

阿基米德螺旋微纳结构中的表面等离子激元聚焦

李嘉明 唐鹏 王佳见 黄涛 林峰 方哲宇 朱星

Focusing surface plasmon polaritons in archimedes' spiral nanostructure

Li Jia-Ming Tang Peng Wang Jia-Jian Huang Tao Lin Feng Fang Zhe-Yu Zhu Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 194201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.194201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电磁波在大面积等离子体片中传播特性的分析

[Analysis of propagation properties of electromagnetic waves through large planar plasma sheets](#)

物理学报.2015, 64(19): 194202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194202>

用四台阶相位板产生涡旋光束

[Generation of vortex beams by the four-step phase plates](#)

物理学报.2015, 64(18): 184202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184202>

(1+2)维各向同性介质中的旋转椭圆空间光孤子

[\(1+2\) dimensional spiraling elliptic spatial optical solitons in the media without anisotropy](#)

物理学报.2015, 64(15): 154202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154202>

平面金属等离子激元材料对光学 Tamm 态及相关激射行为的增强作用

[Optical Tamm state and related lasing effect enhanced by planar plasmonic metamaterials](#)

物理学报.2015, 64(11): 114202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114202>

基于简单透镜列阵的可调焦激光均匀辐照光学系统研究

[Study on a zooming optical system based on simple lens array used for laser uniform irradiation](#)

物理学报.2015, 64(5): 054201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054201>

阿基米德螺旋微纳结构中的表面等离子激元聚焦*

李嘉明¹⁾²⁾ 唐鹏¹⁾ 王佳见¹⁾²⁾ 黄涛¹⁾ 林峰¹⁾ 方哲宇¹⁾²⁾ 朱星^{1)2)3)†}

1)(北京大学物理学院, 人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

2)(北京大学前沿交叉学科研究院, 纳米科学与技术中心, 北京 100871)

3)(国家纳米科学中心, 北京 100190)

(2015年4月9日收到; 2015年5月10日收到修改稿)

研究光在微纳结构中的分布与传播, 实现在纳米范围内操纵光子, 对于微型光学芯片的设计有着重要意义. 本文利用聚焦离子束刻蚀方法, 在基底为石英玻璃的150 nm厚金膜上刻制了不同参数的阿基米德螺旋微纳狭缝结构, 通过改变入射光波长、手性、及螺旋结构手性和螺距等方式, 在理论和实验上系统地研究了阿基米德螺旋微纳结构中的表面等离子激元聚焦性质. 我们发现, 除了入射激光偏振态、螺旋结构手性之外, 结构螺距与表面等离子激元波长的比值也可以用来控制结构表面电场分布, 进而在结构中心形成0阶、1阶乃至更高阶符合隐失贝塞尔函数的涡旋电场. 通过相位分析, 我们对涡旋电场的成因进行了解释. 并利用有限时域差分的模拟方法计算了不同螺距时, 结构中形成的电场及相应空间相位分布. 最后利用扫描近场光学显微镜, 观测结构中不同的光场分布, 在结构中心得到了亚波长的聚焦光斑及符合不同阶贝塞尔函数的涡旋形表面等离子激元聚焦环.

关键词: 表面等离子激元, 阿基米德螺旋结构, 聚焦, 扫描近场光学显微镜

PACS: 42.25.Bs, 42.79.Dj, 73.20.Mf, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.64.194201

1 引言

表面等离子激元(surface plasmon polaritons, SPPs)是电子在金属与介质界面的集体振荡而形成的一种元激发, 其本质是一种沿金属表面传播的高频电磁波, 即沿金属表面方向为传播场, 而在垂直于金属表面方向, 电磁场被束缚在金属表面并呈指数衰减, 为隐失场^[1]. 由于其在纳米光电子学、超高分辨成像、表面增强拉曼光谱、全光器件、生物探测等方面的潜在应用而获得广泛关注^[2-5]. SPPs的激发、传播、聚焦以及与此相关的特殊光学效应也引起了人们的极大兴趣^[6-10]. 相较于光波, SPPs的波长更短, 局域在金属表面的电磁场强度更强, 所以利用SPPs聚焦可以得到亚微米尺度的高强度聚焦光斑, 进而为集成光电器件中纳米光

源的设计提供了可能. 而如何在纳米尺度上操纵SPPs, 使之能够形成有效聚焦, 也成为该领域目前研究的热点.

