

表面等离子体激元耦合到自由空间中光束的研究

尹娟, 陈跃刚

贵州大学物理学院, 贵州 贵阳 550025

摘要 在光学集成中,金属表面的等离子体传输控制非常重要。应用表面波全息法设计结构控制表面等离子体波耦合到自由空间中的光波。模拟金属表面等离子体波束与自由空间中目标光束的标量叠加,得到干涉光强。在光强极大值的地方刻蚀凹槽,获得凹槽结构。当表面等离子体波入射到设计的结构中,凹槽散射等离子体波并在自由空间中进行叠加,得到所需的光束。利用此原理,在金属表面设计了两个结构,将传输的等离子体波耦合到自由空间中,汇聚于指定的一点或者两点。利用时域有限差分法模拟验证了此原理的可行性。这种耦合方式可以作为解决表面等离子体集成光路中探测问题的一种方案,将传输的表面等离子体信号耦合到自由空间,然后利用传统光电探测设备探测。

关键词 表面光学; 表面等离子体; 光学集成; 表面波全息法; 时域有限差分法; 干涉

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.042401

Coupling Surface Plasmon Polaritons into Beams in Free Space

Yin Juan, Chen Yuegang

School of Physics, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract Transmission control of the plasma on the metal surface in optical integration is very important. Structures are designed to couple the surface plasmon polaritons (SPPs) to the light wave in free space by surface wave holography. Interference light intensity is obtained through simulating the scalar superposition of the SPP wave beam and the target beam in free space. Groove structures are obtained by etching grooves at the maximum light intensity positions. When the SPP waves are incident to the designed structures, the grooves scatter the SPP waves into free space and then the waves superpose there, generating the required light beam. Based on the principle, two structures are designed for coupling the SPP waves to focus on one or two specified points in free space. The finite-difference time-domain method is used to verify the principle. This coupled manner can be used as a method for solving the detection problem in the surface plasmon integrated optics. The SPP signal is coupled into free space and detected by common photodetectors.

Key words optics at surfaces; surface plasma; optical integration; surface wave holography; finite-difference time-domain method; interference

OCIS codes 240.6680; 240.6690; 250.5403

1 引言

表面等离子体激元(SPP)是指在金属表面存在的自由振动的电子与入射光子相互作用产生的沿着金属表面传播的电子疏密波^[1-4]。表面等离子体电磁波局限于金属表面,在垂直于金属表面的方向上能量呈指数衰减。表面等离子体能够突破光学衍射极限,使得纳米光学集成成为可能^[5]。

在表面等离子体光学集成中,表面等离子体的激发、操控和探测是三个非常基本的问题。在表面等离子

收稿日期: 2016-10-08; **收到修改稿日期:** 2016-12-08

基金项目: 贵州省科技合作计划(黔科合 LH 字[2015]7642)

作者简介: 尹娟(1989—),女,硕士研究生,主要从事表面等离子体方面的研究。E-mail: yj_yjuan@sina.com

导师简介: 陈跃刚(1978—),男,博士,教授,主要从事表面等离子体、光子晶体方面的研究。

E-mail: yg_chenyg@sina.com(通信联系人)

体的激发中,基本的方法是利用全反射实现波矢匹配,激发等离子体波^[6]。利用亚波长阵列结构也可以实现波矢匹配,如小孔^[7-10]、凹槽^[11-13]和颗粒阵列^[14-15]激发表面等离子体波。为有效操控表面等离子体传输,许多亚波长波导被提出,例如金属-绝缘体-金属波导^[16-18]、矩形波导^[19]和V型凹槽波导^[20]等。为有效地探测表面等离子体能量,需要将表面等离子体能量耦合到自由空间中。利用金属光栅控制狭缝中波束向自由空间中耦合,实现等离子体的准直^[21]。在金属板上小孔周围分布的“牛眼”结构可以实现小孔中出射光束的准直^[22]。利用表面全息法在圆形小孔和长矩形小孔周围设计凹槽结构可以汇聚出射光束到自由空间中任意位置^[23-24]。在已有的研究中,耦合表面等离子体能量到自由空间中光波的方法主要是在小孔周围进行结构设计,对小孔激发的表面等离子体能量进行散射耦合^[25-26]。在表面等离子体集成光学中,表面等离子体耦合到自由空间光波中需要更灵活的控制方式,例如表面等离子体在不同金属表面间的耦合,以及探测表面等离子体波需要耦合其能量到自由空间。利用表面全息法原理在金属薄膜表面设计凹槽分布将传输的表面等离子体波耦合到自由空间光波中,适用对象不再局限于小孔激发的表面等离子体波,而是更广波面的等离子体波,如平面波。这种耦合方式可以作为表面等离子体集成光路中探测问题的一种解决方案,将传输的表面等离子体信号耦合到自由空间,然后利用传统光电探测设备探测。

