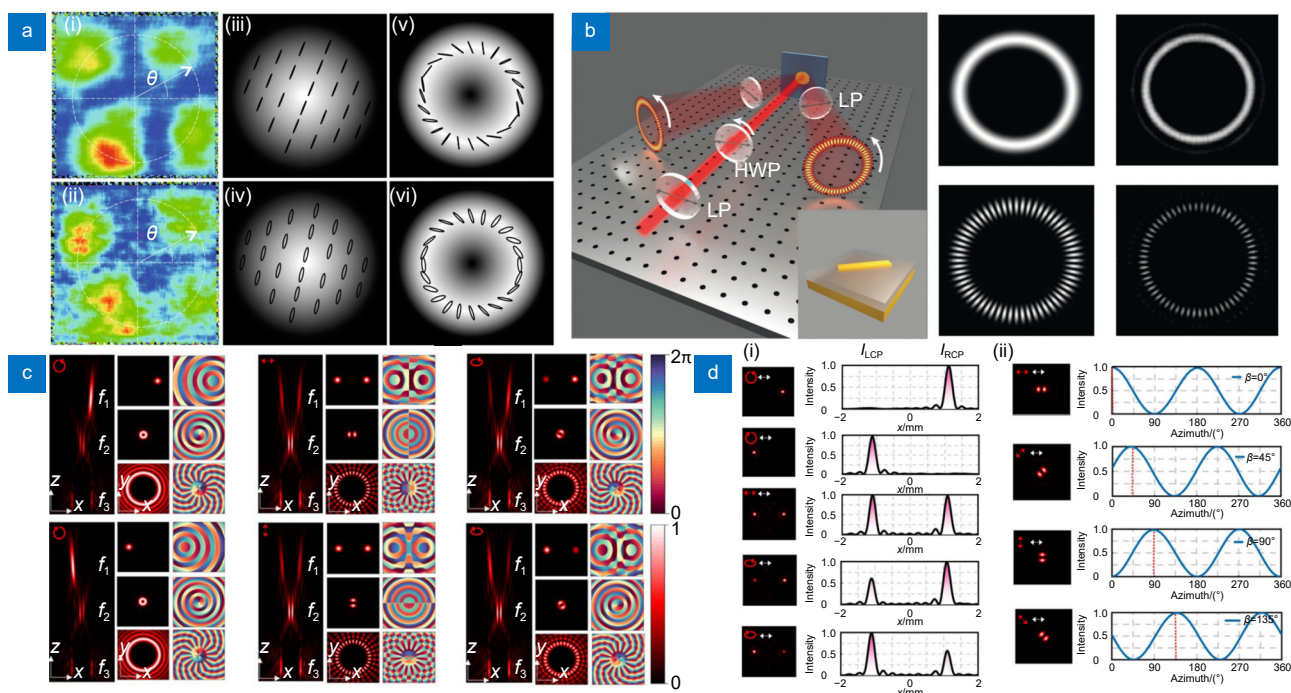


图9 偏振测量。(a) 矢量涡旋分析测量偏振<sup>[123]</sup>; (b) 高灵敏度偏振旋转测量<sup>[28]</sup>; (c, d) 三合一偏振探测器<sup>[20]</sup>

Fig. 9 Polarization measurement. (a) Vector vortex analysis for polarization measurements<sup>[123]</sup>; (b) Highly sensitive polarization rotation measurements<sup>[28]</sup>; (c, d) Three-in-one polarization detector<sup>[20]</sup>

场也可以耦合循环电流并动态产生轨道磁化强度。可以利用这些特性来研究拓扑材料中的循环边缘模式。2023年, Lamberg 等人研究了波前修正的矢量光束在角膜光谱学中的应用<sup>[22]</sup>, 并将原始分析误差降低到0.5%以下。矢量光束是由开发的3D角谱方法合成的, 并扩展到矢量球面谐波表示, 从而实现了对具有100层角膜模型的散射分析和波前修正。图10(b)展示了具有球面匹配波前的人射径向和角向偏振光束经过角膜的电场。与高斯光束相比, 经过波前修正的球面矢量光束在角膜光谱上具有更高的精度, 并且在聚焦方面具有更强的鲁棒性。2024年, Jana 等人利用量子控制的方法以全光学方式生成了角向偏振的太赫兹脉冲<sup>[46]</sup>, 其空间和时间分辨磁场具有强的、隔离的纵向分量。应用生成的太赫兹脉冲对环境空气中的水蒸气进行了光谱测量。图10(c)展示了在潮湿空气条件下测量的脉冲电场的结构和时空谱图, 以及计算出的潮湿空气中脉冲的磁场结构和时空谱图。这类脉冲可以用作光谱学、成像和磁性材料的独特探针。同年, Hu 等人提出了两种用于纵向空间偏振操纵的全介电太赫兹超表面, 并基于超透镜的偏振调制特性演示了二氧化硅介质片厚度的测量<sup>[99]</sup>。图10(d)展示了在监测点处电场的 $x$ 分量的横向偏振角随厚度变化的模拟

结果, 可以看出随着二氧化硅介质片厚度的增加, 横向偏振角明显顺时针旋转, 这表明矢量束整体强度方向随着被测介质片厚度的增加而变化。因此, 通过分析矢量的旋转角度即可确定介质片的厚度。

### 3.4 矢量全息

太赫兹矢量全息是一种利用太赫兹辐射进行全息成像的技术, 可以实现对太赫兹波的振幅、相位和偏振信息的同时记录和重建, 从而提供更丰富的图像信息。2021年, Wu 等人通过利用由多个元原子(即元分子)组成的介电晶胞实现对光学特性的完全控制<sup>[88]</sup>。实验演示了矢量元全息图, 如图11(a)所示, 不同偏振的入射光能够实现不同的全息图案, 并且测量的强度和相位分布均实现了高成像质量。这是由于元分子具有足够的自由度, 能够完全记录目标的图像信息。这一策略为制备具有各种所需功能的光学器件开辟了直接途径。2022年, Zhao 等人提出了一种三层金属太赫兹超表面, 用于多通道偏振生成和相位调制<sup>[91]</sup>。矢量全息图超表面装置的示意图如图11(b)所示。当圆偏振太赫兹波入射到超表面时, 可以在八个偏振通道中生成不同的全息图, 这是由于传输的太赫兹波的相位和偏振可以单独调制。此外, 通过实验证明了具有不同线性偏振状态的八个通道的矢量全息图, 通过