目前研究SPPs聚焦, 一般都是通过在金属表面设计不同微纳结构, 利用特定偏振态光源激发的方式来实现SPPs干涉聚焦的. 例如利用径向偏振光入射轴对称金属纳米圆环结构^[11], 利用线偏振光入射对称破缺圆环围栏结构^[12], 以及利用圆偏振光入射阿基米德螺旋结构^[13-15]等. 这几种方法实现SPPs聚焦的基本原理都相同, 都是利用入射光及金属纳米结构调制SPPs的相位分布, 使得其传播到聚焦中心时相位相长干涉, 形成亮斑. 其中利用圆偏光入射阿基米德螺旋微纳结构实现SPPs聚焦的方法是近年来发展起来的有趣方法, 由于实验条件相对宽松(结构易于制备且不需要入射光中

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2012CB933004, 2015CB932403)、国家自然科学基金(批准号:61176120, 61378059, 60977015, 61422501, 11374023)和北京自然科学基金(批准号:L140007)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhuxing@pku.edu.cn

心与结构中心严格对准)、聚焦斑强度大等优点而获得广泛关注. 为实现光场在纳米尺度的调控提供了新的思路.

相关学者在前期工作中已经对阿基米德螺旋结构中 SPPs 聚焦性质进行了大量而系统的研究, 他们发现了螺旋结构手性与入射圆偏振光手性对聚焦效应的影响, 即只有当螺旋结构与入射圆偏振光手性相反时, 才会在结构中心形成聚焦斑, 而当二者手性相同时, 会在结构中心附近形成中心为暗斑的聚焦圆环 [16,17]. 这种新奇的、人为可控可变的聚焦性质成为近年来研究热点, 并开始应用于其他领域, 例如在表面等离子激元光镊中实现对纳米粒子的俘获与旋转 [18] 等. 但是到目前为止, 研究中关注最多的还是结构与入射光的手性, 对于结构本身参数, 特别是决定螺旋形状的螺距对聚焦性质的影响尚不完备. 本文采用模拟设计、材料制备与近场光学表征的完美结合, 研究分析了该类结构对于光场调控的物理过程.

我们系统地研究了 SPPs 在不同螺距阿基米德螺旋微纳结构中的聚焦性质. 首先在理论上计算了螺旋结构内空间电场分布, 利用相位分析法得到了 SPPs 聚焦与入射激光偏振态、螺旋结构手性、入射光波长及结构螺距之间的关系. 然后利用有限时域差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 的方法模拟了不同螺距螺旋结构聚焦 SPPs 的电场及其结构空间相位分布情况. 在结构中心得到了对应不同阶贝塞尔函数的涡旋电场. 最后利用聚焦离子束 (focused ion beam etching, FIB) 刻蚀手段在金膜上制备了含有不同螺距的阿基米德微纳结构, 通过扫描近场光学显微镜 (scanning near-field optical microscopy, SNOM) 对结构表面近场区域光场分布进行了探测, 得到了随结构参数变化的不同光场分布.

2 阿基米德螺旋结构产生的表面等离子激元

2.1 阿基米德螺旋结构

根据结构旋性, 阿基米德螺旋结构可以分为左旋阿基米德螺旋结构及右旋阿基米德螺旋结构, 图 1 为在金膜上刻蚀右旋阿基米德螺旋狭缝结构示意图. 结构可以用下面的公式来表示:

$$r = r_0 + \sigma_s \frac{P}{2\pi} \theta, \quad (1)$$

其中, r 为螺旋结构上任意一点到结构中心 O 的距离. r_0 为螺旋结构的起始半径. $\sigma_s = \pm 1$ 代表螺旋结构的旋性 (右旋结构: $\sigma_s = +1$, 左旋结构: $\sigma_s = -1$). P 为螺旋结构的螺距, θ 为方位角. 圆偏振光从结构底部垂直入射, 在结构底部狭缝处激发 SPPs 沿狭缝传播到金膜上表面, 并沿金膜表面传播. 对于螺旋结构, 由于狭缝到结构中心 O 的距离 r 一直在变化, 所以狭缝上不同点激发的 SPPs 传播到结构中心 O 处会出现相位差, 从而产生一个与结构螺距 P 相关的动态相位. 而入射圆偏振光本身会沿螺旋狭缝结构形成涡旋相位波前分布, 即螺旋形结构相位, 且结构相位的旋性与入射圆偏振光的手性一致 [14,15]. SPPs 传播到螺旋形结构中心 O 处的总相位则为动态相位与结构相位之和, 这也决定了螺旋结构中心 SPPs 的聚焦情况.

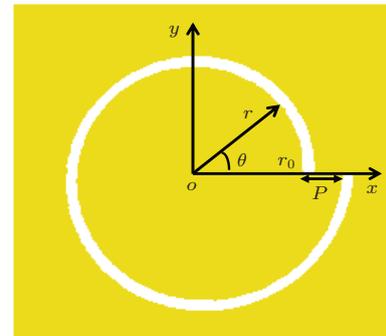


图 1 右旋阿基米德螺旋狭缝结构示意图

Fig. 1. Schematic of the right-handed Archimedean spiral structure.

