



暗态多极局域等离子模式的太赫兹涡旋光激发

葛一凡 吴毅萍 臧小飞 袁英豪 陈麟

Interaction between spoof localized surface plasmon and terahertz vortex beam

Ge Yi-Fan Wu Yi-Ping Zang Xiao-Fei Yuan Ying-Hao Chen Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 184203 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200695

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200695>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大气湍流信道中聚焦涡旋光束轨道角动量串扰特性

Effect of atmospheric turbulence on orbital angular momentum crosstalk of focused vortex beams

物理学报. 2020, 69(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200243>

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

圆柱型光纤螺线圈轨道角动量模式

Orbital angular momentum mode of cylindrical spiral wave-guide

物理学报. 2020, 69(5): 054207 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190997>

利用衍射光栅探测涡旋光束轨道角动量态的研究进展

Progress of detecting orbital angular momentum states of optical vortices through diffraction gratings

物理学报. 2018, 67(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171899>

长周期多芯手征光纤轨道角动量的调制

Modulation of orbital angular momentum in long period chirally-coupled-cores fiber

物理学报. 2019, 68(6): 064211 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182036>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

暗态多极赝局域等离子模式的太赫兹涡旋光激发*

葛一凡¹⁾²⁾ 吴毅萍¹⁾²⁾ 臧小飞¹⁾²⁾ 袁英豪¹⁾²⁾ 陈麟^{1)2)3)†}

1) (上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 220001)

2) (上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

3) (同济大学人工智能研究院, 上海 200092)

(2020年5月9日收到; 2020年5月30日收到修改稿)

理论分析和实验验证了太赫兹涡旋光与带有周期性亚波长金属褶皱圆盘中暗态多极赝局域等离子模式的相互作用. 研究表明, 携带不同轨道角动量和自旋角动量的太赫兹涡旋光可以决定最终激发出的太赫兹暗态多极等离子模式, 此结果和光频段的理论分析一致. 利用太赫兹近场扫描方法对涡旋光的自旋和轨道角动量与暗态多极等离子模式的对应关系进行了实验论证, 实验结果与理论仿真符合较好. 研究成果将对太赫兹物理、等离子体以及成像领域研究起到一定的促进作用.

关键词: 太赫兹涡旋光, 赝局域等离子模式, 自旋和轨道角动量

PACS: 42.25.Bs, 41.20.Jb, 42.25.-p

DOI: 10.7498/aps.69.20200695

1 引言

表面等离子激元 (surface plasmon polaritons, SPPs)^[1,2] 是电磁波中的光子和受激金属结构中的自由振荡电子相互耦合产生, 并在介质/金属表面传输的一种电子疏密波. 在垂直于传播方向上, 随着传输距离的增大, SPPs 场强指数衰减, 能量最终转化为自由电子热散逸. 当 SPPs 被局限在亚波长封闭金属圆盘结构上时, 其模式演化为局域表面等离子激元 (localized surface plasmons, LSPs)^[3,4]. 在 LSPs 模式的激发研究中, 采用平面波垂直入射亚波长封闭金属圆盘结构的方式只能够激发出局域偶极子振荡模式; 采用平面波侧入射或者破坏封闭金属圆盘结构对称性的方式能有效激发高阶暗态 LSPs 多极振荡模式, 但高阶共振强度明显弱于同时激发出的偶极子共振强度^[5-7].

在可见光或者近红外波段, 金属与介质交界处及金属圆盘边缘分别支持 SPPs 和 LSPs, 在低频和太赫兹波段, 金属由于趋肤深度远小于波长, 表现出近似完美电导体 (perfect electric conductor, PEC) 特性, 使得 SPPs 或者 LSPs 模式的电磁场局域特性变弱^[8,9]. 为了在低频波段增强 LSPs 的电磁波约束能力和局域效应, 2012年, Pendry 等^[10] 提出亚波长尺寸周期褶皱金属圆盘结构能够支持一种赝局域等离子模式 (spoof localized surface plasmon, Spoof-LSPs); 紧接着, 2014年, Shen 和 Cui^[11] 在微波频段利用侧面激发方式实验论证了 Spoof-LSPs 多极子模式的存在. 由于 Spoof-LSPs 的多极子模式为暗态模式, 在太赫兹频段, 利用时域太赫兹波谱系统, 将太赫兹波垂直入射到对称的周期性褶皱金属圆盘结构中只能激发低 Q 值明态偶极子模式, 限制了这种结构在太赫兹生物传感等领域的应用. 2016年, Chen 等^[12] 利用太赫兹波垂