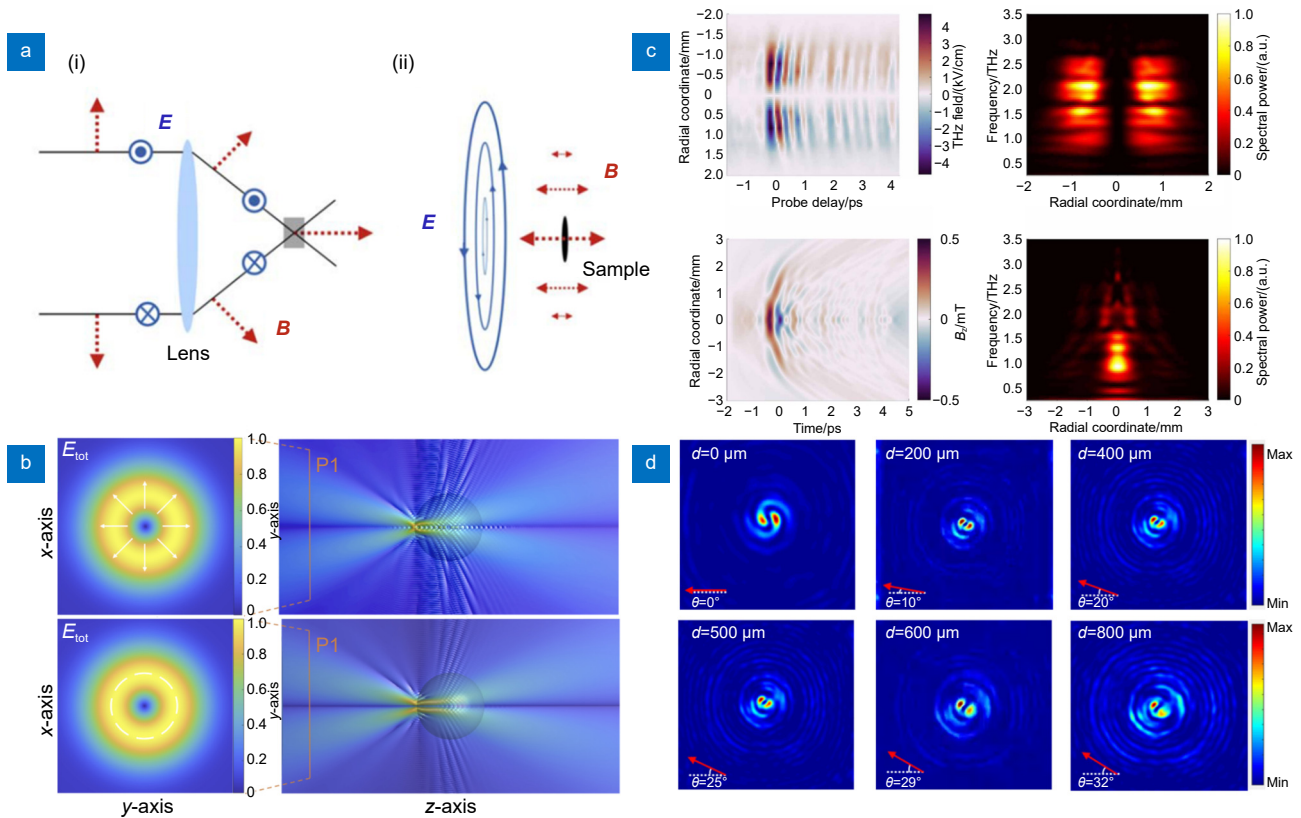


图 10 成像传感。(a) 角向偏振光束获取物质的电磁特性<sup>[21]</sup>；(b) 用于太赫兹角膜光谱的波前修正矢量光束<sup>[22]</sup>；(c) 角向偏振太赫兹脉冲对水蒸气进行光谱测量<sup>[46]</sup>；(d) 纵向演化矢量光束测量介质厚度<sup>[99]</sup>

Fig. 10 Imaging and sensing. (a) Azimuthally polarized beam used to obtain electromagnetic properties of matter<sup>[21]</sup>; (b) Wavefront-modified vector beams for terahertz cornea spectroscopy<sup>[22]</sup>; (c) Azimuthally polarized terahertz pulses for spectral measurements of water vapor<sup>[46]</sup>; (d) Longitudinally varying vector beams for measurement of media thickness<sup>[99]</sup>

选择检测的偏振通道可以隐藏不同全息图中的信息。图像隐藏的实验结果如图 11(c) 所示，分别是没有选择检测偏振态的全息图的幅度分布和图像分别隐藏在通道 1 至 8 中时的幅度分布，每个白色箭头代表相应通道的设计偏振态。这项工作有望用于太赫兹通信和光信息安全。

### 3.5 电子动力学

太赫兹波能够激发原子和物质的旋转和振动自由度的特点，引起了人们的广泛关注。2020 年，Wätzel 等人研究了不同对称性的一维和二维量子点中，径向和角向偏振光束引起的电子自旋和轨道耦合动力学<sup>[23]</sup>。研究使用径向和角向偏振的圆柱形矢量束实现自旋翻转过程，该过程是由电子态之间的跃迁引起的。如图 12(a) 所示，电荷和自旋电流密度都强烈依赖于光场的拓扑结构，径向偏振光束被禁止，而角向偏振光束则被允许。这些结果指出了通过驱动电磁脉冲的极化整形实现时空控制自旋轨道耦合的电子动力学的可能性。后来，又提出了利用太赫兹角向偏振光束来控