2.2 螺旋结构聚焦的相位分析

入射圆偏振光沿传播方向可以分解为径向和切向两个分量, 当螺旋狭缝足够窄 (亚波长尺度) 时, 此时只有径向分量可以在金属狭缝处激发 SPPs. 因为此时切向分量相对于金属/介质界面为 TE 偏振, 径向分量为 TM 偏振, 而 SPPs 只能在 TM 偏振光下才能被激发, 所以只需考虑入射圆偏振光的径向分量. 而圆偏振光在垂直入射时其径向电场可以表示为:

$$E_i(r, \theta) \propto \exp(-i\omega t) \exp(i\sigma_i \theta), \quad (2)$$

其中, θ 为方位角, ω 为角频率, $\sigma_i = \pm 1$ 为圆偏振光的手性 (右旋圆偏振光: $\sigma_i = +1$, 左旋圆偏振光: $\sigma_i = -1$). 此时狭缝上不同点激发的 SPPs 传播到结构中任意半径 r_1 的同心圆环上的 SPPs 场可以

用下式表示^[16]:

$$E_{\text{spp}}(r_1, \theta) \propto \exp(-i\omega t) \exp(i\sigma_i \theta) \times \exp[ik_{\text{spp}}(r - r_1)], \quad (3)$$

其中, $k_{\text{spp}} = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{spp}}}$ 为 SPPs 的波矢. λ_{spp} 为 SPPs 波长, 其与入射光的波长的关系为

$$\lambda_{\text{spp}} = \sqrt{\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon}} \lambda_0, \quad (4)$$

式中, ε 为金膜的介电常数, 空气介电常数设为 1. λ_0 是真空中入射光波长. 我们将阿基米德螺旋结构的表达式(1) 代入(3) 式中, 便可以得到 SPPs 传播到螺旋结构内任一点的相对相位,

$$\phi_{\text{spp}}(r, \theta) = \left(\sigma_i + \sigma_s \frac{P}{\lambda_{\text{spp}}} \right) \theta = \sigma_{\text{spp}} \theta, \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{spp}} = \left(\sigma_i + \sigma_s \frac{P}{\lambda_{\text{spp}}} \right). \quad (6)$$

定义 σ_{spp} 为结构中 SPPs 的相位拓扑值, 用以表示螺旋结构中 SPPs 相位变化. 从上式中可以看出, σ_{spp} 不仅与入射圆偏振光及螺旋结构手性 σ_i , σ_s 有关, 还与螺距及入射光波长相关. 前人已经对螺距等于 SPPs 波长, 即 $P/\lambda_{\text{spp}} = 1$ 这种情况进行了深入而广泛的研究, 得到结构中 SPPs 的电场强度 E_z 分量分布为符合贝塞尔函数分布的隐失波,

$$E_z(r, \theta, z) \propto \exp(in\theta) J_n(k_{\text{spp}} r) \exp(ik_z z), \quad (7)$$

其中, E_z 是电场沿垂直金属表面的 z 方向分量, 因为 SPPs 沿金属表面传播时, 其垂直于表面的 E_z 分量远远大于径向分量, 所以可以用 E_z 近似表示 SPPs 在结构中的场强分布. k_z 是 SPPs 沿 z 方向的波矢分量, n 为整数, J_n 代表贝塞尔函数的阶数, 其与相位拓扑值关系如下:

$$n = |\sigma_{\text{spp}}|. \quad (8)$$

所以当入射圆偏振手性与螺旋结构手性相反时, $\sigma_i + \sigma_s = 0$, 此时 $n = 0$, 对应阶贝塞尔函数, SPPs 在结构中心聚焦为亮斑. 当入射圆偏振手性与螺旋结构手性相同时, $\sigma_i + \sigma_s = \pm 2$, 此时 $n = 2$, 对应 2 阶贝塞尔函数, SPPs 在结构中心形成一个中间为暗斑的聚焦环, 与前人所得的结果一致.

2.3 利用螺旋结构获得高阶涡旋电场

当 $P/\lambda_{\text{spp}} \neq 1$, 由(6) 式可知, 通过改变入射光手性 σ_i 、螺旋结构手性 σ_s 及螺旋结构螺距与

SPPs 波长的比值, 可以在结构中心得到 0 阶、1 阶、2 阶……直至任意更高阶贝塞尔函数形电场(涡旋电场), 以及相应的 SPPs 相位分布. 我们以右旋螺旋结构 ($\sigma_s = +1$) 为例, 当螺距 P 分别设定为 λ_{spp} , $2\lambda_{\text{spp}}$, $3\lambda_{\text{spp}}$ 及 $4\lambda_{\text{spp}}$ 时, 根据上面的理论分析, 结构中高阶涡旋电场的阶数 n 随入射圆偏振光手性 σ_i 变化情况应该如表 1 所示.

表 1 不同螺距右旋阿基米德螺旋结构中, 涡旋电场阶数 n 随圆偏振光手性变化

Table 1. Orders of the vortex electric field in the right-handed Archimedes' spiral structures with the different pitch of screw vs the chirality of the incident circularly polarized light.

