

金属-光折变材料复合全息结构对表面等离子激元的波前调控

谌璐 陈跃刚

Surface plasmon polaritons propagation controlled by metal-photorefractive material composite holographical structure

Chen Lu Chen Yue-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 067101 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181664

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181664>

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

[基于人工表面等离子激元的双通带频率选择结构设计](#)

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton

物理学报. 2018, 75(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180696>

[阿基米德螺旋微纳结构中的表面等离子激元聚焦](#)

Focusing surface plasmon polaritons in archimedes' spiral nanostructure

物理学报. 2015, 72(19): 194201 <https://doi.org/10.7498/aps.64.194201>

[十字结构银纳米线的表面等离子极化激元分束特性](#)

Surface plasmon polaritons splitting properties of silver cross nanowires

物理学报. 2015, 72(9): 097303 <https://doi.org/10.7498/aps.64.097303>

[基于塔姆激元-表面等离子极化激元混合模式的单缝加凹槽纳米结构的增强透射](#)

Enhanced optical transmission by exciting hybrid states of Tamm and surface plasmon polaritons in single slit with multi-pair groove nanostructure

物理学报. 2018, 75(10): 107104 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180117>

[基于微波表面等离子激元的360电扫描多波束天线](#)

360 scanning multi-beam antenna based on spoof surface plasmon polaritons

物理学报. 2016, 73(14): 147301 <https://doi.org/10.7498/aps.65.147301>

金属-光折变材料复合全息结构对表面等离激元的波前调控*

谌璐 陈跃刚†

(贵州大学物理学院, 贵阳 550025)

(2018年9月6日收到; 2018年12月27日收到修改稿)

表面等离激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 控制具有重要意义. 表面电磁波全息法是在金属表面设计能有效控制 SPP 传输的凹槽阵列结构. 本文提出一种新的 SPP 传输的控制方法, 利用金属-光折变材料复合全息结构控制 SPP 传播. 在金属表面覆盖一层光折变材料, 两束 SPP 波在光折变材料内干涉生成全息结构, 利用此全息结构能够控制 SPP 的传播. 通过时域有限差分法模拟验证, 结果显示, 通过金属-光折变材料复合全息结构可以有效地控制 SPP 波束的传输, 实现 SPP 平面波束的单点聚焦、两点聚焦, 以及生成零阶和一阶高斯 SPP 波束. 经过优化发现, 光折变材料的最佳厚度为 $3.3 \mu\text{m}$, 最佳折射率调制度为 0.06. 现有 SPP 控制器件主要是通过离子束刻蚀, 而金属-光折变材料复合全息结构不需要刻蚀, 从而扩展了 SPP 控制的器件的制作方法, 为 SPPs 的全光控制提供了新的思路, 使 SPP 全光控制成为可能, 进一步实现了 SPP 全光开关等功能.

关键词: 表面等离激元, 表面电磁波全息法, 阵列结构设计

PACS: 71.36.+c, 42.40.Eq, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.68.20181664

1 引言

表面等离激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 是金属表面电子集体振荡形成的一种波, 并局限于金属与介质之间的界面传播^[1,2]. 1902年, Wood^[1] 在实验中首次发现了 SPPs. 1998年, Ebbesen等^[2] 发现 SPPs 共振导致亚波长增强透射现象. 之后, SPPs 引起了研究者浓厚的兴趣. 由于光强增强和突破衍射极限两个独特的性质, SPPs 具有广泛的应用前景, 比如 SPP 传感器^[3,4]、集成光学^[5]、亚波长分子手术^[6] 和 SPP 激光器^[7,8] 等. 很多器件被提出来控制 SPPs, 以实现 SPP 波束在预设的路径中传播, 如波导器件^[9,10]、波分复用中的解复用器件^[11]、路由器件^[5] 等, 还有阵列结构操控 SPPs

散射, 如牛眼结构^[12]、亚波长小孔阵列结构^[13]、全息凹槽结构^[14] 等.

现已设计了很多 SPPs 波束的控制元件. Li 等^[15-17] 利用渐变周期纳米结构调制面内的 SPP 波束散射, 得到艾里 SPPs 波束、汇聚 SPPs 波束等, 实现了波面控制. 在波长控制方面, Tanemura 等^[18] 利用模拟退火算法设计了特定分布模式的纳米结构耦合自由空间中光波到 SPPs 波束, 使不同波长 SPPs 波聚焦于不同位置. 还有 Wang 等^[19] 也利用模拟退火算法设计波导阵列实现了 SPPs 多波长的聚焦和解复用功能. 另外, 利用 SPP 晶体可以实现二维的波长解复用器和多端口输出功能^[20]. Smith 课题组^[21,22] 利用液晶材料的取向光折变效应, 在金属表面产生了简单的光栅结构, 控制 SPP.

表面电磁波全息法 (surface wave holography,

* 国家自然科学基金 (批准号: 11764006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yg_chenyg@sina.com

SWH) 是一种 SPP 功能器件的设计方法. 利用其在金属表面设计凹槽阵列结构可有效控制 SPPs 的传播, 主要实现三方面的控制. 第一, 控制金属表面的 SPPs 向自由空间散射, 实现散射波在自由空间的单点聚焦、两点聚焦、波面整形 [23–25]. 第二, 控制金属表面内 SPP 波束的传播, 如 SPPs 波束侧向聚焦 [26,27]、复杂波面控制 [28]、横纵模可控的 SPPs 共振腔 [29] 等. 第三, 自由空间光束耦合到 SPPs 的控制 [30]. 表面 SWH 设计的过程简单, 结构直观, 设计器件功能多, 具有很广的应用前景.