制量子点中两个相互作用电子的自旋和空间分布<sup>[24]</sup>。对基于 GaAs 和 InGaAs 的点进行全量子动态模拟，发现总电子自旋可以通过单重态-三重态跃迁的适当场驱动来控制。如图 12(b) 所示，研究分析了矢量束驱动的电荷密度和自旋电流密度，并确定它们是在总自旋的时空演化和并发中观察到的模式的潜在来源。结果指出了应用矢量太赫兹场来控制相互作用量子点中的电荷和自旋动力学的新途径。这些结果对于量子点应用于量子信息技术中的基本纳米级硬件元件，并根据需要快速产生适当的自旋和电荷电流具有重要意义。

## 4 总结与展望

本文比较全面地综述了太赫兹矢量光束的产生及其应用的研究进展。首先从太赫兹矢量光束的产生方案出发，介绍了不同类型的直接产生器件和波束整形器件。直接产生器件虽然转换效率相对较低，但能够以较高的泵浦激光功率和较宽的带宽进行工作。而波



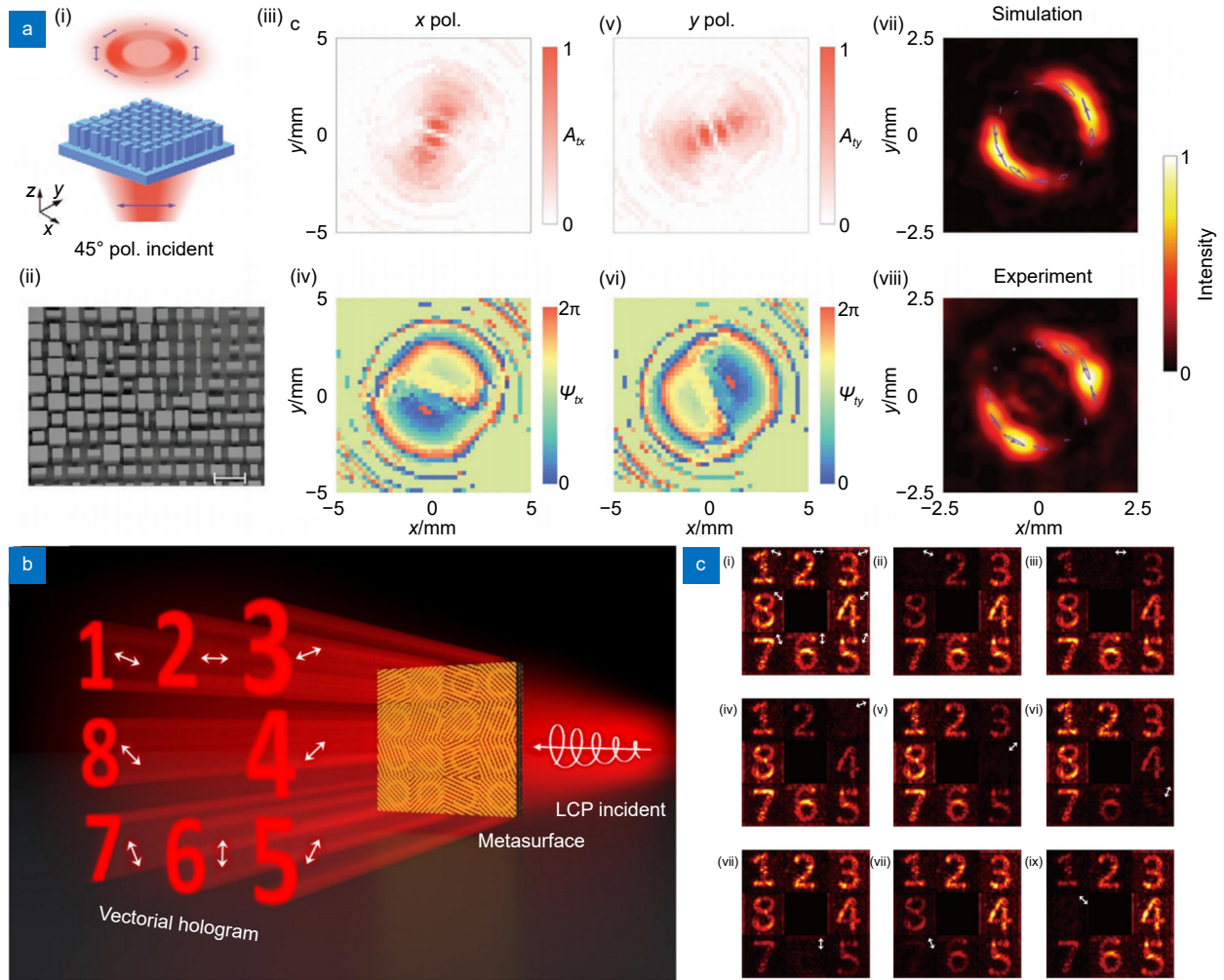


图 11 矢量全息。(a) 介质超表面用于矢量元全息图<sup>[88]</sup>；(b, c) 三层金属超表面用于多通道矢量全息图<sup>[91]</sup>

Fig. 11 Vectorial hologram. (a) Dielectric metasurface for vectorial meta-holograms<sup>[88]</sup>, (b, c) Tri-layer metallic metasurface for multi-channel vectorial holograms<sup>[91]</sup>