螺距 P	λ_{spp}	$2\lambda_{\text{spp}}$	$3\lambda_{\text{spp}}$	$4\lambda_{\text{spp}}$
左旋光入射 $\sigma_i = +1$	0	1	2	3
右旋光入射 $\sigma_i = -1$	2	3	4	5

我们选取左旋圆偏振光入射 $P = 2\lambda_{\text{spp}}$ 的右螺旋结构为例, 分析结构中空间相位分布情况. 如图 2 所示, 由入射光偏振态引起的结构相位沿螺旋狭缝分布, 且与入射圆偏光旋性相同, 即与螺旋结构旋性相反, 此时狭缝上每个点激发 SPPs 的初始相位均不相同, 沿螺旋狭缝一整圈内从到 2π 线性变化. 基于螺旋结构本身特征, SPPs 传播到图中黑色虚线所示的圆环上的光程各不相同. 进而在虚线圆环上的相位为 SPPs 初始激发相位与传播中产生的动态相位分布之和. 如图中所示, 最终虚线上相位在整个圆环上恰好从 0 到 2π 线性变化, 此时相位拓扑值为 1, $\sigma_{\text{spp}} = \left(\sigma_i + \sigma_s \frac{P}{\lambda_{\text{spp}}} \right) = -1 + 1 \times 2 = 1$, 与上文表格中理论计算相符. 其他几种情况, 也可以按照相似的分析过程进行验证.

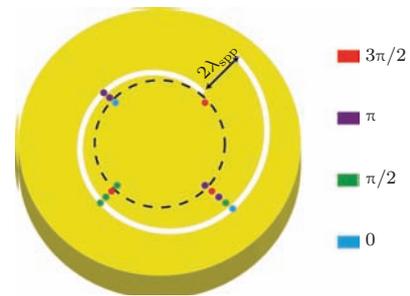


图 2 (网刊彩色) 右螺旋阿基米德螺旋结构空间相位的模拟计算分布图(螺距为 2)

Fig. 2. (color online) Calculated phase distribution in the right-handed Archimedes' spiral structure (two pitches of screw).

3 FDTD 模拟及讨论

为了验证理论及相位分析方法的正确性, 我们利用有限时域差分 (FDTD) 的方法模拟了不同情况下阿基米德螺旋结构聚焦及其结构空间相位分布. 同样还是选取右旋螺旋结构为例, 我们计算了螺距 P 分别为 λ_{spp} , $2\lambda_{\text{spp}}$, $3\lambda_{\text{spp}}$ 及 $4\lambda_{\text{spp}}$ 时, 不同手性圆偏光入射时, 结构中的电场 E_z 分量及相应的空间相位分布情况. 模拟结构衬底为石英, 相对介电常数设定为 2.25^[19], 金属选用 150 nm 厚的 Au 膜, 相对介电常数设定为 $-12.3 + 1.13j$ ^[19]. 入射激光波长为 671 nm, 对应表面等离子激元波长 $\lambda_{\text{spp}} = 640$ nm, 螺旋结构的初始半径 r_0 为 3 μm ,

狭缝宽度 150 nm. 图 3(a)—(d), (e)—(h) 分别为左旋和右旋圆偏光入射时, 不同螺距右旋阿基米德螺旋结构中的归一化的电场分布. 可以看到, 只有当 $n = 0$ 时才能在结构中心形成聚焦光斑, 图 3(a) 所示, 此时 $P = \lambda_{\text{spp}}$, 且入射光与螺旋结构旋性相反. 其他情况, 在结构中心形成的均为中心为暗斑的聚焦圆环, 且圆环的直径随着螺距及入射光手性的变化而变化. 同时, 如图 3(a₁)—(h₁) 所示, 我们还计算了对应结构中空间相位分布情况. 我们发现除了 $n = 0$ 之外, 其他情况结构中空间相位都发生了从 0 到 2π 的多次重复旋转变化, 重复次数为 n , 对应多阶贝塞尔函数的阶数. 计算结果与表 1 所示结果一致.