通过待耦合的金属表面等离子体波束与自由空间中目标光束的标量叠加,得到干涉光强。根据光强获得凹槽全息图,其包含待耦合表面等离子体波和目标光束的相位信息,当待耦合表面等离子体波入射到设计的全息图中后,再现出目标光束。用此原理,将任意波阵面的等离子体波耦合成自由空间中的目标光束成为可能。

2 设计原理

设金属表面上特定相位分布的等离子体波为待耦合波束,其表达式为

$$U_w = A_w(x, y) \exp[-i\psi_w(x, y)], \quad (1)$$

式中 $A_w(x, y)$ 是振幅分布函数, $\psi_w(x, y)$ 为相位分布函数。在自由空间中,目标光束的表达式为

$$U_0 = A_0(x, y) \exp[-i\psi_0(x, y)], \quad (2)$$

式中 $A_0(x, y)$ 为目标光束振幅分布函数, $\psi_0(x, y)$ 为其相位分布函数。

利用表面全息法设计结构实现待耦合光束到目标光束的转化。待耦合表面等离子体光束为参考光波,目标光束为物光波。表面电磁波全息包括写入和读出两个过程^[27-29],如图1所示,图中 k_{sp} 为表面等离子体波矢。写入的过程如图1(a)所示,参考光波 U_w 和物光波 U_0 在金属表面标量叠加。根据叠加的振幅得到金属表面的光强分布。根据光强分布,在光强极大值位置刻蚀凹槽,其他位置不变,得到表面全息图。图中凹槽的位置为参考光波与物光波干涉相长的位置,即在此处参考光波和物光波的相位差为 2π 的整数倍。全息图的读出过程如图1(b)所示,当参考光波 U_w 入射到全息图中,全息图中的凹槽向自由空间中散射等离子体波能量。由于刻蚀的凹槽尺寸很小,可以认为入射表面等离子体跨过凹槽时引入的相位改变忽略不计。全息图含有物光波的相位信息,其散射波在自由空间中进行相干叠加,再现出物光波。

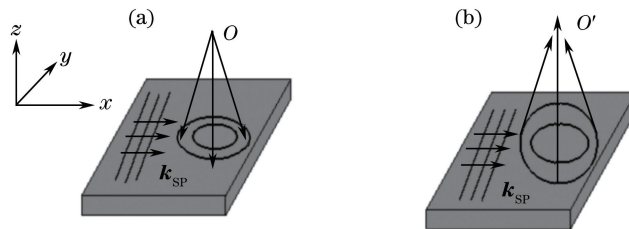


图1 表面电磁波全息示意图。(a)写入过程;(b)读出过程

Fig. 1 Schematic of the surface electromagnetic wave hologram. (a) Writing process; (b) reading process

3 结构设计和模拟

首先,将金属表面平面波阵面的等离子体波能量耦合到自由空间中,汇聚于自由空间中给定的一点。在金属表面上设沿 x 方向传输的平面波阵面的等离子体波表示为 $U = A \exp(-ik_{sp}x)$, 其中 $k_{sp} = n_{eff}k_0$, k_0