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFF01013003)、国家自然科学基金 (批准号: 61671302)、上海市曙光计划 (批准号: 18SG44) 和 2020 年度上海理工大学教师教学发展研究项目 (批准号: CFTD203008) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: linchen@usst.edu.cn

直入射一种由周期性褶皱金属圆盘和 C 型谐振器组成的混合结构, 从仿真和实验两方面论证了暗态太赫兹 Spoof-LSPs 多极子模式激发的可能性; 进一步, 2017 年, 一种带缺陷的周期性褶皱金属圆盘被提出, 用于实现暗态太赫兹 Spoof-LSPs 多极子模式的激发^[13]. 但是, 以上两种方式由于引入了额外的结构 (偶极子谐振腔和缺陷), 破坏了对称性, 使得激发出的暗态多极子模式较弱^[14,15].

涡旋光是一种区别于圆偏光的特殊光场. 1992 年, Allen 等^[16]证明了涡旋光可携带 lh 的轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM; l 和 h 分别为拓扑电荷数和约化普朗克常量) 和 sh 的自旋角动量 (spin angular momentum, SAM; $s = \pm 1$ 表示左旋或右旋偏振态). 由于相位因子的存在, 涡旋光在传播方向上呈现连续螺旋状而光斑中心强度为零, 具有相位奇点和螺旋波前等特点. 2010 年, 南开大学的胡志健^[17]利用聚焦涡旋结构光实现了对 LSPs 的全光调控; 2015 年, 日本北海道大学的 Sakai 等^[18]在光频段, 理论证明了携带特定方位角模式的涡旋光在垂直入射的情况下能够激发出纳米尺寸圆盘中的暗态 LSPs 多极子模式; 2016 年和 2018 年, Arikawa 等^[19,20]又实验研究了在太赫兹频段下, 太赫兹近场显微镜成像系统中, 涡旋光能够激发亚波长周期褶皱金属圆盘中的暗态 Spoof-LSPs 多极子模式. 但是, 在太赫兹频段, 未见到涡旋光与暗态 Spoof-LSPs 多极子模式相互作用的理论方面的详细报道.

本文理论和实验研究了太赫兹涡旋光与暗态 Spoof-LSPs 多极子模式的相互作用的物理图像. 首先利用 FDTD 软件分析了太赫兹频段涡旋光与赝局域等离子模式中的暗态多极子模式的相互作用及频谱特性, 得到了入射太赫兹波中的 OAM 与 SAM 和多极子的模式数的对应关系, 验证了日本科学家在光频段中涡旋光与金属圆盘相互作用的结论^[18]. 实验上, 利用螺旋相位板 (Tsurupica polymer 材料) 产生太赫兹涡旋光; 利用太赫兹近场成像系统^[21], 实验观察到了不同 SAM 与 OAM 选择激发多极子模式的现象, 理论和实验符合较好.

2 仿真结果与分析

2.1 太赫兹涡旋光

涡旋光满足拉盖尔高斯 (Laguerre-Gaussian,

LG) 模式分布. 在傍轴近似下, 模式的振幅分布可以表示为^[22]

$$\begin{aligned}
 LG_{pl} = & \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \frac{1}{\omega(z)} \left[\frac{r\sqrt{2}}{\omega(z)} \right]^{|l|} \\
 & \times \exp\left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right] L_p^{|l|}\left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \exp(il\theta) \\
 & \times \exp\left[\frac{-ikr^2z}{2(z^2 + Z_R^2)}\right] \\
 & \times \exp\left[-i(2p + |l| + 1)\tan^{-1}\frac{z}{Z_R}\right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中 $\omega(z)$ 为传输距离 z 处的光束束腰; Z_R 为瑞利长度; k 为波数; $L_p^{|l|}$ 表示拉盖尔多项式; θ 为极角; p 表征模式的径向量子数; $-(2p + l + 1)\tan^{-1}\frac{z}{Z_R}$ 的物理意义是 Gouy 相位. 利用 (1) 式在 FDTD 仿真软件中进行涡旋光场中不同 l 和 s 模式的仿真 (标记为 (l, s)). 在 $500 \mu\text{m}$ 波长下, 六种不同 LG 模式的电场 (上)、电场矢量 (中) 和相位 (下) 如图 1 所示. 从图 1 可以得到涡旋光模式具有以下特点: 1) $(1, 1)$, $(1, -1)$, $(2, 1)$, $(2, -1)$ 和 $(3, -1)$ 模式的电场分布呈现中心光强为 0 的特点 (中心相位奇点), 随着 l 的增大, 涡旋光的中间奇点区域面积也逐渐增大; 2) 涡旋光表现出矢量光束的偏振特性, 例如: $(1, -1)$ 模式呈现径向偏振特性; 3) 由于涡旋光中携带相位因子 $\exp(il\theta)$, 所以随着 l 的增加, 相位分布也发生变化. 当 l 每增加 1 个数值, 相位就会相应增加 2π ^[23].