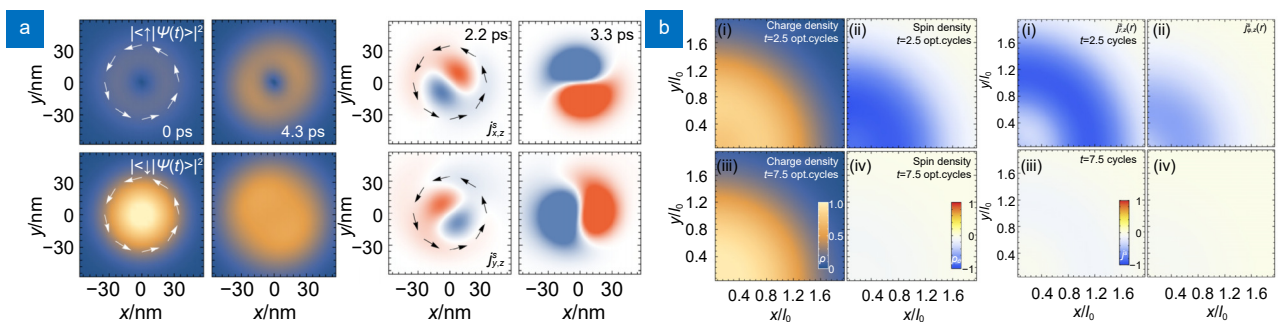


图 12 电子动力学。(a) 太赫兹矢量场驱动的电子自旋和轨道耦合动力学<sup>[23]</sup>；(b) 角向偏振光束控制量子点中两个相互作用电子的自旋和空间分布<sup>[24]</sup>

Fig. 12 Electron dynamics. (a) Coupled spin and orbital electron dynamics driven by terahertz vector fields<sup>[23]</sup>, (b) Azimuthally polarized beam steer the spin and spatial distributions of two interacting electrons in a quantum dot<sup>[24]</sup>

束整形器件的限制在于缺乏合适和理想的太赫兹波段材料，并且器件也受到相对较窄的带宽的限制。在这些器件中，太赫兹量子级联激光器和超表面将是未来

的发展趋势，具有广阔的发展前景和应用潜力。通过采用太赫兹量子级联激光器作为光源，可以实现高功率、窄线宽、连续可调谐的太赫兹辐射。太赫兹量子

级联激光器的高功率和可调谐性也使其成为安全检测、医学影像、药物分析等领域的理想选择, 促进了相关技术的发展和應用。另一方面, 传统生成矢量光束的方式通常需要复杂的光路设计和大量的装置, 这大大增加了研究成本。然而, 随着超表面的应用, 利用微纳光学的方法创造更加轻薄的器件, 以集成光学系统来替代传统光学系统来生成矢量光束, 为这方面的研究提供了更多的可能性。主动超表面的引入将允许在线调整光束整形器的性能, 甚至可能调整输出光束的拓扑电荷和/或偏振, 以满足特定需求<sup>[128-129]</sup>。将主动超表面与多层液晶相结合, 可能成为太赫兹频率范围内紧凑、高效、快速响应且可调谐的矢量光束整形器的最终解决方案<sup>[130-131]</sup>。随着技术的进一步发展和应用的深入研究, 太赫兹矢量光束将在更广泛的领域展现其潜力和应用价值。

## 参考文献

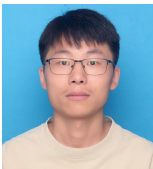
- [1] Carr G L, Martin M C, McKinney W R, et al. High-power terahertz radiation from relativistic electrons[J]. *Nature*, 2002, **420**(6912): 153–156.
- [2] Kim K Y, Taylor A J, Glowina J H, et al. Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser-gas interactions[J]. *Nat Photonics*, 2008, **2**(10): 605–609.
- [3] Hoffmann S, Hofmann M R. Generation of Terahertz radiation with two color semiconductor lasers[J]. *Laser Photonics Rev*, 2007, **1**(1): 44–56.
- [4] Mittleman D M. Twenty years of terahertz imaging [Invited][J]. *Opt Express*, 2018, **26**(8): 9417–9431.
- [5] Kawano Y, Ishibashi K. An on-chip near-field terahertz probe and detector[J]. *Nat Photonics*, 2008, **2**(10): 618–621.
- [6] Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. *J Appl Phys*, 2010, **107**(11): 111101.
- [7] Alves F, Grbovic D, Kearney B, et al. Microelectromechanical systems bimaterial terahertz sensor with integrated metamaterial absorber[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(11): 1886–1888.
- [8] Sen P, Siles J V, Thawdar N, et al. Multi-kilometre and multi-gigabit-per-second sub-terahertz communications for wireless backhaul applications[J]. *Nat Electron*, 2023, **6**(2): 164–175.
- [9] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate[J]. *Nat Photonics*, 2013, **7**(12): 977–981.
- [10] Dhillon S S, Vitiello M S, Linfield E H, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2017, **50**(4): 043001.
- [11] Fan K B, Suen J Y, Liu X Y, et al. All-dielectric metasurface absorbers for uncooled terahertz imaging[J]. *Optica*, 2017, **4**(6): 601–604.
- [12] Yang X, Zhao X, Yang K, et al. Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Trends Biotechnol*, 2016, **34**(10): 810–824.
- [13] Wang B, Zhong S C, Lee T L, et al. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: a state-of-the-art review[J]. *Adv Mech Eng*, 2020, **12**(4).
- [14] Cheng Y Y, Wang Y X, Niu Y Y, et al. Concealed object enhancement using multi-polarization information for passive millimeter and terahertz wave security screening[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(5): 6350–6366.
- [15] Chernomyrdin N V, Musina G R, Nikitin P V, et al. Terahertz technology in intraoperative neurodiagnostics: a review[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(5): 220071.
- [16] Wätzel J, Berakdar J. Open-circuit ultrafast generation of nanoscopic toroidal moments: the swift phase generator[J]. *Adv Quantum Tech*, 2019, **2**(1-2): 1800096.
- [17] Wang K L, Mittleman D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. *Nature*, 2004, **432**(7015): 376–379.
- [18] Deibel J A, Wang K L, Escarra M D, et al. Enhanced coupling of terahertz radiation to cylindrical wire waveguides[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(1): 279–290.
- [19] Navarro-Cia M, Wu J, Liu H Y, et al. Generation of radially-polarized terahertz pulses for coupling into coaxial waveguides[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**(1): 38926.
- [20] Tian X Y, Ma A N, Huang H F, et al. Three-in-one polarization detector enabled by metasurface[J]. *Phys Scr*, 2024, **99**(2): 025531.
- [21] Fujita H, Tada Y, Sato M. Accessing electromagnetic properties of matter with cylindrical vector beams[J]. *New J Phys*, 2019, **21**(7): 073010.
- [22] Lamberg J, Zarrinkhat F, Tamminen A, et al. Wavefront-modified vector beams for THz cornea spectroscopy[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(24): 40293–40307.
- [23] Wätzel J, Sherman E Y, Berakdar J. Nanostructures in structured light: photoinduced spin and orbital electron dynamics[J]. *Phys Rev B*, 2020, **101**(23): 235304.
- [24] Wätzel J, Berakdar J, Sherman E Y. Ultrafast entanglement switching and singlet-triplet transitions control via structured terahertz pulses[J]. *New J Phys*, 2022, **24**(4): 043016.
- [25] Miyamoto K, Kang B J, Kim W T, et al. Highly intense monocycle terahertz vortex generation by utilizing a Tsurupica spiral phase plate[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 38880.
- [26] Minkevičius L, Jokubauskis D, Kašalynas I, et al. Bessel terahertz imaging with enhanced contrast realized by silicon multi-phase diffractive optics[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(25): 36358–36367.
- [27] Woldegeorgis A, Kurihara T, Almassarani M, et al. Multi-MV/cm longitudinally polarized terahertz pulses from laser-thin foil interaction[J]. *Optica*, 2018, **5**(11): 1474–1477.
- [28] Yue F Y, Aglieri V, Piccoli R, et al. Highly sensitive polarization rotation measurement through a high-order vector beam generated by a metasurface[J]. *Adv Mater Technol*, 2020, **5**(5): 1901008.
- [29] Nanni E A, Huang W R, Hong K H, et al. Terahertz-driven linear electron acceleration[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 8486.
- [30] Hibberd M T, Healy A L, Lake D S, et al. Acceleration of relativistic beams using laser-generated terahertz pulses[J]. *Nat Photonics*, 2020, **14**(12): 755–759.
- [31] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(11): 937–943.
- [32] Zhang F, Pu M B, Guo Y H, et al. Synthetic vector optical fields with spatial and temporal tunability[J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2022, **65**(5): 254211.
- [33] Zhang F, Guo Y H, Pu M B, et al. Meta-optics empowered vector visual cryptography for high security and rapid decryption[J]. *Nat Commun*, 2023, **14**(1): 1946.
- [34] Bao Y J, Yu Y, Xu H F, et al. Full-colour nanoprint-hologram synchronous metasurface with arbitrary hue-saturation-