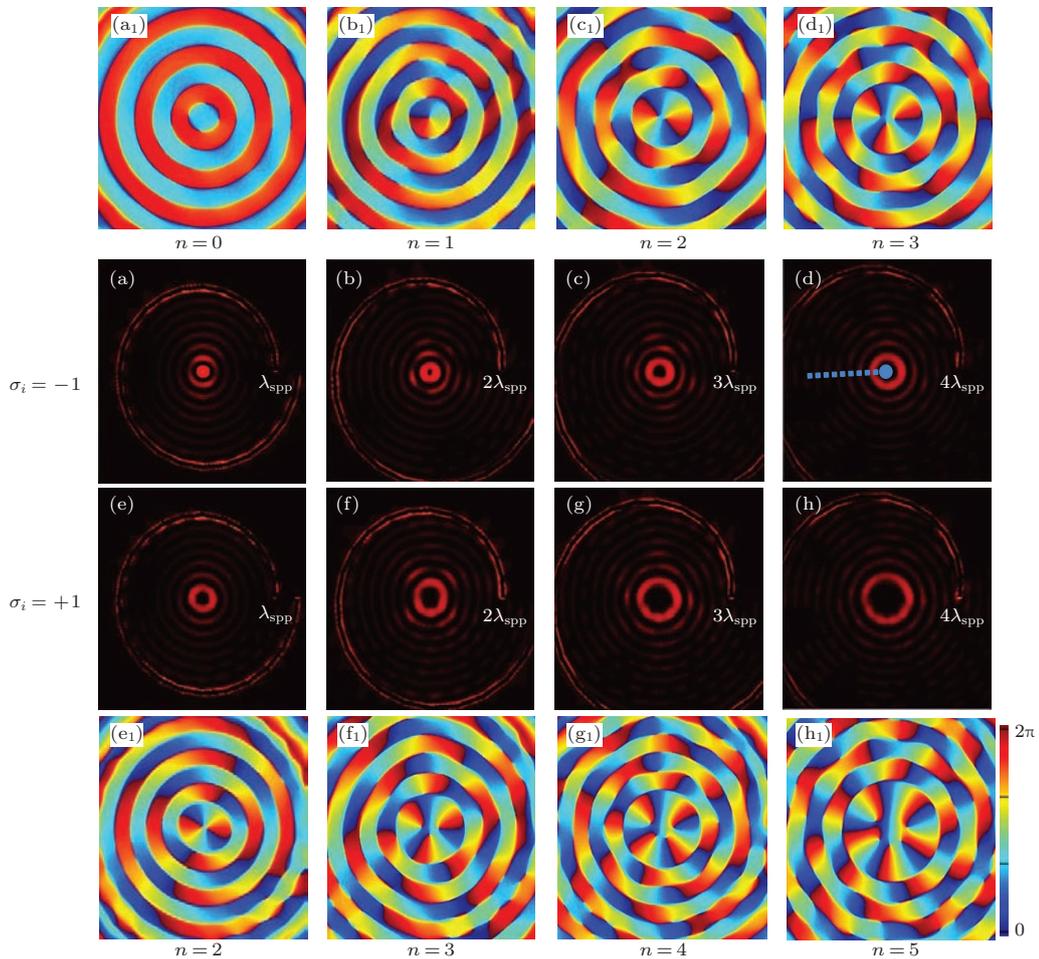


图 3 (网刊彩色) 不同手性圆偏振光入射下不同螺距的右旋阿基米德螺旋结构中空间相位及归一化电场强度分布 (a), (b), (c), (d) FDTD 模拟螺距 P 分别为 λ_{spp} , $2\lambda_{\text{spp}}$, $3\lambda_{\text{spp}}$ 及 $4\lambda_{\text{spp}}$ 的螺旋结构在左旋圆偏振光激发下 $|E_z|$ 方向的电场强度分布; (a₁, b₁, c₁, d₁) 为相应结构的相位分布; (e), (f), (g), (h) 及 (e₁, f₁, g₁, h₁) 分别为 FDTD 模拟右旋圆偏光入射下结构中电场强度及空间相位分布情况. 如图 h₁ 中标尺所示, 从蓝色到红色代表相位由 0 到 2π 线性变化

Fig. 3. (color online) FDTD simulation of the normalized electric field $|E_z|$ (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h) and phase (a₁, b₁, c₁, d₁, e₁, f₁, g₁, h₁) for the right-handed Archimedean spiral structures with the different pitch of screw, illuminated by the different chirality of the incident circularly polarized light. The top two rows: left-handed circularly polarized illumination; Bottom two rows: right-handed circularly polarized illumination. Columns (from left to right): the right-handed Archimedean spiral structures with pitch of screw equaling to λ_{spp} , $2\lambda_{\text{spp}}$, $3\lambda_{\text{spp}}$ and $4\lambda_{\text{spp}}$, respectively.

深入研究图 3(a)–(f) 中聚焦点以及随着螺距及入射光手性而变化的聚焦圆环, 我们发现当入射圆偏振光手性不变时, 随着螺距的增大, 结构中心形成的圆环的直径随着 n 的变大而逐渐增大, 如图 3(d) 中虚线所示, 当我们以结构中心 O 为起点, 沿圆环中心作剖面图, 就可以测量不同聚焦圆环半径的大小及聚焦环附近的电场强度. 图 4 为聚焦圆环半径及电场强度随 n 变化的曲线. 可以看出, $n = 0$ 时, 在结构中心形成了半波宽约为 220 nm 的高强度聚焦光斑, 半高宽远小于半波长. n 继续增大, 结构中心均为聚焦圆环, 且圆环半径随 n 值线性变化. n 每增加 1, 圆环半径增大约 $\frac{1}{4}\lambda_{\text{spp}}$. 与前人工作中提到的多阶贝塞尔函数形电场强度变化曲线 [17] 一致, 至此, 利用阿基米德螺旋结构, 通过调整入射光手性、螺旋结构手性、入射光波长及螺旋结构螺距等参数, 不仅可以实现在结构中心不同聚焦态之间的相互转化, 而且可以使聚焦圆环在亚波长尺度上扩张和收缩, 这种可控的涡旋电场分布为表面等离子体光镊俘获旋及转纳米粒子提供一种新方法, 并且在光通信、纳米光子学器件的设计等领域具有很大的应用潜力.