2.2 太赫兹涡旋光和暗态赝局域等离子多极子模式的相互作用

如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 本文设计了一种亚波长周期褶皱金属圆盘结构. 其中外圆盘半径 $R = 100 \mu\text{m}$, 内圆盘半径 $r = 50 \mu\text{m}$, $N = 36$, 单周期长度 $d = 2\pi R/N$, 占空比 $a = 0.4d$, 金属选择铝, 其电导率 $\sigma_{\text{Al}} = 3.56 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 厚度 200 nm , 基底 (聚酰亚胺薄膜, 介电常数 $\varepsilon = 3.5 + 0.035i$ ^[21]) 厚度 $h = 10 \mu\text{m}$. 金属铝对应的等离子体碰撞频率 ω_c 以及等离子体频率 ω_p 可根据 Drude 理论模型计算得出 ($\omega_c = 1.8182^{14} \text{ rad/s}$, $\omega_p = 2.4051^{16} \text{ rad/s}$).

将编写好的涡旋光程序作为光源导入到仿真中, 然后对结构进行网格划分和仿真区域设置. 如图 2(c) 所示, 太赫兹涡旋光入射到亚波长褶皱金

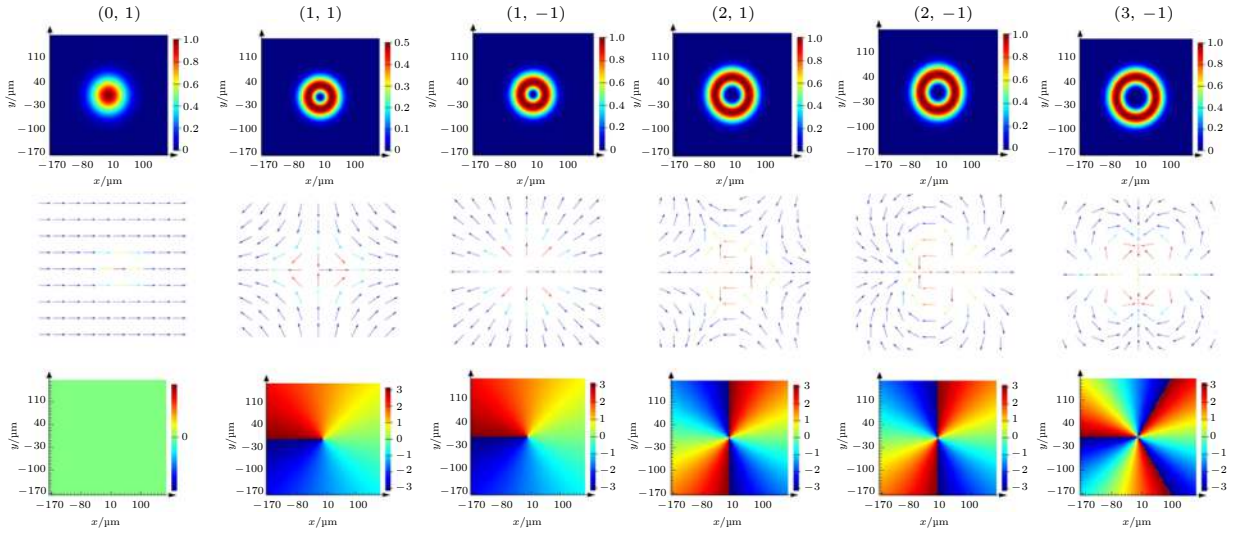


图 1 太赫兹涡旋光的电场、电场矢量和相位分布仿真图

Fig. 1. Simulation of electric field, the vector of electric field and phase distribution of terahertz vortex beam.