- brightness control[J]. *Light Sci Appl*, 2019, **8**: 95.
- [35] Hsiao H H, Chu C H, Tsai D P. Fundamentals and applications of metasurfaces[J]. *Small Methods*, 2017, **1**(4): 1600064.
- [36] Lepeshov S, Gorodetsky A, Krasnok A, et al. Enhancement of terahertz photoconductive antenna operation by optical nanoantennas[J]. *Laser Photonics Rev*, 2017, **11**(1): 1600199.
- [37] Kampfrath T, Tanaka K, Nelson K A. Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients[J]. *Nat Photonics*, 2013, **7**(9): 680–690.
- [38] Winnerl S, Zimmermann B, Peter F, et al. Terahertz Bessel-Gauss beams of radial and azimuthal polarization from microstructured photoconductive antennas[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(3): 1571–1576.
- [39] Kan K, Yang J, Ogata A, et al. Radially polarized terahertz waves from a photoconductive antenna with microstructures[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **102**(22): 221118.
- [40] Kaltenecker K J, König-Otto J C, Mittendorff M, et al. Gouy phase shift of a tightly focused, radially polarized beam[J]. *Optica*, 2016, **3**(1): 35–41.
- [41] Deveikis J, Lloyd-Hughes J. Multi-pixel photoconductive emitters for the controllable generation of azimuthal and radial terahertz beams[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(24): 43293–43300.
- [42] Mou S, D'Arco A, Tomarchio L, et al. Simultaneous elliptically and radially polarized THz from one-color laser-induced plasma filament[J]. *New J Phys*, 2021, **23**(6): 063048.
- [43] Han B N, Chen Y P, Xia T H, et al. Measurement and control of radially polarized THz radiation from DC-biased laser plasma filaments in air[J]. *Sensors*, 2022, **22**(14): 5231.
- [44] Wang L Z, Chen Y P, Zhang G W, et al. Tunable high-field terahertz radiation from plasma channels[J]. *Laser Photonics Rev*, 2023, **17**(6): 2200627.
- [45] Nikolaeva I A, Shipilo D E, Panov N A, et al. Terahertz beam with radial or orthogonal to laser polarization from a single-color femtosecond filament[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(25): 41406–41419.
- [46] Jana K, Mi Y H, Møller S H, et al. Quantum control of flying doughnut terahertz pulses[J]. *Sci Adv*, 2024, **10**(2): ead1803.
- [47] Pettine J, Padmanabhan P, Shi T, et al. Light-driven nanoscale vectorial currents[J]. *Nature*, 2024, **626**(8001): 984–989.
- [48] Beaupaire E, Merle J C, Daunois A, et al. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **76**(22): 4250–4253.
- [49] Beaupaire E, Turner G M, Harrel S M, et al. Coherent terahertz emission from ferromagnetic films excited by femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(18): 3465–3467.
- [50] Taira Y, Kuroda R, Kumaki M, et al. Observation of radially polarized terahertz radiation generated by a sub-picosecond electron beam[J]. *Vib Spectrosc*, 2014, **75**: 162–168.
- [51] Jin Z, Zhuo H B, Nakazawa T, et al. Highly efficient terahertz radiation from a thin foil irradiated by a high-contrast laser pulse[J]. *Phys Rev E*, 2016, **94**(3): 033206.
- [52] Schulz D, Schwager B, Berakdar J. Nanostructured spintronic emitters for polarization-textured and chiral broadband THz fields[J]. *ACS Photonics*, 2022, **9**(4): 1248–1255.
- [53] Chang G Q, Divin C J, Liu C H, et al. Generation of radially polarized terahertz pulses via velocity-mismatched optical rectification[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(4): 433–435.
- [54] Imai R, Kanda N, Higuchi T, et al. Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals with threefold rotational symmetry[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(20): 21896–21904.
- [55] Zheng Z, Kanda N, Konishi K, et al. Efficient coupling of propagating broadband terahertz radial beams to metal wires[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(9): 10642–10650.
- [56] Sato M, Higuchi T, Kanda N, et al. Terahertz polarization pulse shaping with arbitrary field control[J]. *Nat Photonics*, 2013, **7**(9): 724–731.
- [57] Gaborit G, Biciunas A, Bernier M, et al. Emitting and receiving terahertz vectorial antennas based on cubic electro-optic crystals[J]. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol*, 2015, **5**(5): 828–835.
- [58] Feng X, Wang Q W, Lu Y C, et al. Direct emission of broadband terahertz cylindrical vector Bessel beam[J]. *Appl Phys Lett*, 2021, **119**(22): 221110.
- [59] Mou S, D'Arco A, Tomarchio L, et al. Generation of terahertz vector beam bearing tailored topological charge[J]. *APL Photonics*, 2023, **8**(3): 036103.
- [60] Iwase H, Ohno S. Direct generation of a terahertz vector beam from a ZnTe crystal excited by a focused circular polarized pulse[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(16): 26923–26934.
- [61] Kröll J, Darmo J, Dhillon S S, et al. Phase-resolved measurements of stimulated emission in a laser[J]. *Nature*, 2007, **449**(7163): 698–701.
- [62] Jukam N, Dhillon S, Zhao Z Y, et al. Gain measurements of THz quantum cascade lasers using THz time-domain spectroscopy[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2008, **14**(2): 436–442.
- [63] Jukam N, Dhillon S S, Oustinov D, et al. Investigation of spectral gain narrowing in quantum cascade lasers using terahertz time domain spectroscopy[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **93**(10): 101115.
- [64] Jukam N, Dhillon S S, Oustinov D, et al. Terahertz time domain spectroscopy of phonon-depopulation based quantum cascade lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, **94**(25): 251108.
- [65] Jukam N, Dhillon S S, Oustinov D, et al. Terahertz amplifier based on gain switching in a quantum cascade laser[J]. *Nat Photonics*, 2009, **3**(12): 715–719.
- [66] Oustinov D, Jukam N, Rungsawang R, et al. Phase seeding of a terahertz quantum cascade laser[J]. *Nat Commun*, 2010, **1**(1): 69.
- [67] Han S, Chua Y, Zeng Y Q, et al. Photonic Majorana quantum cascade laser with polarization-winding emission[J]. *Nat Commun*, 2023, **14**(1): 707.
- [68] Han S, Cui J Y, Chua Y, et al. Electrically-pumped compact topological bulk lasers driven by band-inverted bound states in the continuum[J]. *Light Sci Appl*, 2023, **12**(1): 145.
- [69] Cui J Y, Chua Y, Han S, et al. Single - mode electrically pumped terahertz laser in an ultracompact cavity via merging bound states in the continuum[J]. *Laser Photonics Rev*, 2023, **17**(11): 2300350.
- [70] Petrov N V, Sokolenko B, Kulya M S, et al. Design of broadband terahertz vector and vortex beams: I. Review of materials and components[J]. *Light Adv Manuf*, 2022, **3**(4): 640–652.
- [71] Minasyan A, Trovato C, Degert J, et al. Geometric phase shaping of terahertz vortex beams[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(1): 41–44.
- [72] Hernandez-Serrano A I, Castro-Camus E, Lopez-Mago D. q-plate for the generation of terahertz cylindrical vector beams fabricated by 3D printing[J]. *J Infrared Millim Terahertz Waves*, 2017, **38**(8): 938–944.
- [73] Dong X P, Cheng J R, Fan F, et al. Sub-terahertz wideband