为真空波数, n_{eff} 为有效折射率, $\bar{k}_{\text{SP}} = k_0 \sqrt{(\epsilon_m \epsilon_0) / (\epsilon_m + \epsilon_0)}$, k_{SP} 为复数, 实部对应相位, 虚部对应损失, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_m 为金属介电常数。选用的金属为金, 以波长 $\lambda_0 = 1.064 \mu\text{m}$ 为例, 在此波长下金的介电常数 $\epsilon_m = -48.75 + 3.64i$ 。设计中主要考察的是相位, 只考虑传播系数的实部, 得表面等离子体在金属表面传播的波数为 $k_{\text{SP}} = \text{Re}[\bar{k}_{\text{SP}}] = 1.01k_0$ 。参考光束的波阵面分布如图 2(a) 所示, 设金属表面为平面, $z = 0$, 在 $-10 \mu\text{m} < x < 10 \mu\text{m}$ 和 $-10 \mu\text{m} < y < 10 \mu\text{m}$ 的矩形范围内设计凹槽结构。然后, 该结构将金属表面的等离子体能量耦合到自由空间中, 并汇聚于点 $r_0(x = 0, y = 0, z = 3 \mu\text{m})$ 处。设在空间中物光波为 $U_0 = A_0 / |r - r_0| \exp(-ik_0 |r - r_0|)$, r 为自由空间中任意点的坐标, 其波阵面分布如图 2(b) 所示。物光波与参考光波发生干涉, 得到光强分布, 如图 2(c) 所示。根据光强分布, 在光强极大值位置刻上凹槽, 其他位置不变, 得到图 2(d) 所示全息图。凹槽的宽度设置为 120 nm , 深度设置为 80 nm 。

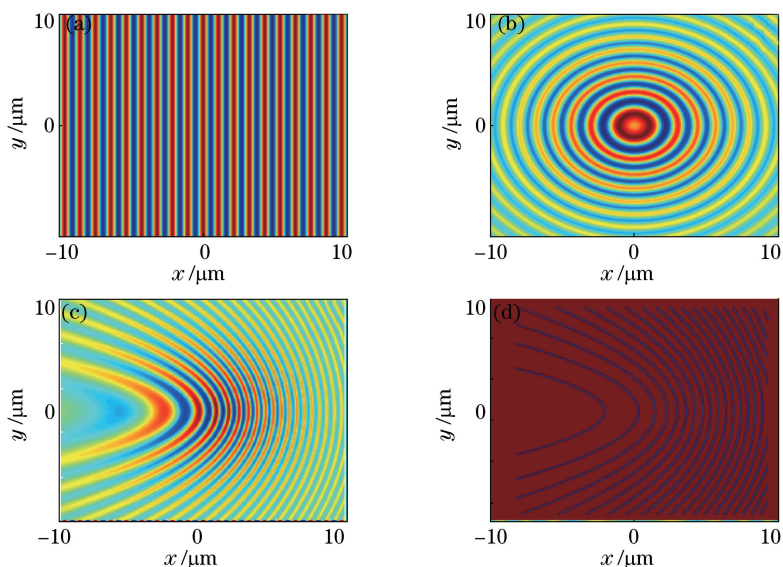


图 2 设计凹槽结构使金属表面的等离子体能量耦合到自由空间一点。

(a)参考光波场强图;(b)物光波场强图;(c)干涉光强分布;(d)全息图

Fig. 2 Coupling the plasma energy on the metal surface to a single point in free space by the designed groove structure. (a) Field intensity of the reference light wave; (b) field intensity of the object light wave; (c) interference light intensity distribution; (d) hologram

在读出过程中, 用原来的参考光波 $U_w = A_w \exp(-ik_{\text{SP}}x)$ 入射到金属薄膜的凹槽区域。模拟中表面等离子体通过金属表面上的光栅激发。光栅由 6 根金属条周期排布而成, 周期为 $1.05 \mu\text{m}$, 金属条宽为 $0.2 \mu\text{m}$, 高为 $0.2 \mu\text{m}$ 。当自由空间中波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 的平面波垂直入射到光栅上, 激发平面表面等离子体波在金属表面上传输, 入射到凹槽区域。通过时域有限差分法模拟再现过程得到图 3 所示的结果。图中颜色由蓝色变为红色表示光强由最弱变到最强。图 3(a) 为 $z = 3 \mu\text{m}$ 处 xy 平面的光场分布。可以看到 $(x = 0, y = 0)$ 位置处出现一个光强最大值, 此处为光波在焦平面内的焦点。图 3(b) 为 $x = 0$ 处 yz 平面的光场分布。可以看到 $(y = 0, z = 3 \mu\text{m})$ 位置处出现一个光强最大值。结合图 3(a)、(b) 可以看出表面等离子体波被耦合出金属表面, 形成自由空间中光束, 汇聚于设计的位置 $r_0(x = 0, y = 0, z = 3 \mu\text{m})$ 处。