以上这些方法设计的结构只可用聚焦粒子束或聚焦电子束等实验方法直接在金属表面刻蚀而得到 [15–30], 制作方法受到了限制, 而且这些结构都是直接刻蚀在金属表面上, 从而是固定不变的, 不能实现实时灵活的操控. 而光折变材料器件不需要刻蚀, 且能够实时灵活操控, 并已经有了大量关于光折变材料的研究. 当光照射进入光折变材料, 如铋酸锂、砷化镓 [31] 等时, 激发材料中自由电荷, 自由电荷漂移到暗光区, 形成空间电荷分布, 产生了空间电场, 最终空间电场通过线性电光效应改变材料折射率. 除了常见的光折变材料, 也有其他材料能够将光强分布转化为折射率分布, 如液晶盒 [22]、光致变色材料 [32] 等. 光折变材料应用十分广泛, 如应用于光信息处理、光信息储存、光图像转换等方面. 光折变材料还可以制作全息图, 将光强信息转化为折射率分布, 记录下来.

本文提出用金属-光折变材料复合全息结构控制 SPPs 波束的传播. 在金属表面覆盖一层光折变材料, 通过 SPP 波束的干涉在光折变材料中产生全息结构, 利用此全息结构实现 SPP 波传输的灵活控制.

2 金属-光折变材料复合全息原理

考虑控制 SPPs 波束在金属和电介质之间的界面上传播, 提出了金属-光折变材料复合全息原理, 包括写入和读出过程. 在写入过程中, 在金属与介质的界面上, SPP 物波与 SPP 参考波干涉, 得到强度分布 (图 1(a)). 设金属表面的介质为光折变材料, 则光强分布可以转化为相应的折射率分布型全息图, 此全息图能够控制金属表面光强相对较弱的 SPPs 的传播. 在读出的过程中 (图 1(b)), 与原来的参考 SPP 波束共轲的波束作为再现波, 入

射到全息图结构区域. 经过全息图结构对再现波束的反射和散射, 物波的共轲波被重构出来.

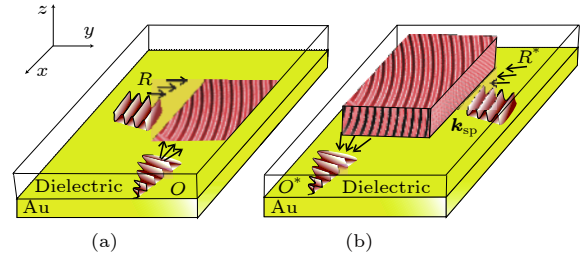


图 1 金属-光折变材料复合全息原理示意图 (a) 写入过程; (b) 读出过程

Fig. 1. Schematic of metal-photorefractive material complex holography: (a) Writing process; (b) reading process.

在写入过程中, 设参考 SPP 波 $RW(x, y) = R(x, y) \exp[-i \cdot \mathbf{k}_{rSP} \cdot \mathbf{r}(x, y)]$, 物 SPP 波 $OW(x, y) = O(x, y) \exp[-i \cdot \mathbf{k}_{oSP} \cdot \mathbf{r}(x, y)]$. 物波和参考波干涉, 光强分布为

$$I(x, y) = [RW(x, y) + OW(x, y)] \times [RW(x, y) + OW(x, y)]^* = RW^2 + OW^2 + 2R(x, y) \times O(x, y) \cos[\mathbf{K}(x, y) \cdot \mathbf{r}(x, y)], \quad (1)$$

其中 $\mathbf{K}(x, y) = \mathbf{k}_{rSP} - \mathbf{k}_{oSP}$ 为介质光栅矢量. 通过光折变材料将光强信息转化为折射率分布,

$$n(x, y) = n + \beta\{RW^2 + OW^2 + 2R(x, y) \times O(x, y) \cos[\mathbf{K}(x, y) \cdot \mathbf{r}(x, y) + \Phi]\} = n_0 + \Delta n(x, y), \quad (2)$$

其中, β 为光折变材料感应系数, $\Delta n(x, y)$ 为折射率调制函数, Φ 为空间电荷场相对于记录光强的干涉分布产生的相移. 没有外加电场时, $\Phi = \pi/2$. 此相移是全息光栅整体的相移, 相当于结构整体移动了 $1/4$ 个条纹距离, 对再现是没有影响的. 此光折变材料全息图位于金属表面, 形成金属-光折变材料复合全息图, 包含物波 $OW(x, y)$ 的信息.

金属-光折变材料全息图可以看成是三维全息图在传输方向的一个切面. 能利用体全息理论分析金属-光折变材料复合全息图, 讨论影响全息图再现效率的因素. 在读出过程中, 当再现波的入射角偏离写入过程的参考波角度为 $\Delta\theta$ 时, 相位失配因子 δ 可表示为 [33]

$$\delta = \Delta\theta \cdot K(x, y) \cdot \sin[\varphi(x, y) - \theta_r], \quad (3)$$

其中 $\varphi(x, y)$ 为折射率光栅的矢量倾角. 衍射波相位

失配因子由折射率光栅的空间变化而产生, 全息图的衍射效率与相位失配因子有关,

$$\eta = \frac{\sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + (\xi/\nu)^2}, \quad (4)$$

式中, 体全息的耦合强度 ν 和布拉格失配参量 ξ 分别为

$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos \theta_r \cos \theta_s)^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

$$\xi = \frac{\delta d}{2 \cos \theta_s}, \quad (6)$$

其中 d 为全息图在再现波传播方向上的尺度, θ_r 和 θ_s 分别为参考波和物波的方位角. 当再现波的入射角偏离参考波的角度 $\Delta\theta = 0$ 时, 即再现波满足布拉格条件时, 衍射效率为

$$\eta_0 = \sin^2 \nu. \quad (7)$$

由 (7) 式可知, 在满足布拉格角入射条件时, 衍射效率将随 $\Delta n d$ 增加而振荡变化. 因此, 控制光折变材料的折射率调制度和尺度, 可使衍射效率达到最佳状态. 通过研究, 我们找出了光折变材料全息图在衍射效率最大时对应的折射率调制度和全息结构尺度最佳值.