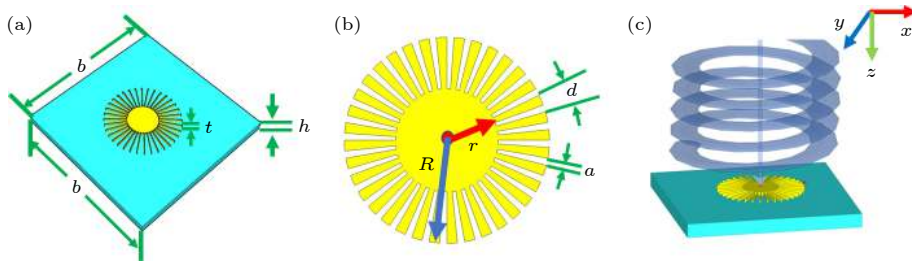


图 2 仿真结构示意图 (a), (b) 带有周期性亚波长槽的金属圆盘; (c) 太赫兹涡旋光垂直入射金属圆盘

Fig. 2. Schematic diagram of simulation structure: (a), (b) Metal disk with subwavelength periodic grooves; (c) the vertical incidence terahertz vortex beam to the metal disc.

属圆盘结构的正中心. 在与金属圆盘上表面平行, 并且距离金属圆盘侧壁 $1 \mu\text{m}$ 的位置选取一点作为监测点, 其强度曲线如图 3 所示. 当 $(0, 1)$, $(1, 1)$ 和 $(2, 1)$ 模式的太赫兹涡旋光垂直入射, 对应的曲线图中分别存在一个主共振峰, 对应的峰值位置分别为 0.24 , 0.43 和 0.6 THz . 当 $(1, -1)$ 模式入射时,

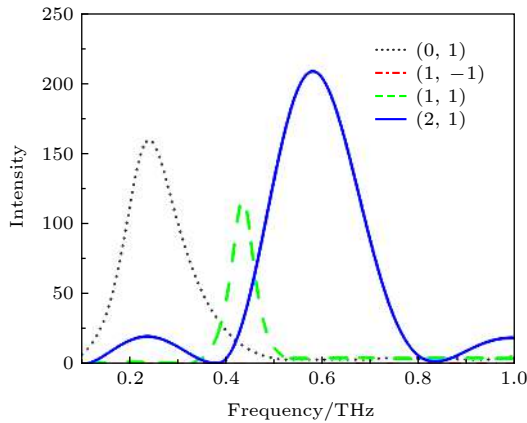


图 3 监视点处的强度光谱

Fig. 3. Intensity spectra at the monitoring point.

图中没有共振峰的产生.

为了验证各个共振峰处的电场分布, 在距离衬底下方 $10 \mu\text{m}$ 处放置监视器, 用来观察图 3 中各个共振点处 E_z 电场分布. 图 4 为四种不同涡旋光模式入射下的电场分布图. 可以观察到在 0.24 THz 处 $(0, 1)$ 模式与等离子体结构相互作用激发了偶极子模式; 在 0.43 THz 处涡旋光的 $(1, 1)$ 模式激发了四极子模式; 在 0.6 THz 处涡旋光的 $(2, 1)$ 模式激发了六极子模式; 而 $(1, -1)$ 模式与等离子体结构相互作用并没有激发出明态或暗态多极子模式. 图 4 中峰值处的电场强度分布图与图 3 的强度光谱互相对应, 证明了涡旋光的选择激发特性.

表 1 总结了 Spoof-LSPs 模式和携带不同角动量太赫兹涡旋光的对应关系. 其中 $J = l + s$, 可以看到涡旋光激发的 Spoof-LSPs 多极子模式由 OAM 和 SAM 的总和 J 决定, 例如, $J = 1$ 的时激发出偶极子模式, $J = 2$ 的时激发出四极子模式, $J = 3$ 的时激发出六极子模式.