考虑更为复杂的情况, 将平面 SPP 耦合到自由空间中两点。参考光波与前文相同, 为金属表面上沿 x 方向传输的等离子体波 $U_w = A_w \exp(-ik_{\text{SP}}x)$ 。目标为将平面的 SPP 能量耦合汇聚于自由空间中 $r_1(x = 0, y = -2 \mu\text{m}, z = 3 \mu\text{m})$ 和 $r_2(x = 0, y = 2 \mu\text{m}, z = 3 \mu\text{m})$ 两点。所以设计全息图时物光波为从 r_1 和 r_2 两个点源发出的光波, 表示为

$$U_0 = \frac{A_0}{|r - r_1|} \exp(-ik_0 |r - r_1|) + \frac{A_0}{|r - r_2|} \exp(-ik_0 |r - r_2|)。 \quad (3)$$

参考光波和物光波在金属表面进行标量叠加。根据标量叠加的场, 得到图 4(a) 所示光强分布。根据光强分布, 光强极大值处刻蚀凹槽, 其余位置不变, 形成图 4(b) 所示凹槽分布。凹槽宽度为 120 nm , 深度为

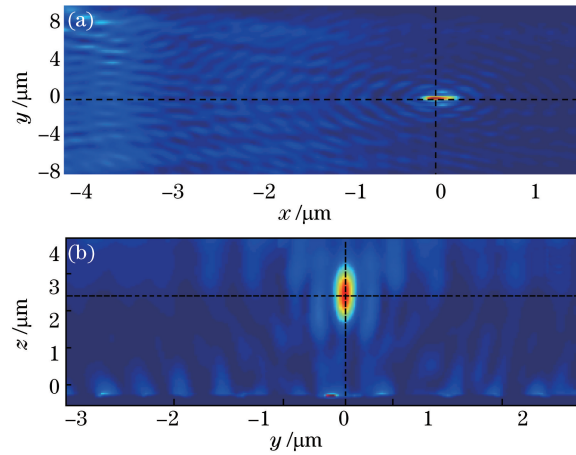


图3 模拟 SPP 耦合到自由空间一点的光强分布结果。(a) $z=3 \mu\text{m}$ 处 xy 平面的光强分布; (b) $x=0$ 处 yz 平面的光强分布
Fig. 3 Light intensity distribution results of coupling SPPs to a single point in free space. (a) Light intensity distribution of the xy plane when $z=3 \mu\text{m}$; (b) light intensity distribution of the yz plane when $x=0$

80 nm。利用时域有限差分法模拟读出过程。用原来的参考光波 $U_w = A_w \exp(-ik_{\text{sp}}x)$ 入射到金属薄膜的凹槽区域,得到图 4(c)、(d)所示的结果。图中颜色由蓝色变为红色表示光强由最弱变到最强。图 4(c)为 $z=3 \mu\text{m}$ 处 xy 平面的光场分布,可以看到在 $(x=0, y=-2 \mu\text{m})$ 和 $(x=0, y=2 \mu\text{m})$ 位置处出现两个光强最大值,此处为光波在此平面内的两个汇聚点。图 4(d)为 $x=0$ 处 yz 平面的光场分布。 $(y=-2 \mu\text{m}, z=3 \mu\text{m})$ 和 $(y=2 \mu\text{m}, z=3 \mu\text{m})$ 两个位置处出现两个光强最大值。结合图 4(c)、(d)可以看出表面等离子体能量被耦合出金属表面,形成汇聚于自由空间中设计点 r_1 和 r_2 的光束。