3 模拟结果

设计金属-光折变材料复合全息结构控制 SPP 波的传输. 设计全息图将平面的 SPP 波分别侧向精确聚焦到 1 个点和 2 个点, 以及生成 0 阶和 1 阶高斯 SPP 波束. 设 $z = 0$ 的 xy 平面为金属与介质的界面, 在此界面, SPP 波传播的波矢量 $\mathbf{k}_{\text{sp}} = n_{\text{eff}} \mathbf{k}_0$, 其中 $n_{\text{eff}} = \sqrt{\varepsilon_m \varepsilon_d / (\varepsilon_m + \varepsilon_d)}$, ε_m 和 ε_d 分别是金属和介质的介电常数. 考虑控制自由空间中波长为 $\lambda_0 = 1.064 \mu\text{m}$ 的光波, 金属在此波长段介电系数取 $\varepsilon_m = -48.75 + 3.64i$. 设介质的折射率的常数为 $n_0 = 1.45$. 在模拟设计中, 考虑到光折变材料的折射率调制度 n_1 值比较小 ($n_1 \ll n_0$), 设计全息图过程中计算物波和参考 SPP 波束的波矢 \mathbf{k}_{sp} 大小时, 光折变材料的介电系数取 $\varepsilon_d = n_0^2$. 这样能够大大简化设计过程. 还有在设计中将干涉光强 $I(x, y)$ 用最大值进行归一化得到 $\tilde{I}(x, y)$, 然后乘上系数 Δn , 得到折射率调制函数 $\Delta n \tilde{I}(x, y)$, 这与 (2) 式中 $\Delta n(x, y)$ 折射率调制函数对应. 这里 Δn 称为折射率调制度, 在全息图再现中非常重要.

首先, 设计全息图结构将沿 y 方向传输的 SPP 平面波侧向汇聚到 1 个点 $O(8 \mu\text{m}, 0)$ 处. 在写入过程中, 参考波设为沿 y 方向传输的 SPP 平面波, 表达式为 $RW = \exp(-i \cdot \mathbf{k}_{\text{sp}} \cdot \mathbf{y})$. 将此平面波汇聚到金属表面上点 $O(8 \mu\text{m}, 0)$ 处, 则物波设置为由 O 点发出的柱面, 表达式为

$$OW = \frac{A_0}{\sqrt{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}} \exp(-i \cdot \mathbf{k}_{\text{sp}} |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|).$$

这里 \mathbf{r} 为结构区域内点的位置矢量, \mathbf{r}_0 为物点的位置矢量. 物波与参考波干涉, 在 $-11 \mu\text{m} < x < 0 \mu\text{m}$ 和 $-10.5 \mu\text{m} < y < 10.5 \mu\text{m}$ 区域内设计全息图, 得到在此区域的干涉光强 (图 2(a)). 利用光折变材料将此光强分布转化为对应的折射率分布, 即图 2(a) 是所设计的将 SPP 平面波束汇聚于 1 点的光折变材料全息图.

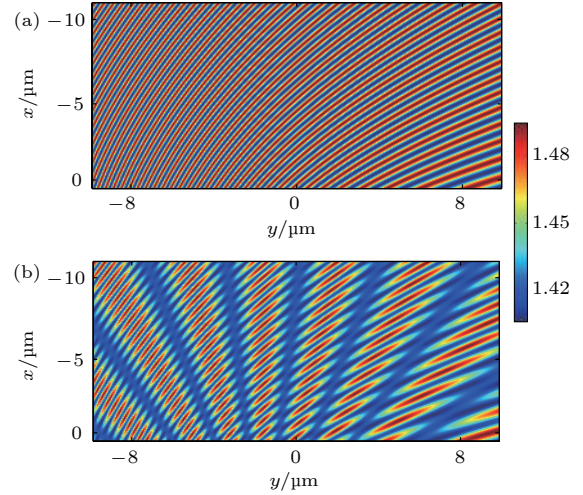


图 2 全息图设计 (a) 汇聚 SPP 波于 1 个点 $O(8 \mu\text{m}, 0)$; (b) 汇聚 SPP 波于 2 个点 $O_1(8 \mu\text{m}, -2 \mu\text{m})$ 和 $O_2(8 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m})$

Fig. 2. Designing the photorefractive holograms: (a) Focusing SPP at one point $O(8 \mu\text{m}, 0)$; (b) focusing SPP at two points $O_1(8 \mu\text{m}, -2 \mu\text{m})$ and $O_2(8 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m})$.

本文利用时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 法模拟全息图的再现过程. 在模拟中, 将模拟区域划分为 $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ nm}$ 的单元格子. 波长为 $\lambda_0 = 1.064 \mu\text{m}$ 束腰半径为 $4 \mu\text{m}$ 的高斯光束从自由空间中入射到金属表面的光栅上, 激发 SPP 高斯波束沿着 $-y$ 方向传播. 此 SPP 高斯光束波前是直的, 几乎等同于 SPP 平面光束, 因此能够扮演重建波束的角色读取全息图. 此 SPP 波入射到全息结构区域, 通过全息图的散射和反射, 生成所需的物波.