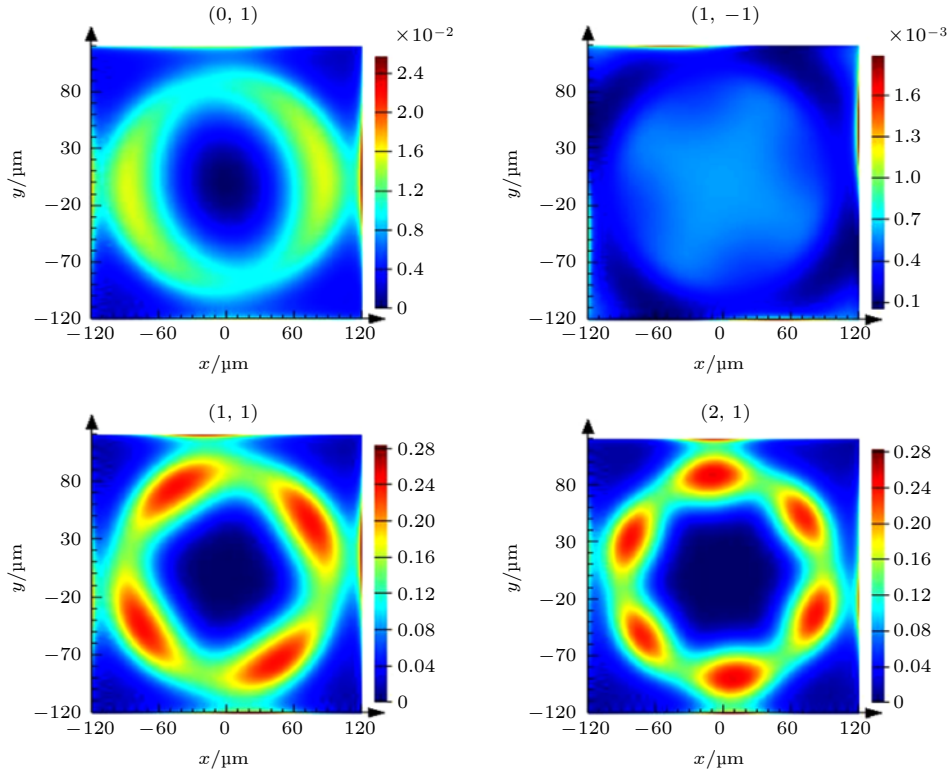


图 4 太赫兹涡旋光穿透结构后的电场仿真图

Fig. 4. Simulation of electric field after terahertz vortex beam penetrates the structure.

 表 1 SpooF-LSPs 模式和角动量的关系
 Table 1. Relationship between SpooF-LSPs mode and angular momentum.

l	s	J	SpooF-LSPs模式
2	1	3	六极子
1	1	2	四极子
	-1	0	—
0	1	1	偶极子

太赫兹涡旋光在傍轴近似条件下, 总角动量 (total angular momentum, TAM)^[13,19,20] 可以表示为

$$\text{TAM} = \text{OAM} + \text{SAM}. \quad (2)$$

根据 (2) 式, 由于总角动量和等离子体之间发生了转换, 所以携带特定角动量的太赫兹涡旋光在垂直入射的情况下能够激发出对称人工粒子中的高阶 SpooF-LSPs 多极子模式, 极子数取决于总角动量的数量.

3 实验结果与分析

实验中, 涡旋光由螺旋相位板 (spiral phase plate, SPP) 产生. 实验中采用 Tsurupica polymer

材料 (折射率 $n_0 = 1.52$) 设计加工了一种透射式阶梯型 SPP, 相关性能已经被日本加工商验证过^[24,25], 理论和实验结果基本一致.

如图 5(a) 所示, SPP 的下表面光滑, 上表面的厚度随旋转方位角 ϕ 的增大呈阶梯型增长, 图 5(b) 是产生 1 阶涡旋光的 SPP 实物照. 总厚度 h 和旋转方位角之间的关系可以表示为

$$h = h_0 + h_s \phi / (2\pi), \quad (3)$$

其中 h_0 表示 SPP 的基底厚度, h_s 表示阶梯厚度. 由于 SPP 自身材料和周边环境的折射率 ($n_1 = 1$) 之间存在差异, 所以当一束太赫兹波透射过 SPP 后, 不同厚度对应的光程不同, 导致出射太赫兹波的相位随空间位置变化. 太赫兹入射波和出射波之间的相位延迟可以表示为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{(n_0 - n_1) h_s \phi}{2\pi} + n h_0 \right], \quad (4)$$