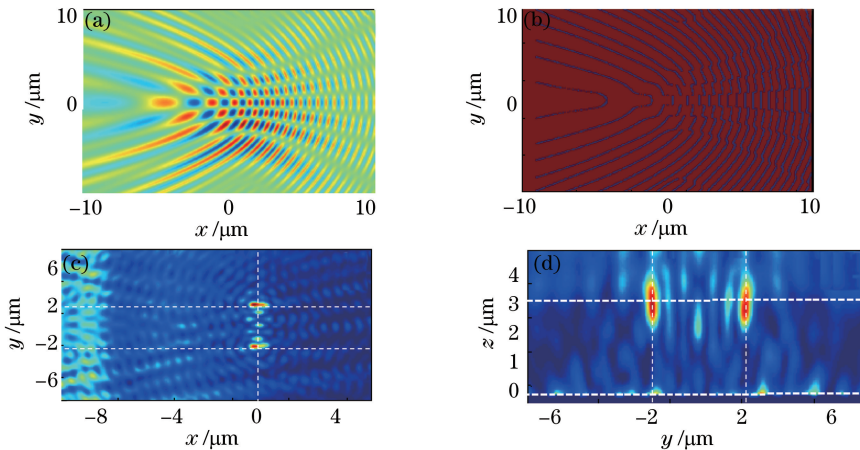


图4 模拟 SPP 耦合到自由空间中两点。(a)金属表面的干涉场强分布图;(b)凹槽分布设计图;
(c) $z=3 \mu\text{m}$ 处 xy 平面的模拟干涉场强分布;(d) $x=0$ 处 yz 平面的模拟干涉场强分布

Fig. 4 Simulation of coupling SPPs to two points in free space. (a) Interference field intensity distribution on the metal surface; (b) design of the groove distribution; (c) light intensity distribution of the xy plane when $z=3 \mu\text{m}$; (d) light intensity distribution of the yz plane when $x=0$

4 结 论

研究表面等离子体耦合到自由空间中的光束,利用表面全息法原理在金属表面设计凹槽分布,控制表面等离子体向自由空间光束的耦合。通过待耦合的金属表面等离子体波束与自由空间中目标光束的标量叠加,得到干涉光强,并根据光强获得凹槽全息图。当待耦合表面等离子体波入射到设计的全息图中,再现恢复出目标光束。用此原理设计两个结构将平面 SPP 耦合到自由空间中一点和两点,并通过时域有限差分法验证了设计结构的有效性,证明利用表面全息法设计结构可以很好地控制金属表面传输的等离子体波向自由空间

光束的耦合。这种结构可以为设计更简单的结构将表面等离子体波耦合到自由空间中汇聚光束提供一定的参考。这种耦合方式可以作为解决表面等离子体集成光路中探测问题的一种方案,将传输的表面等离子体信号耦合到自由空间,然后利用传统光电探测设备探测。