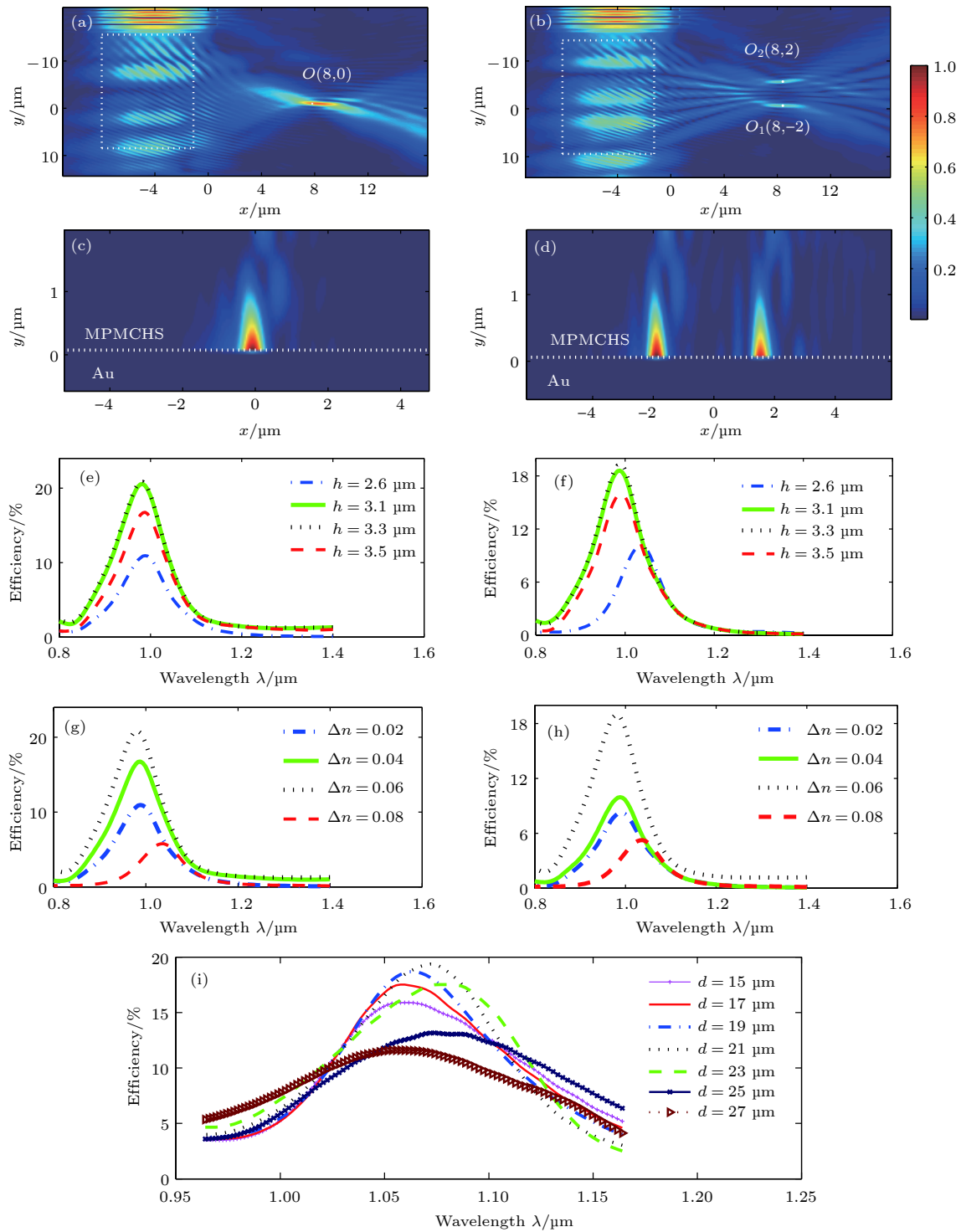


图 3 光折变材料汇聚平面 SPP 波到 1 个点和 2 个点的模拟结果 (a) 汇聚到 1 个点时 xy 平面的光强分布; (b) 汇聚到 2 个点对 xy 平面的光强分布; (c) 汇聚到 1 个点时焦点 yz 平面的光强分布; (d) 汇聚到 2 个点时焦点 yz 平面的光强分布; (e) 材料厚度对 1 个点汇聚耦合效率的影响; (f) 材料厚度对 2 个点汇聚耦合效率的影响; (g) 折射率调制度对 1 个点汇聚耦合效率的影响; (h) 折射率调制度对 2 个点汇聚耦合效率的影响; (i) 全息图尺度对 2 个点汇聚耦合效率的影响

Fig. 3. Simulation results of coupling SPP wave to a point and two points by metal-photorefractive material complex holography structures: (a) Intensity distribution in the xy plane for focusing SPP to a point; (b) intensity distribution in the xy plane for focusing SPP to two points; (c) intensity distribution in the yz plane for focusing SPP to a point; (d) intensity distribution in the yz plane for focusing SPP to two points; (e) influence of material thickness on coupling efficiency for focusing SPP to a point; (f) influences of material thickness on coupling efficiency for focusing SPP to two points; (g) influence of refractive modulation on coupling efficiency for focusing SPP to a point; (h) influence of refractive modulation on coupling efficiency for focusing SPP to two points; (i) influence of hologram dimension on coupling efficiency for focusing SPP to two points.

通过 FDTD 法模拟 SPP 波入射到图 2(a) 所示的折射率分布全息图中. 光折变材料折射率调制度设置 $\Delta n = 0.06$, 厚度为 $3.3 \mu\text{m}$ 时, 模拟得到在金属表面 (xy 平面) 和焦面 (yz 平面) 的光强分布, 分别如图 3(a) 和图 3(c) 所示. 从图 3(a) 可以看到, 在金属表面 $O(8 \mu\text{m}, 0)$ 点处出现明显的焦点, 这说明所设计的光折变材料全息结构能将平面的 SPP 波侧向汇聚于目标点. 考虑材料的厚度和折射率调制度对耦合效率的影响. 耦合效率定义为流过焦面上 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 区域内的能流与入射进入结构区域内的能流之比. 固定折射率调制度为 $\Delta n = 0.06$, 当厚度从 $2.6 \mu\text{m}$ 增加到 $3.5 \mu\text{m}$ 时, 耦合效率的变化如图 3(e) 所示. 可以看到当厚度为 $3.3 \mu\text{m}$ 时, 耦合效率达到最高, 为 21%. 固定厚度为 $h = 3.3 \mu\text{m}$, 当折射率调制度 Δn 从 0.02 增加到 0.08 时, 耦合效率的变化如图 3(g) 所示. 可以看到折射率调制度 $\Delta n = 0.06$ 时, 耦合效率达到最高, 为 21%.