从而使得透过 SPP 的太赫兹波变成了带有螺旋结构的太赫兹涡旋光, 所以 SPP 也可以被简单地看成是一个相位调制器. 其中 λ 表示太赫兹入射波的波长. 当相位顺时针增加 $2l\pi$ 时, 拓扑电荷数 l 为

$$l = (n_0 - n_1) h_s / \lambda. \quad (5)$$

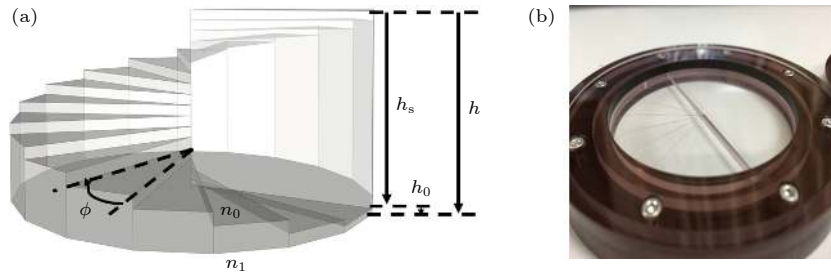


图 5 透射式阶梯型 SPP (a) 结构示意图, 其中 $\lambda = 500 \mu\text{m}$, 阶梯总数量 $N = 18$, 总厚度 $h = 4 \text{ mm}$, 基底厚度为 $h_0 \approx 961.54 \mu\text{m}$, 旋转方位角 $\phi = 20^\circ$; (b) 1 阶 SPP 的实物图

Fig. 5. Transmissive stepped SPP: (a) Schematic of the structure, where the wavelength $\lambda = 500 \mu\text{m}$, the total number of steps $N = 18$, the total thickness $h = 4 \text{ mm}$, the base thickness $h_0 \approx 961.54 \mu\text{m}$, the rotation azimuth $\phi = 20^\circ$; (b) the physical map of SPP.

使用太赫兹近场成像系统进行验证^[21]. 图 6 和图 7 是实验系统装置图. 激光出射分成两路: 抽运光路和探测光路. 在抽运光路中, 780 nm 的激光通过光电导天线之后辐射出的太赫兹脉冲波经过抛物面镜、起偏器和 1/4 波片后入射到 SPP 上, 而后垂直入射到样品上; 探测光路需要经过延迟线的处理, 以保证两束光路的光程近似相等, 然后将探针放置在光路中的一个电动三维平移台上, 用来对透射样品后的信号场分布进行平面扫描, 探针的最大扫描范围为 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$. 图 6 内插图为显微镜观察到的样品结构. 使用近似估计的方法, 调节电动三维平移台 z 方向上的位置, 通过高倍显微镜观察得到探针与样品的距离为 $10 \mu\text{m}$, 然后在 xoy 面上, 在样品 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 的有效范围内进行扫描, 扫描间隔 0.02 mm , 一个样品圆盘范围内是 10×10 个扫描点.

图 8 是测得的 (0, 1) 和 (1, 1) 两种角动量组合下的太赫兹涡旋光透射结构后的场分布. 黑色双环表示样品的位置. 由于加工的结构很粗糙, 而且在透射结构后, 表面波在传输过程中发生了衰减, 所以探测到的场强分布很微弱. 另外, 因为空气的湿度较大等外界因素, 导致场强分布明显不均匀. 中心处场强因为金属结构实心处阻挡了太赫兹涡旋光的传输, 所以为 0, 但是在四周金属条上却分布着依稀可见的电场能量, 这是因为激发了结构上的 SpooF-LSPs. 例如, (0, 1) 情况下, 结构周围产生了偶极子驻波振荡, (1, 1) 情况下激发了暗态的四极子模式, 验证了表 1 中的对应关系. 这就说明了携带特定 OAM 和 SAM 的太赫兹涡旋光垂直入射本文设计的结构能够选择性地激发出暗态多极子 SpooF-LSPs 模式.

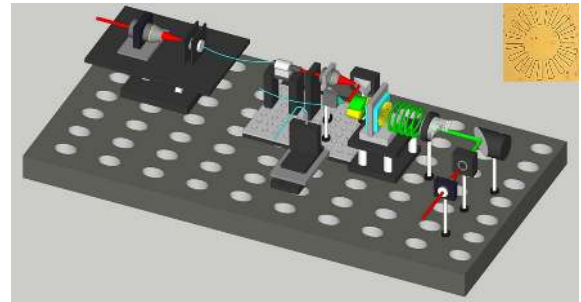


图 6 实验测量装置图和样品实物图 (插图)

Fig. 6. Experimental measurement device diagram and the physical map of sample (inserted figure).