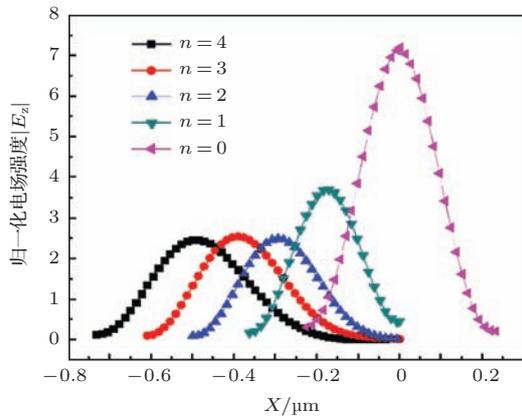


图 4 (网刊彩色) 由 FDTD 模拟结果得到的聚焦圆环半径及电场强度随 n 变化的曲线

Fig. 4. (color online) The intensity of electric field and the radius of the focusing rings calculated by FDTD as a function of n .

4 实验结果及讨论

通过以上的理论分析与数值模拟计算, 可以看出随着入射光手性、结构手性以及螺距的变化, 结构中心会形成聚焦光斑或者聚焦圆环两种不同的光场分布. 为了能够分别对两种不同光场进行观

测. 实验中我们选取了 $P = \lambda_{\text{spp}}$ 及 $P = 2\lambda_{\text{spp}}$ 两种右旋阿基米德螺旋结构, 图 5(a), (d) 分别是两种螺旋结构的扫描电子显微镜 (SEM) 图. 结构是由聚焦离子束刻蚀 (FIB) 的方法在 150 nm 厚的 Au 膜上刻蚀得到的, 而 Au 膜则是利用电子束蒸镀的方法沉积在石英基底上. 螺旋结构初始半径 r_0 为 3 μm , 狭缝宽 150 nm, 结构螺距分别 P 为 640 nm 及 1280 nm. 为了得到更好的聚焦效果, 图 5(a) 中采用了 3 圈螺旋结构. 且将图 5(d) 中第一圈之外用来增强 SPPs 场强度的光栅周期设置为 640 nm. 我们利用 SNOM (Nanonics, Multiview 1000) 对结构表面近场光场分布进行了测试. 入射激光波长为 671 nm, 经过偏振片, 1/4 波片后变为圆偏振光, 从结构底部垂直入射. SNOM 以收集模式在结构上表面做近场二维扫描. 扫描探针为 Al 膜覆盖的悬臂式光纤探针, 针尖数值孔径为 100 nm. 利用雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode system, APD) 收集结构表面 SPPs 信号. 图 5(b), (c), (e), (f) 为测量得到的近场光学图. 其中图 5(b), (c) 为结构图 5(a) 分别在左旋及右旋圆偏光入射时的 SNOM 图. 可以看出, 只有对于 $P = \lambda_{\text{spp}}$ 的右旋螺旋结构, 在左旋圆偏光入射时, 才会在结构中心形成一个明亮的焦点, 且焦点半高宽只有 230 nm, 如图 5(b) 所示. 当右旋圆偏光入射, 在结构中心可以看到一个明显的中间为暗斑的聚焦圆环结构, 如图 5(c) 所示, 此聚焦圆环直径为 650 nm (对应模拟结果为图 5(e) 中所得的 2 阶贝塞尔光束, 圆环直径 570 nm). 而图 5(e), (f) 为结构 5(d) 在左旋及右旋圆偏振光入射时的 SNOM 图. 可以看出, 对于 $P = 2\lambda_{\text{spp}}$ 的右旋螺旋结构, 左旋和右旋光入射在结构中心所得到的均为聚焦圆环, 且圆环半径分别为 370 nm, 780 nm (对应模拟结果为图 3(b), (f) 中所得的 1 阶、3 阶贝塞尔光束, 圆环半径分别为 340 nm, 800 nm). 实验结果与理论结果最大相对误差小于 10%, 很好的证明了理论及模拟的正确性. 注意在我们测得的近场光学图中, 对应螺旋狭缝的位置有很强光出射, 这是由于入射光从结构底部垂直入射时, 会有部分光直接沿狭缝透射, 从而使得狭缝处光场很强. 通过减小狭缝刻蚀深度或者减小狭缝宽度, 可以减弱这部分透射光强, 但是结构中 SPPs 信号也会相应的减弱. 所以在实验中狭缝宽度选择了 150 nm.