考察全息图尺度对耦合效率的影响, 结果如图 3(i) 所示. 当其他条件不变, 全息图 y 方向的宽度 d 从 $15 \mu\text{m}$ 增大到 $21 \mu\text{m}$ 时, 耦合效率谱的最大值从 15% 增加到 19%; 当 d 从 $21 \mu\text{m}$ 增大到 $27 \mu\text{m}$ 时, 耦合效率谱的最大值逐渐减少, 从 19% 减小到 10%.

设计全息结构将平面 SPP 波汇聚到 2 个点. 在写入过程中, 参考波与汇聚到一点时相同, $RW = \exp(-i \cdot \mathbf{k}_{\text{sp}} \cdot \mathbf{y})$. 将此波汇聚到金属表面上 $O_1(8 \mu\text{m}, -2 \mu\text{m})$ 和 $O_2(8 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m})$ 两点, 相应物波的表达式为 $OW = \frac{A_0}{\sqrt{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|}} \exp(-i \cdot \mathbf{k}_{\text{sp}} \cdot |\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|) + \frac{A_0}{\sqrt{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_2|}} \exp(-i \cdot \mathbf{k}_{\text{sp}} \cdot |\mathbf{r} - \mathbf{r}_2|)$. 这里 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 分别为两个物点 O_1 和 O_2 的位置矢量. 得到在此区域的干涉光强如图 2(b) 所示. 利用光折变材料将此光强分布转化为对应的折射率分布, 即图 2(b) 是所设计的将 SPP 平面波束汇聚于 2 个点的光折变材料全息图.

通过 FDTD 法模拟 SPP 波入射到图 2(b) 所示的折射率分布全息图中. 光折变材料折射率调制度设置为 $\Delta n = 0.06$, 厚度为 $3.3 \mu\text{m}$ 时, 在金属表面 (xy 平面) 和焦面 (yz 平面) 光强分布分别如图 3(b) 和图 3(d) 所示. 从图 3(b) 和图 3(d) 可以看到, 在金属表面 $(8 \mu\text{m}, -2 \mu\text{m})$ 和 $(8 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m})$ 处

出现两个明显的焦点, 这说明设计的光折变材料结构能将平面的 SPP 波侧向汇聚于两个目标点. 固定折射率调制度为 $\Delta n = 0.06$, 当厚度从 $2.6 \mu\text{m}$ 增加到 $3.5 \mu\text{m}$ 时, 耦合效率的变化如图 3(f) 所示. 可以看到当厚度为 $3.3 \mu\text{m}$ 时, 耦合效率达到最高, 为 19%. 固定厚度为 $h = 3.3 \mu\text{m}$, 当折射率调制度 Δn 从 0.02 增加到 0.08 时, 耦合效率的变化如图 3(g) 所示. 可以看到折射率调制度 $\Delta n = 0.06$ 时, 耦合效率达到最高, 为 19%.

从上面的模拟结果中可以看到, 光折变材料的厚度、全息图的宽度和折射率调制度会对耦合效率产生影响. 光折变材料的厚度对整个复合材料的有效折射率 n_{eff} 有影响, 从而影响全息结构的耦合效率. 当全息结构的尺度和折射率调制度发生变化时, 根据 (5) 式, v 发生变化; 根据 (6) 式, v 变化导致耦合效率发生变化. 通过模拟寻找到材料最佳的厚度为 $3.3 \mu\text{m}$, 折射率调制度最佳值为 0.06 和全息图 y 方向宽度为 $21 \mu\text{m}$.

下面设计全息结构将平面 SPP 波转化为 0 阶和 1 阶 SPP 高斯波束. 沿 $-x$ 方向传输的 0 阶高斯波束在 xy 平面上的场分布可表达为

$$E = \left(\frac{w_0}{w_y} \right) \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{w_y^2}\right) \cdot \exp\left[-i \cdot k_{\text{sp}} x - i \cdot k_{\text{sp}} \left(\frac{y^2}{2R_z}\right) + i \cdot \tan\left(\frac{x}{y_0}\right)\right], \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} y_0 &= 3.14\lambda_0; \\ w_y &= w_0 \sqrt{1 + (x/y_0)^2}; \\ R_z &= x \left[1 + (y_0/x)^2\right]; \end{aligned}$$

w_0 为高斯波束的束腰半径, 束腰位于金属表面 $x = 0$ 的线上, 半径为 $2 \mu\text{m}$. 在区域 $-15 \mu\text{m} < x < -5 \mu\text{m}$ 和 $-10.5 \mu\text{m} < y < 10.5 \mu\text{m}$ 内, SPP 波束的波阵面分布如图 4(a) 所示. 参考波为平面波, 表达式为 $E_2 = \exp(-i \cdot \mathbf{k}_{\text{sp}} \cdot \mathbf{y})$. 高斯 SPP 物波与平面参考物波在区域内的光折变材料中干涉, 得到干涉光强, 即得到光折变材料内的折射率分布, 如图 4(b) 所示.

通过 FDTD 法模拟光折变材料全息图的再现过程. 平面 SPP 波入射到光折变材料全息图区域内, 通过结构的散射和反射, 结果如图 4(c)–(f) 所

示. 在金属表面, 从图 4(c) 的光强分布和图 4(d) 的波阵面分布可以看出, 束腰位于 $x = 0$ 的高斯波束. 图 4(e) 给出了束腰处的目标波束光强的理论分布曲线和 FDTD 法恢复出来的光强分布曲线. 从图 4(e) 可以看出, 生成的高斯波束与目标高斯波束分布基本相同, 束腰半径都为 $2 \mu\text{m}$, 这证明结构生成了 0 阶高斯波束. 图 4(f) 给出了光折变材料调制度对耦合效率的影响. 这里耦合效率定义为通过束腰处 $4 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 区域内的能流与入射进入结构区域内的能流之比. 从图 4(f) 可以看出, 当折射率调制度 $\Delta n = 0.06$ 时, 耦合效率达到最高, 为 8.5%.