- vector beam generator based on superwavelength lattice dielectric grating[J]. *Optik*, 2019, **193**: 162991.
- [74] Koral C, Mazaheri Z, Andreone A. THz multi-mode Q-plate with a fixed rate of change of the optical axis using form birefringence[J]. *Micromachines*, 2022, **13**(5): 796.
- [75] Ke L, Zhang S M, Li C X, et al. Research progress on hybrid vector beam implementation by metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230117.  
柯岚, 章思梦, 李晨霞, 等. 超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230117.
- [76] Guo Y H, Pu M B, Zhao Z Y, et al. Merging geometric phase and plasmon retardation phase in continuously shaped metasurfaces for arbitrary orbital angular momentum generation[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(11): 2022–2029.
- [77] Zhang F, Pu M B, Luo J, et al. Symmetry breaking of photonic spin-orbit interactions in metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 319–325.
- [78] Mueller J P B, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, **118**(11): 113901.
- [79] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Science*, 2017, **358**(6365): 896–901.
- [80] Guo Y H, Zhang S C, Pu M B, et al. Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 63.
- [81] Zhang F, Guo Y H, Pu M B, et al. Metasurfaces enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(10): 200366.  
张飞, 郭迎辉, 蒲明博, 等. 基于非对称光子自旋—轨道相互作用的超构表面[J]. *光电工程*, 2020, **47**(10): 200366.
- [82] Papakostas A, Potts A, Bagnall D M, et al. Optical manifestations of planar chirality[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**(10): 107404.
- [83] Kang M, Chen J, Wang X L, et al. Twisted vector field from an inhomogeneous and anisotropic metamaterial[J]. *J Opt Soc Am B*, 2012, **29**(4): 572–576.
- [84] Xie Z W, He J W, Wang X K, et al. Generation of terahertz vector beams with a concentric ring metal grating and photo-generated carriers[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(3): 359–362.
- [85] Guo J Y, Wang X K, He J W, et al. Generation of radial polarized Lorentz beam with single layer metasurface[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(1): 1700925.
- [86] Xu Y H, Zhang H F, Li Q, et al. Generation of terahertz vector beams using dielectric metasurfaces via spin-decoupled phase control[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(10): 3393–3402.
- [87] Zhou H X, Cheng J R, Fan F, et al. Ultrathin freestanding terahertz vector beam generators with free phase modulation[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(2): 1384–1395.
- [88] Wu T, Zhang X Q, Xu Q, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase, amplitude, and polarization[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(1): 2101223.
- [89] Wu Q, Fan W H, Qin C. Generation and superposition of perfect vortex beams in terahertz region via single-layer all-dielectric metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2022, **12**(17): 3010.
- [90] Li Q S, Cai X D, Liu T, et al. Gate-tuned graphene meta-devices for dynamically controlling terahertz wavefronts[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(9): 2085–2096.
- [91] Zhao H, Wang X K, Liu S T, et al. Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(2): 220012.
- [92] Li H, Zheng C L, Liu J Y, et al. Binary encoding-inspired generation of vector vortex beams[J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2023, **66**(5): 254212.
- [93] Ke L, Li C X, Zhang S M, et al. Tight focusing field of cylindrical vector beams based on cascaded low-refractive index metamaterials[J]. *Nanophotonics*, 2023, **12**(18): 3563–3578.
- [94] Zheng C L, Li J, Liu J Y, et al. Creating longitudinally varying vector vortex beams with an all-dielectric metasurface[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(10): 2200236.
- [95] Li J, Li J T, Yue Z, et al. Structured vector field manipulation of terahertz wave along the propagation direction based on dielectric metasurfaces[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(12): 2200325.
- [96] Li H, Duan S X, Zheng C L, et al. Manipulation of longitudinally inhomogeneous polarization states empowered by all-silicon metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2023, **11**(4): 2202461.
- [97] Li H, Duan S X, Zheng C L, et al. Longitudinal manipulation of scalar to vector vortex beams evolution empowered by all-silicon metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2023, **11**(22): 2301368.
- [98] Luo L, Liu X, Duan S X, et al. Dual channel transformation of scalar and vector terahertz beams along the optical path based on dielectric metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2023, **12**(19): 3839–3848.
- [99] Hu S S, Wei L, Long Y, et al. Longitudinal polarization manipulation based on all-dielectric terahertz metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2024, **32**(5): 6963–6976.
- [100] He X Y, Bao H L, Zhang F, et al. Longitudinally continuous varying high-order cylindrical vector fields enabled by spin-decoupled metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2024, **13**(9): 1657–1664.
- [101] Hsieh C F, Pan R P, Tang T T, et al. Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-wave plate[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(8): 1112–1114.
- [102] Piccirillo B, D'Ambrosio V, Slussarenko S, et al. Photon spin-to-orbital angular momentum conversion via an electrically tunable q-plate[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, **97**(24): 241104.
- [103] Yang C S, Tang T T, Pan R P, et al. Liquid crystal terahertz phase shifters with functional indium-tin-oxide nanostructures for biasing and alignment[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **104**(14): 141106.
- [104] Chen P, Wei B Y, Ji W, et al. Arbitrary and reconfigurable optical vortex generation: a high-efficiency technique using director-varying liquid crystal fork gratings[J]. *Photonics Res*, 2015, **3**(4): 133–139.
- [105] Sasaki T, Okuyama H, Sakamoto M, et al. Optical control of polarized terahertz waves using dye-doped nematic liquid crystals[J]. *AIP Adv*, 2018, **8**(11): 115326.
- [106] Vieweg N, Jansen C, Shakfa M K, et al. Molecular properties of liquid crystals in the terahertz frequency range[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(6): 6097–6107.
- [107] Wang L, Lin X W, Hu W, et al. Broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes[J]. *Light Sci Appl*, 2015, **4**(2): e253.
- [108] Hsieh C F, Yang C S, Shih F C, et al. Liquid-crystal-based magnetically tunable terahertz achromatic quarter-wave plate[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(7): 9933–9940.
- [109] Wang L, Ge S J, Hu W, et al. Tunable reflective liquid crystal terahertz waveplates[J]. *Opt Mater Express*, 2017, **7**(6): 2023–2029.
- [110] Zhang X, Fan F, Zhang C Y, et al. Tunable terahertz phase shifter based on dielectric artificial birefringence grating filled with polymer dispersed liquid crystal[J]. *Opt Mater Express*,