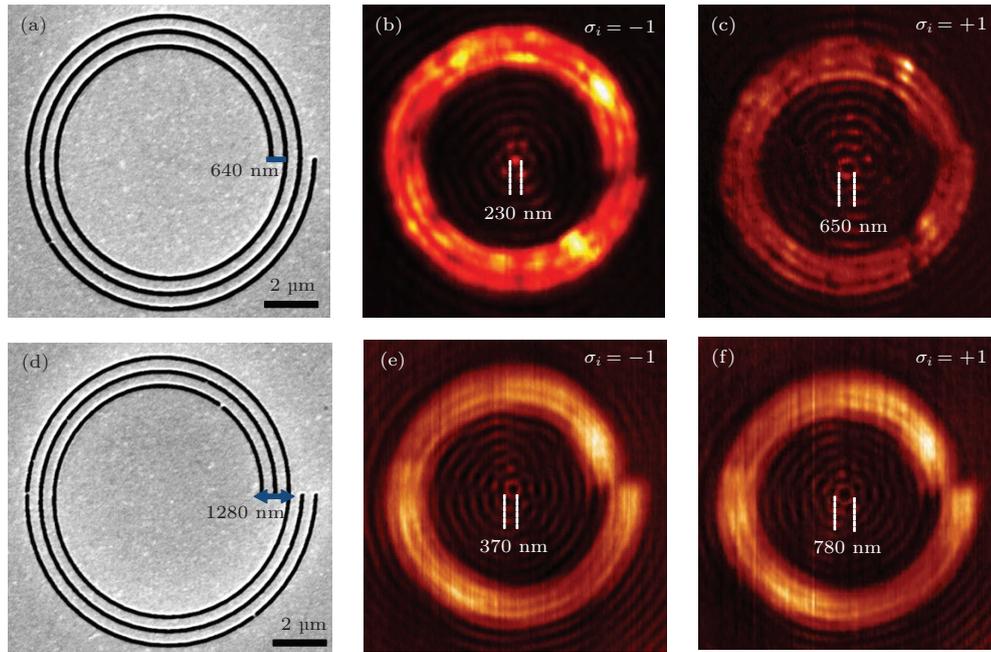


图5 (网刊彩色) 螺距 640 nm (a) 和螺距 1280 nm (d) 的右旋阿基米德螺旋结构的扫描电镜图; (b), (c), (e), (f) 不同螺距的结构在左旋 (c), (f) 和右旋 (d), (g) 圆偏振光入射下的近场光学图
 Fig. 5. (color online) (a, d) SEM images of the right-handed spiral structures with different pitch of screw, $P = 640$ nm (a) and $P = 1280$ nm (d); (b), (c), (e), (f) Measured SNOM images at the air/gold interface illuminated by left-handed (b), (e) and right-handed (c), (f) circularly polarized light.

5 结 论

本文中我们首先利用表面等离子激元的相位特征系统的研究了阿基米德螺旋结构聚焦效应, 在 671 nm 入射光下, 在结构中心可以得到半高宽 23 nm 的聚焦光斑, 光斑尺寸要小于入射光波长的一半. 通过研究我们还发现螺旋结构的聚焦性质不仅与结构及入射圆偏振光手性有关, 还与结构螺距及入射光波长相关. 通过改变入射光手性 σ_i 、螺旋结构手性 σ_s 及螺旋结构螺距与 SPPs 波长的比值, 在结构中心得到了多阶涡旋电场, 并给出了涡旋场中 SPPs 相位的成因及具体分布情况. 利用 FDTD 模拟计算了不同螺距螺旋结构在不同手性圆偏光入射时结构中的电场分布及其对应的空间相位分布情况, 证明了利用相位分析阿基米德螺旋结构聚焦效应的有效性. 在实验中, 利用 SNOM 对不同螺距结构在左右旋圆偏振光的照射下, 结构表面光场分布进行了测量, 实验结果很好的探测到了相应的涡旋光场, 与理论结果符合很好. 这种利用微纳结构在平面上二维聚焦 SPPs 及调控结构中不同光场分布的方式, 与利用三维结构对光场的调控相比, 更便于加工制备和缩小器件的体积, 在微纳光学芯

片中有很大的应用潜力. 同时这种可控激发的多阶涡旋电场在光通信中入射光手性检测及纳米光子学中激励不同光学模式等方面也有很好的应用前景.