参 考 文 献

- [1] Nie S, Emory S R. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering [J]. *Science*, 1997, 275(5303): 1102-1106.
- [2] Ng M Y, Liu W C. Local-field confinement in three-pair arrays of metallic nanocylinders [J]. *Optics Express*, 2006, 14(10): 4504-4513.
- [3] Pellegrini G, Bello V, Mattei G, *et al.* Local-field enhancement and plasmon tuning in bimetallic nanoplanets [J]. *Optics Express*, 2007, 15(16): 10097-10102.
- [4] Rümke T M, Sánchez-Gil J A, Muskens O L, *et al.* Local and anisotropic excitation of surface plasmon polaritons by semiconductor nanowires [J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 5013-5021.
- [5] Tanaka K, Tanaka M, Sugiyama T. Simulation of practical nanometric optical circuits based on surface plasmon polariton gap waveguides [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 256-266.
- [6] Hibbins A P, Hendry E, Lockyer M J, *et al.* Prism coupling to "designer" surface plasmons [J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 20441-20447.
- [7] van Exter M P, Tenner V T, van Beijnum F, *et al.* Surface plasmon dispersion in metal hole array lasers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27422-27437.
- [8] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, *et al.* Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [9] Barnes W L, Murray W A, Dintinger J, *et al.* Surface plasmon polaritons and their role in the enhanced transmission of light through periodic arrays of subwavelength holes in a metal film [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(10): 107401.
- [10] Brolo A G, Gordon R, Leathem B, *et al.* Surface plasmon sensor based on the enhanced light transmission through arrays of nanoholes in gold films [J]. *Langmuir*, 2004, 20(12): 4813-4815.
- [11] Dhawan A, Canva M, Vo-Dinh T. Narrow groove plasmonic nano-gratings for surface plasmon resonance sensing [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 787-813.
- [12] Zhang X D. Extraordinary transmissions on cylinder metallic gratings with very narrow slits [J]. *Physics Letters A*, 2004, 331(3-4): 252-257.
- [13] Chen Quansheng, Tong Yuying, Zhuang Yuan, *et al.* Unidirectional excitation of surface plasmon based on metallic slit-groove structure [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0510001.
陈全胜, 佟玉莹, 庄园, 等. 基于金属狭缝-凹槽结构单向激发表面等离子体 [J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0510001.
- [14] Li J, Gu Y, Gong Q H. Tuning of narrow geometric resonances in Ag/Au binary nanoparticle arrays [J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17684-17698.
- [15] Zhang Ming, Lü Jingwei, Liu Zhaoyan, *et al.* Surface plasmon resonance properties of silver nanosphere arrays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081601.
张明, 吕靖薇, 刘昭延, 等. 银纳米球阵列的表面等离子体共振特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 081601.
- [16] Li Juan, Wang Bingyan, Xue Wenrui. Propagation properties of Y-splitters based on MIM surface plasmonic waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0124002.
李娟, 王冰艳, 薛文瑞. 基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器的传输特性研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0124002.
- [17] Wang Jicheng, Liu Hongjiao, Cai Zengyan, *et al.* Design of surface plasmon dichroic splitter with two metallic slits [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 102301.
王继成, 刘红娇, 蔡增艳, 等. 双缝波导结构表面等离子体可见光分束器设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 102301.
- [18] Liu Hongjiao, Shen Kaijun, Wang Jicheng, *et al.* Plasmonic dichroic splitter based on multi-slits in MIM structure [J].

Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 102302.

刘红娇, 沈垚均, 王继成, 等. 多狭缝金属-介质-金属结构等离子体可见光分束器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102302.

- [19] Minh T T, Tanaka K, Tanaka M. Complex propagation constants of surface plasmon polariton rectangular waveguide by method of lines[J]. Optics Express, 2008, 16(13): 9378-9390.
- [20] Li S S, Jadidi M M, Murphy T E, *et al.* Terahertz surface plasmon polaritons on a semiconductor surface structured with periodic V-grooves[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7041-7049.
- [21] Cakmakyapan S, Serebryannikov A E, Caglayan H, *et al.* Spoof-plasmon relevant one-way collimation and multiplexing at beaming from a slit in metallic grating[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26636-26648.
- [22] Diedenhofen S L, Kufer D, Lasanta T, *et al.* Integrated colloidal quantum dot photodetectors with color-tunable plasmonic nanofocusing lenses[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(1): e234.
- [23] Kim K J, Kim J E, Park H Y, *et al.* Propagation of spoof surface plasmon on metallic square lattice: bending and splitting of self-collimated beams[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 4050-4058.
- [24] Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, *et al.* Self-collimating phenomena in photonic crystals[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(9): 1212-1214.
- [25] Chen Y H, Huang L, Gan L, *et al.* Wavefront shaping of infrared light through a subwavelength hole[J]. Light: Science & Applications, 2012, 1(8): e26.
- [26] Chen Y H, Fu J X, Li Z Y. Surface wave holography on designing subwavelength metallic structures[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 23908-23920.
- [27] Chen Y G, Wang Y, Li Z Y. Complicated wavefront shaping of surface plasmon polaritons on metal surface by holographic groove patterns[J]. Plasmonics, 2014, 9(5): 1057-1062.
- [28] Chen Y G, Chen Y H, Li Z Y. Direct method to control surface plasmon polaritons on metal surface[J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 339-342.
- [29] Chen Y G, Li Z Y. Free space optical beam coupled to surface plasmonic polariton waves via designed grooves in metal film[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(2): 020501.