- 2020, **10**(2): 282–292.
- [111] Shen Z X, Tang M J, Chen P, et al. Planar terahertz photonics mediated by liquid crystal polymers[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(7): 1902124.
- [112] Shen Z X, Zhou S H, Ge S J, et al. Liquid-crystal-integrated metadvice: towards active multifunctional terahertz wave manipulations[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(19): 4695–4698.
- [113] Ge S J, Chen P, Shen Z X, et al. Terahertz vortex beam generator based on a photopatterned large birefringence liquid crystal[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(11): 12349–12356.
- [114] Ge S J, Shen Z X, Chen P, et al. Generating, separating and polarizing terahertz vortex beams via liquid crystals with gradient-rotation directors[J]. *Crystals*, 2017, **7**(10): 314.
- [115] Shen Y C, Shen Z X, Zhao G Z, et al. Photopatterned liquid crystal mediated terahertz Bessel vortex beam generator [Invited][J]. *Chin Opt Lett*, 2020, **18**(8): 080003.
- [116] Savo S, Shrekenhamer D, Padilla W J. Liquid crystal metamaterial absorber spatial light modulator for THz applications[J]. *Adv Opt Mater*, 2014, **2**(3): 275–279.
- [117] Liu C X, Yang F, Fu X J, et al. Programmable manipulations of terahertz beams by transmissive digital coding metasurfaces based on liquid crystals[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, **9**(22): 2100932.
- [118] Buchnev O, Podoliak N, Kaltenecker K, et al. Metasurface-based optical liquid crystal cell as an ultrathin spatial phase modulator for THz applications[J]. *ACS Photonics*, 2020, **7**(11): 3199–3206.
- [119] Tao S N, Shen Z X, Yu H G, et al. Transflective spatial terahertz wave modulator[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(7): 1650–1653.
- [120] Liu S, Xu F, Zhan J L, et al. Terahertz liquid crystal programmable metasurface based on resonance switching[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(7): 1891–1894.
- [121] Li W L, Hu X M, Wu J B, et al. Dual-color terahertz spatial light modulator for single-pixel imaging[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 191.
- [122] Wang S, Guo H B, Chen B W, et al. Electrically active terahertz liquid-crystal metasurface for polarization vortex beam switching[J]. *Laser Photonics Rev*, 2024, 2301301.
- [123] Wakayama T, Higashiguchi T, Oikawa H, et al. Determination of the polarization states of an arbitrary polarized terahertz beam: vectorial vortex analysis[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**(1): 9416.
- [124] Wakayama T, Higashiguchi T, Sakaue K, et al. Demonstration of a terahertz pure vector beam by tailoring geometric phase[J]. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 8690.
- [125] Niwa H, Yoshikawa N, Kawaguchi M, et al. Switchable generation of azimuthally- and radially-polarized terahertz beams from a spintronic terahertz emitter[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(9): 13331–13343.
- [126] Grosjean T, Baida F, Adam R, et al. Linear to radial polarization conversion in the THz domain using a passive system[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(23): 18895–18909.
- [127] Fan J Y, Zhang L, Wu Z Y, et al. Simultaneous and independent control of phase and polarization in terahertz band for functional integration of multiple devices[J]. *Opt Laser Technol*, 2022, **151**: 108064.
- [128] Zeng C, Lu H, Mao D, et al. Graphene-empowered dynamic metasurfaces and metadvice[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(4): 200098.
- [129] Zhang S J, Cao T, Tian Z. Progress on reconfigurable terahertz metasurface devices based on sulfide phase change materials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230142. 张寿俊, 曹曦, 田震. 基于硫属化合物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230142.
- [130] Guan S N, Cheng J R, Chang S J. Recent progress of terahertz spatial light modulators: materials, principles and applications[J]. *Micromachines*, 2022, **13**(10): 1637.
- [131] Yu H G, Wang H C, Wang Q G, et al. Liquid crystal-tuned planar optics in terahertz range[J]. *Appl Sci*, 2023, **13**(3): 1428.