设计光折变材料全息结构生成 1 阶高斯波束. 沿 $-x$ 方向传输的 1 阶高斯波束在 xy 平面上的场分布可表达为

$$E = A \cdot y \cdot \left(\frac{w_0}{w_y} \right) \cdot \exp \left(\frac{-y^2}{w^2} \right) \cdot \exp \left[-i \cdot k_{\text{sp}} \cdot x - \left(\frac{i \cdot k_{\text{sp}} \cdot y^2}{2 \cdot R_z} \right) + i \cdot \tan \left(\frac{x}{y_0} \right) \right], \quad (9)$$

其中束腰半径为 $1 \mu\text{m}$. 在区域 $-11 \mu\text{m} < x < 0 \mu\text{m}$ 和 $-10.5 \mu\text{m} < y < 10.5 \mu\text{m}$ 内, SPP 波束波阵面分布如图 5(a) 所示. 参考波为平面波束, 表达式为 $E_2 = \exp(-i \cdot \mathbf{k}_{\text{sp}} \cdot \mathbf{y})$. 1 阶 SPP 高斯物波与平面参考物波在光折变材料内干涉, 得到干涉光强, 即得到光折变材料内相应的折射率分布, 如图 5(b) 所示.

通过 FDTD 法模拟光折变材料全息图的再现过程. 平面 SPP 波入射到光折变材料全息图区域内, 通过全息图的散射和反射, 结果如图 5(c)–(f) 所示. 从金属表面的光强分布 (图 5(c)) 和波阵面

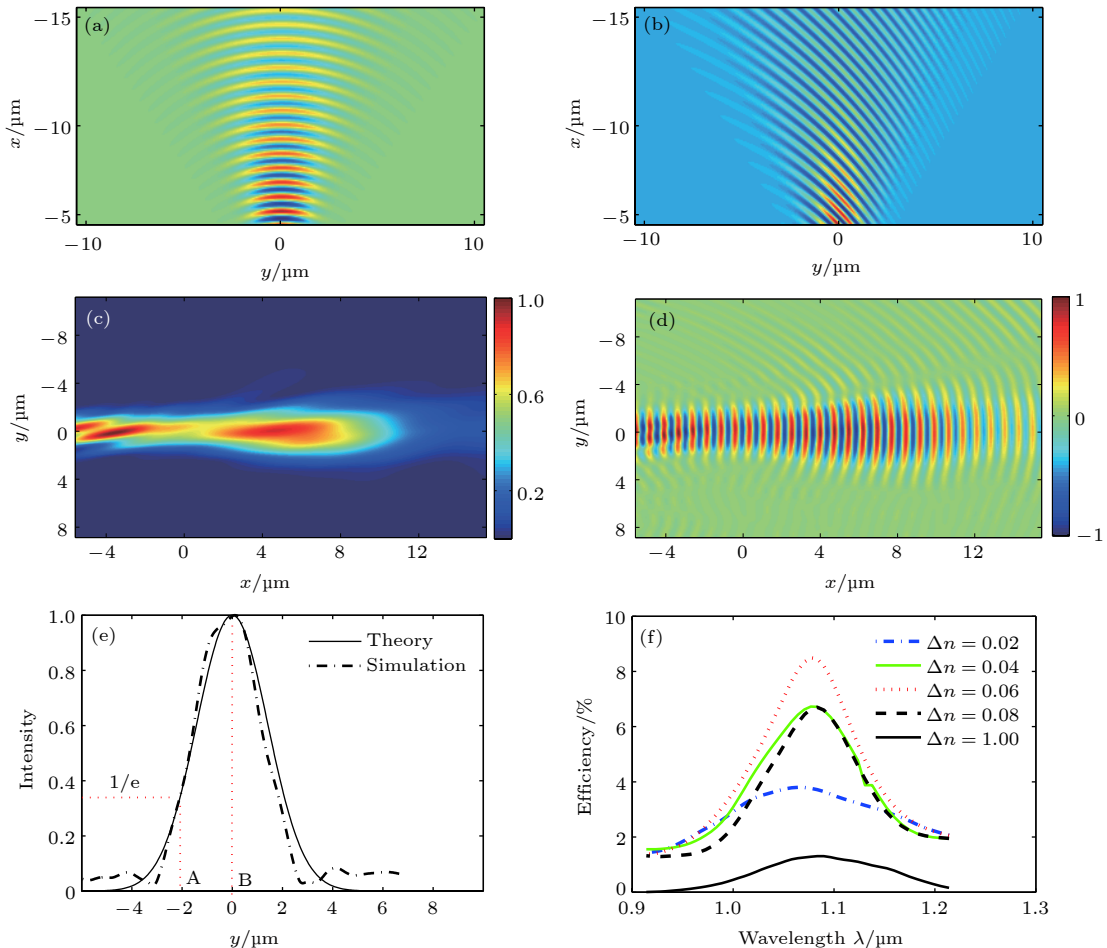


图 4 零阶高斯 SPP 波束的生成, 其中图 (a) 和 (b) 为物波波面分布、物波和参考光波干涉产生的光强分布; 全息图读出的模拟结果, 包括 xy 平面的 (c) 光强分布和 (d) 波阵面分布, (e) SPP 高斯波束束腰处光强分布, (f) 折射率调制度对耦合效率的影响

Fig. 4. Generation of Gaussian zero-order SPP beam in writing process: (a) Object SPP wavefront; (b) interference intensity distribution between object wave and reference wave. Simulation results of reading process: (c) intensity and (d) wavefront distribution in xy plane; (e) intensity distribution on waist for theory and simulation; (f) influence of refractive modulation on coupling efficiency.