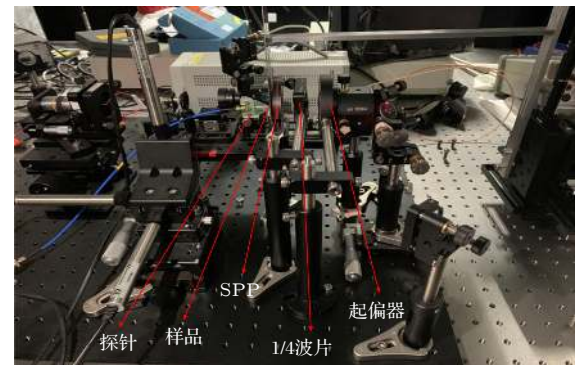


图 7 实验测量装置图

Fig. 7. Experimental measurement device diagram.

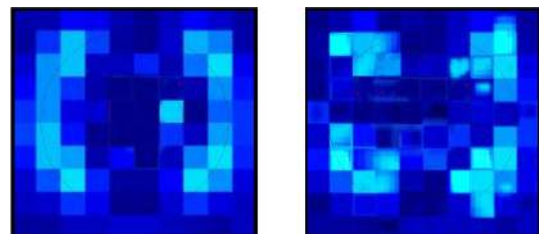


图 8 太赫兹涡旋光穿透样品后的电场实验图 (a) (0, 1) 的组合; (b) (1, 1) 的组合

Fig. 8. Experimental diagram of electric field and phase after terahertz vortex beam penetrates the structure: (a) Combination of (0, 1); (b) combination of (1, 1).

4 结 论

本文从理论仿真和实验两个角度详细研究了太赫兹涡旋光与 Spoof-LSPs 的相互作用. 首先通过仿真分析了太赫兹频段下涡旋光的相位奇点和螺旋波前特性. 接着将太赫兹涡旋光垂直入射一个周期褶皱金属圆盘结构, 理论分析了太赫兹频段涡旋光与暗态 Spoof-LSPs 多极子模式的相互作用及频谱特性, 得到了入射太赫兹波中的 OAM 与 SAM 和 Spoof-LSPs 多级子模式数的对应关系. 最后利用透射式阶梯型 SPP 和太赫兹近场成像系统对样品进行了实验验证, 理论结果和实验结果基本一致. 太赫兹涡旋光中不同的 TAM 和 Spoof-LSPs 多极子模式之间的相互作用将在太赫兹等离子体物理等领域有广泛的应用.

参考文献

- [1] Maier S A 2007 *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (Vol. 52) (Berlin: Springer) p49
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [3] Evlyukhin A B, Reinhardt C, Chichkov B N 2011 *Phys. Rev. B* **84** 235429
- [4] Oldenburg S J, Jackson J B, Westcott S L, Halas N J 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2897
- [5] Hao F, Larsson E M, Ali T A., Sutherland D S, Nordlander P 2008 *Chem. Phys. Lett.* **458** 262
- [6] Hao F, Nordlander P, Sonnefraud Y, Dorpe P V, Maier S A 2009 *ACS Nano* **3** 643
- [7] Habteyes T G, Dhuey S, Cabrini S, Schuck P J, Leone S R 2011 *Nano Lett.* **11** 1819
- [8] Chen L, Zhu Y M, Zang X F, Cai B, Li Z, Xie L, Zhuang S L 2013 *Light Sci. Appl.* **2** e60
- [9] Chen L, Ge Y F, Zang X F, Xie J Y, Ding L, Balakin A V, Shkurinov A P, Zhu Y M 2019 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **9** 643
- [10] Pors A, Moreno E, Martin-Moreno L, Pendry J B, Garcia-Vidal F J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 223905
- [11] Shen X P, Cui T J 2014 *Laser Photonics Rev.* **8** 137
- [12] Chen L, Wei Y M, Zang X F, Zhu Y M, Zhuang S L 2016 *Sci. Rep.* **6** 22027
- [13] Chen L, Xu N N, Singh L, Cui T J, Singh R J, Zhu S L, Zhang W L 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1600960
- [14] Chen L, Liao D G, Guo X G, Zhao J Y, Zhu Y M, Zhuang S L 2019 *Front. Inf. Technol. Electron.* **20** 591
- [15] Zhou J, Chen L, Sun Q Y, Liao D G, Ding L, Balakin A V, Shkurinov A P, Xie J Y, Zang X F, Cheng Q Q, Zhu Y M 2020 *Appl. Phys. Express* **13** 012014
- [16] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [17] Hu Z J 2010 *Ph. D. Dissertation.* (Tianjing: Nankai University) (in Chinese) [胡志健 2010 博士学位论文 (天津: 南开大学)]
- [18] Sakai K, Nomura K, Yamamoto T, Sasaki K 2015 *Sci. Rep.* **5** 8431
- [19] Morimoto S, Arikawa T, Blanchard F, Sakai K, Sasaki K, Tanaka K 2016 *41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)* Copenhagen, The Kingdom of Denmark, 2016 pp1, 2
- [20] Arikawa T, Morimoto S, Hiraoka T, Blanchard F, Sakai K, Sasaki K, Tanaka K 2018 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* San Jose, USA, 2018 pp1, 2
- [21] Zang X F, Zhu Y M, Mao C X, Xu W W, Ding H Z, Xie J Y, Cheng Q Q, Chen L, Peng Y, Hu Q, Gu M, Zhuang S L 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1801328
- [22] Yao A M, Padgett M J 2011 *Adv. Opt. Photonics* **3** 161
- [23] Milione G, Evans S, Nolan D A, Alfano R R 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 190401
- [24] Miyamoto K, Kang B J, Kim W T, Sasaki Y, Niinomi H, Suizu K, Rotermund F, Omatsu T 2016 *Sci. Rep.* **6** 38880
- [25] Miyamoto K, Suizu K, Akiba T, Omatsu T 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 261104