## 作者简介



胡浩 (1999-) 男, 博士研究生, 主要研究方向为太赫兹成像与光场调控。

E-mail: [huhao@mail.nankai.edu.cn](mailto:huhao@mail.nankai.edu.cn)



【通信作者】王晓雷 (1980-), 男, 南开大学电子信息与光学工程学院教授, 主要研究方向包括太赫兹成像与调控, 光学信息处理。

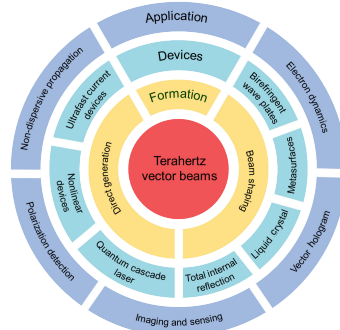
E-mail: [wangxiaolei@nankai.edu.cn](mailto:wangxiaolei@nankai.edu.cn)



扫描二维码, 获取PDF全文

# Research progress of terahertz vector beams

Hu Hao<sup>1</sup>, Hu Xiaoxue<sup>1</sup>, Gong Liping<sup>2</sup>, Xi Sixing<sup>3</sup>, Wang Xiaolei<sup>1\*</sup>



Schematic showing the organization of topics in this review

**Overview:** In recent years, terahertz waves have shown broad application prospects in imaging, communications, material characterization, and other fields due to their unique coherence, strong penetration, low energy, and the freedom to excite the rotation and vibration of atoms and substances. Among various terahertz-structured beams, vector beams with unique polarization characteristics exhibit novel spatial distributions and demonstrate a growing range of potential application values. The vector beam refers to a beam with different polarization states at different positions on the same wave vibration plane at the same time. Unlike a scalar beam, the polarization state of a vector beam changes with its position in space. This review explores the generation methods of terahertz vector beams, their applications in diverse fields, and future developmental directions. To begin with, we systematically classify the generation methods of terahertz vector beams based on formation techniques. The advancements in direct-generation devices such as ultrafast current devices, nonlinear devices, and quantum cascade lasers are discussed. Additionally, we highlight progress in beam shaping devices such as birefringent wave plates, metasurfaces, liquid crystals, and total internal reflection devices regarding terahertz vector beam generation. The detailed explanations of the principles of these methods and the characteristics of the generated vector beams are provided. Next, we present representative applications utilizing terahertz vector beams, including dispersive transmission, polarization measurement, imaging sensing, vector holography, and electron dynamics. The unique characteristics of terahertz vector beams offer significant advantages and potential in these applications, such as improved resolution, enhanced information transfer rates, and precise material property measurements. Finally, we discuss the challenges and possibilities involved in terahertz vector field manipulation using different devices. Among these devices, terahertz quantum cascade lasers and metasurfaces will be the future development trend, with broad development prospects and application potential. Terahertz quantum cascade lasers can achieve high-power, narrow linewidth, and continuously tunable terahertz radiation. Metasurfaces provide more possibilities for research on using integrated optical systems to replace traditional optical systems to generate vector beams. In addition, liquid crystal is also one of the promising materials suitable for terahertz vector beam modulators. Combining active metasurfaces with multi-layer liquid crystals may become the final solution of compact, efficient, and tunable vector beam shaping devices in the terahertz frequency range. With further development of technology and in-depth research on applications, terahertz vector beams will demonstrate their potential and application value in a wider range of fields.

Hu H, Hu X X, Gong L P, et al. Research progress of terahertz vector beams[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240071; DOI: 10.12086/oe.2024.240071

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (61875093, 12104288, 11904073)

<sup>1</sup>Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China; <sup>2</sup>School of Mathematics, Physics and Statistics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; <sup>3</sup>School of Mathematics and Physics, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

\* E-mail: wangxiaolei@nankai.edu.cn