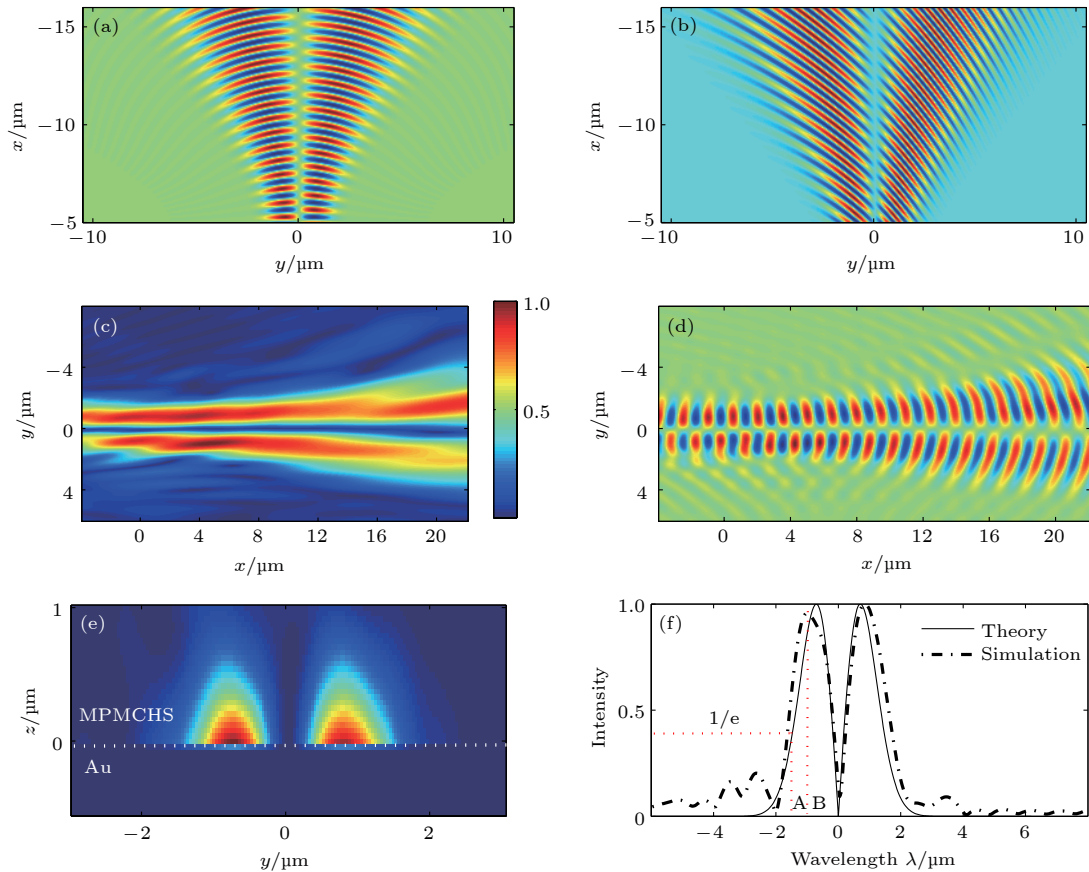


图 5 1 阶高斯 SPP 波束的生成, 其中图 (a) 和 (b) 为物波波面分布、物波和参考光波干涉产生光强分布; 读出过程的模拟结果, 包括 xy 平面内 (c) 光强分布和 (d) 波阵面分布, (e) $x = 0$ 处 yz 截面内光强分布, (f) 理论和模拟的 1 阶 SPP 高斯波束束腰处光强分布

Fig. 5. Generation of Gaussian first-order SPP beam in writing process: (a) Object SPP wavefront; (b) interference intensity distribution between object wave and reference wave. Simulation results of reading process: (c) intensity and (d) wavefront distribution in xy plane; (e) intensity distribution on yz plane with $x = 0$; (f) intensity distribution on waist for theory and simulation.

分布 (图 5(d)) 可以看出, 生成了束腰位于 $x = 0$ 的 1 阶 SPP 高斯波束. 图 5(e) 给出 $x = 0$ 处截面光强分布, 可以看出, 表面 SPP 束缚于金属表面, 远离界面时光强迅速衰减. 图 5(f) 给出了束腰处的目标波束光强的理论分布曲线和 FDTD 法恢复出来的光强分布曲线. 可以看出, 生成的 1 阶高斯 SPP 波束与目标波束分布基本相同, 束腰半径都为 $1 \mu\text{m}$.

4 结 论

本文提出利用金属-光折变材料复合全息结构对 SPP 波束的操控. 基于光折变材料工作原理, 利用表面全息法在光折变材料中设计结构对 SPP 波束进行操控. 在不需要任何刻蚀的情况下制作结构, 实现 SPP 复杂波面的控制. 利用 FDTD 法对设计结构进行验证, 结果表明, 金属-光折变材料复

合全息结构能对 SPP 波束进行有效操控, 实现了如平面 SPP 波束 1 点聚焦、2 点聚焦, 0 阶和 1 阶高斯 SPP 波束的生成. 这种控制方法扩展了 SPP 控制器件设计和制作方法, 也为 SPP 的全光控制提供了新的思路, 使 SPP 全光控制成为可能, 进一步实现了 SPP 全光开关等功能.