Interaction between spoof localized surface plasmon and terahertz vortex beam*

Ge Yi-Fan¹⁾²⁾ Wu Yi-Ping¹⁾²⁾ Zang Xiao-Fei¹⁾²⁾
 Yuan Ying-Hao¹⁾²⁾ Chen Lin^{1)2)3)†}

1) (*School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 220001, China*)

2) (*Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China*)

3) (*Institute of Intelligent Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

(Received 9 May 2020; revised manuscript received 30 May 2020)

Abstract

We theoretically and experimentally investigate a method of exciting multipole plasmons, including terahertz dark spoof localized surface plasmon (Spoof-LSP) modes, by using normally incident terahertz vortex beam. The vortex beam with angular intensity profile and phase singularities, has well-defined angular momentum which can be decomposed into the polarization-state-related spin angular momentum (SAM) for characterizing the spin feature of photon, and the helical-wavefront-related orbital angular momentum (OAM) that is characterized by an integer (l), called the topological charge. By illuminating terahertz vortex beam on the metallic disk with periodic subwavelength grooves normally, we find that the terahertz dark multipole plasmons can be excited by the terahertz vortex beam carrying different OAM and SAM. We analyze the correspondence between the spin and orbital angular momentum of vortex beam and the excited dark multipolar plasmon modes. In the experiment, a terahertz stepped spiral phase plate (SPP) with high transmission and low dispersion based on the Tsurupica olefin polymer is developed and the stepped SPP can generate a terahertz vortex beam having a topological charge of 1. Then, we further study the excitation of dark multipolar Spoof-LSPs by utilizing the stepped SPP in combination with the near-field scanning terahertz microscopy. The collimated terahertz wave, which is radiated from a 100 fs ($\lambda = 780$ nm) laser pulse pumped photoconductive antenna emitter, is converted into terahertz circular polarized light (CPL) which can carry SAM by the combination of the quarter wave plate and the polarizer, and then terahertz CPL impinges on the stepped SPP, producing the terahertz vortex beam which can carry OAM. The spatial two-dimensional electric field distribution is collected in steps of 0.02 mm along the x -direction and y -direction by a commercial terahertz near-field probe which is located close (≈ 10 μm) to the one side of polyimide film by three-dimensional electric translation stage and a microscope (FORTUNE TECHPLOGY FT-FH1080). The experimental results are in good agreement with simulations. We believe that our method will open the way for detailed research on the terahertz physics, plasma and imaging fields.

Keywords: terahertz vortex beam, spoof localized surface plasmon mode, spin and orbital angular momentum

PACS: 42.25.Bs, 41.20.Jb, 42.25.-p

DOI: 10.7498/aps.69.20200695

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFF01013003), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61671302), the Shuguang Program of Shanghai, China (Grant No. 18SG44), and the 2020 Faculty Teaching Development Research Project of USST, China (Grant No. CFTD203008).

† Corresponding author. E-mail: linchen@usst.edu.cn