参考文献

- [1] Raether H 1988 *Surface plasmons-on smooth and rough surfaces and on gratings* (Berlin: Springer-Verlag) pp23-25
- [2] Volkov V S, Bozhevolnyi S I, Leosson K 2003 *J. Microsc.* **210** 324
- [3] Pyayt A, Wiley B, Xia Y N 2008 *Nat. Nanotechnol.* **3** 660
- [4] Kennedy D C, Tay L L, Lyn R K 2009 *ACS Nano* **3** 2329
- [5] Fischer U, Pohl D 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 458
- [6] Fang Z Y, Lin C F, Ma R M 2010 *ACS Nano* **4** 75
- [7] Song W T, Fang Z Y, Huang S 2010 *Opt. Express* **18** 14762
- [8] Lee B, Kim S, Kim H 2010 *Prog. Quant. Electron* **34** 47
- [9] Holmgaard T, Gosciniak J, Bozhevolnyi S I 2010 *Opt. Express* **18** 23009
- [10] Falk A L, Koppens F H L, Yu C L 2009 *Nat Phys.* **5** 475
- [11] Vedantam S, Lee H, Tang J 2009 *Nano Lett.* **9** 3447
- [12] Fang Z Y, Peng Q A, Song W T 2011 *Nano Lett.* **11** 893
- [13] Yang S Y, Chen W B, Nelson R 2009 *Opt. Lett.* **34** 3047
- [14] Gorodetski Y, Niv A, Kleiner V, Hasman E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 043903
- [15] Chen W B, Abeyasinghe D C, Nelson R L 2010 *Nano Lett.* **10** 2075

- [16] Miao J J, Wang Y S, Guo C F 2011 *Plasmonics* **6** 235 1021
 [17] Tomoki O, Shintaro M 2006 *Opt. Express* **14** 6285
 [18] Tsai W Y, Huang J S, Huang C B 2013 *Nano Lett.* **10**
 [19] Palik E D 1985 *Handbook of optical constants of solids*(New York: Academic) p60

Focusing surface plasmon polaritons in archimedes' spiral nanostructure*

Li Jia-Ming¹⁾²⁾ Tang Peng¹⁾ Wang Jia-Jian¹⁾²⁾ Huang Tao¹⁾ Lin Feng¹⁾
 Fang Zhe-Yu¹⁾²⁾ Zhu Xing^{1)2)3)†}

1) (State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2) (Center for Nanoscale Science and Technology, Academy for Advanced Interdisciplinary Studies, Peking University, Beijing 100871, China)

3) (National Center for Nanoscience and Nanotechnology, Beijing 100190, China)

(Received 9 April 2015; revised manuscript received 10 May 2015)

Abstract

Surface plasmon polaritons (SPPs) are a hybrid mode of a light field and metallic collective electrons oscillated resonantly and excited at the metal/dielectric interface. Recently extensive research has been carried out due to its technological potential in nano-optics. The SPPs coupling, focusing, waveguiding and resonance enhancement are hot spots in this field. In particular, to find a simple method that can focus SPPs into a highly confined spot with the size beyond the diffraction limit is still a big challenge.

In this work, we have fabricated the Archimedes' spiral structures with different structural parameters on an Au film by using focused ion beam etching technique. Through changing the chiralities of the incident circularly polarized light and the spiral structure, we have studied theoretically and experimentally the focusing properties of the Archimedes spiral structures with different parameters. We find that besides the chiralities of the incident light and the spiral structure, the pitch of screw of the spiral structure and the wavelength of the excited light also affect the surface plasmon field. The resulting surface plasmon fields inside the structure are the zero-order, first-order, and high-order evanescent Bessel beams. By using a phase analysis and a finite-difference time-domain simulation method, we calculate the electric field and phase distribution in different spiral structures. A near-field vortex mode with different spin-dependent topological charges can be obtained in the structures. Furthermore, the results of the scanning near-field optical microscopy measurements verify the theory and simulation results.

The method of using an Archimedes' spiral structure to focus SPPs provides a new route to manipulate the SPPs optical field in nanoscale. Based on theoretical calculation and FDTD simulation in this work, we have studied the physical process of the optical field manipulation in spiral structures. The significant and innovated points of this work are: a) We have developed the phase theory, and analyzed the field manipulation process of spiral structures with different parameters and chiralities at different circular polarization and wavelengths. b) A more effective and convenient way is used for SPPs focusing in linearly polarized light and circularly polarized light. c) A near-field vortex surface mode with different spin-dependent topological charges is obtained for the structure. This work can be considered to have applications in SPPs tweezers, highly integrated photonic devices.

Keywords: surface plasmon polaritons, Archimedes' spiral structure, focusing, scanning near-field optical microscopy

PACS: 42.25.Bs, 42.79.Dj, 73.20.Mf, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.64.194201

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2012CB933004, 2015CB932403), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61176120, 61378059, 60977015, 61422501, 11374023), and the Beijing Natural Science Foundation, China (Grant No. L140007).

† Corresponding author. E-mail: zhuxing@pku.edu.cn