参考文献

- [1] Wood R W 1902 *Philos. Mag.* **18** 296
- [2] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, Thio T, Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [3] Homola J, Yee S S, Gauglitz G 1999 *Sens. Actuators B* **54** 3
- [4] Feng L H, Zeng J, Liang D K, Zhang W G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 124207 (in Chinese) [冯李航, 曾捷, 梁大开, 张为公 2013 *物理学报* **62** 124207]
- [5] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, Laluet J Y, Ebbesen T W 2006 *Nature* **440** 508
- [6] Csaki A, Garwe F, Steinbruck A, Maubach G, Festag G, Weise A 2007 *Nano Lett.* **7** 247
- [7] Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, Ma R M, Gladden C,

- Dai L, Bartal G, Zhang X 2009 *Nature* **461** 629
- [8] Bergman D J, Stockman M I 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 027402
- [9] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, Ebbesen T W 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 046802
- [10] Guo Y N, Xue Y N, Zhang W M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4168 (in Chinese) [郭亚楠, 薛文瑞, 张文梅 2009 物理学报 **58** 4168]
- [11] Lu C C, Liu Y C, Hu X Y, Yang H, Gong Q H 2016 *Sci. Rep.* **6** 27428
- [12] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, Linke R A, Martín-Moreno L, Garcia-Vidal F J, Ebbesen T W 2002 *Science* **297** 820
- [13] Yin L, Vlasko-Vlasov V K, Pearson J, Hiller J M, Hua J, Welp U, Brown D E, Kimball C W 2005 *Nano Lett.* **5** 1399
- [14] Zhang G H, Chen Y G 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 1113003 (in Chinese) [张国浩, 陈跃刚 2015 光学学报 **35** 1113003]
- [15] Li L, Li T, Wang S M, Zhang C, Zhu S N 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 126804
- [16] Li L, Li T, Wang S M, Zhang C, Zhu S N 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 046807
- [17] Li L, Li T, Tang X M, Wang S M, Wang Q J, Zhu S N 2015 *Light: Sci. Appl.* **4** e330
- [18] Tanemura T, Balram K C, Ly-Gagnon D S, Wahl P, White J S, Brongersma M L, Miller D A 2011 *Nano Lett.* **11** 2693
- [19] Wang B, Wu X, Zhang Y 2013 *Plasmonics* **8** 1535
- [20] Drezet A, Koller D, Hohenau A, Leitner A, Aussenegg F R, Krenn J R 2007 *Nano Lett.* **7** 1697
- [21] Abbott S B, Daly K R, D'Alessandro G, Kaczmarek M, Smith D C 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 1947
- [22] Stephen B A, Keith R. Daly, Giampaolo D'Alessandro, Kaczmarek M, Smith D C 2012 *Opt. Lett.* **37** 2436
- [23] Chen Y H, Fu J X, Li Z Y 2011 *Opt. Express* **19** 23908
- [24] Chen Y H, Zhang M Q, Gan L, Wu X Y, Sun L, Liu J, Wang J, Li Z Y 2013 *Opt. Express* **21** 17558
- [25] Chen Y H, Huang L, Gan L, Li Z Y 2012 *Light: Sci. Appl.* **1** e26
- [26] Chen Y G, Chen Y H, Li Z Y 2014 *Opt. Lett.* **39** 339
- [27] Chen Y G, Yang F Y, Liu J, Li Z Y 2014 *Opt. Express* **22** 14727
- [28] Chen Y G, Wang Y, Li Z Y 2014 *Plasmonics* **9** 1057
- [29] Liu J, Chen Y G, Gan L, Xiao T H, Li Z Y 2016 *Sci. Rep.* **6** 27565
- [30] Chen Y G, Li Z Y 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 020501
- [31] Ashkin A, Boyd G D, Dziedzic J M 1966 *Appl. Phys. Lett.* **9** 72
- [32] Akella A, Sochava S L, Hesselink L 1997 *Opt. Lett.* **22** 919
- [33] Tao S Q, Jiang Z Q, Wan Y H, Wang D Y, Wang Y X 2013 *Optical Volume Holography and its Applications* (Beijing: Science Press) p23 (in Chinese) [陶世荃, 江竹青, 万玉红, 王大勇, 王云新 2013 光学体全息技术及应用 (北京: 科学出版社) 第23页]

Surface plasmon polaritons' propagation controlled by metal-photorefractive material composite holographical structure*

Chen Lu Chen Yue-Gang[†]*(School of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China)*

(Received 6 September 2018; revised manuscript received 27 December 2018)

Abstract

Control of surface plasmon polaritons' (SPPs') propagation is of great importance. The groove structure in metal surface, designed by the surface electromagnetic wave holography (SWH) method, can control the SPPs' propagation effectively. In the SWH method, all designed groove structures are etched in metal surface. The fabrication method is confined to the etching method, such as the focused ion beam lithography and electron beam lithography. And the designed structures cannot implement the real-time control of SPP propagation. We propose a new method to control SPPs' propagation through metal-photorefractive material composite holographical (MPRCH) structures. A photorefractive material film is coated on the metal surface, and the reference SPP wave interferes with the object SPP wave in the photorefractive material film. The interference intensity is recorded by the photorefractive material film, forming the MPRCH structure. The MPRCH structure is used to control the propagation of relatively weak SPP waves. The finite difference time domain method is used to verify the method. We simulate that a reconstructed SPP wave is incident into the structure region and interacts with the structure. The incident wave is reflected and scattered by the designed MPRCH structure. These reflected and scattered wave are propagated and superposed, forming the desired SPP wave on the metal surface. Simulation results show that the MPRCH structure can control SPPs' propagation effectively and realize the functions such as SPP wave aside single-point focusing, two-point focusing, generating zero-order and first-order Gaussian SPP beams. It is found that the optimal thickness of the MPRCH film is 3.3 μm and modulation amplitude of refractive index is 0.06. This method extends the SPP device fabrication methods, and gets rid of the etching method. Based on the investigation, the real-time controlling of SPP wave may be realized through the MPRCH structure. The study provides a new idea for realizing the all-optical control of SPP propagation, thus making it possible to implement the all-optical control of SPP and further switch.

Keywords: surface plasmon polaritons, surface electromagnetic wave holography method, array structure design

PACS: 71.36.+c, 42.40.Eq, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.68.20181664

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11764006).

[†] Corresponding author. E-mail: yg_chenyg@sina.com