

doi:10.3788/gzxb20134212.1460

# 基于半导体纳米线和金属脊的混合表面等离子体波导模式特性分析

周沛, 卢启景, 吴根柱, 陈达如

(1 浙江师范大学 a. 信息光学研究所; b. 浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004)

(2 浙江师范大学与浙江大学 光学联合研究实验室, 杭州 310058)

**摘要:** 设计了由半导体纳米线和半圆顶金属脊组成的混合表面等离子体波导. 通过有限元法对这种波导所支持混合模式的深亚波长局域、传播损耗等特性进行了数值计算. 结果表明, 在工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的情况下, 混合模式的最小模面积仅为  $0.00181(\lambda^2/4)$ , 同时保持  $20 \mu\text{m}$  的传播距离; 与同类结构波导相比具有模场面积小, 光传播距离远等优点, 在光子集成元器件及光子集成电路等领域具有潜在应用价值.

**关键词:** 混合表面等离子体波导; 模式面积; 传播损耗; 衍射极限

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)12-1460-4

## Mode Properties of Hybrid Plasmonic Waveguide Based on Semiconductor Nanowire and Metal Ridge

ZHOU Pei, LU Qi-jing, WU Gen-zhu, CHEN Da-ru

(1a. Institute of Information Optics; b. Key Laboratory of Researching Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

(2 Joint Research Laboratory of Optics of Zhejiang Normal University and Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** A hybrid plasmonic waveguide that consists of a semiconductor nanowire and semicircular-top metal nanoridge was proposed. Finite element method was used to numerically evaluate hybrid mode's deep subwavelength field confinement and propagation loss etc. Simulation results reveal that mode area of  $0.00181(\lambda^2/4)$  and propagation distance of  $20 \mu\text{m}$  are obtained at the wavelength of  $1.55 \mu\text{m}$ ; the proposed waveguide has advantages of smaller mode area and longer propagation distance over other similar structures that has potential in fabrication of integrated photonic components and circuits.

**Key words:** Hybrid plasmonic waveguide; Mode area; Propagation loss; Diffraction-limit

## 0 引言

为满足光子集成元器件和光子集成电路的需求,光波导作为最基本的构成得到了广泛研究. 近些年理论和实验研究表明表面等离子体波导(Plasmonic Waveguide)是最有希望满足元器件高集成度要求的波导. 表面等离子体波导利用光波与

金属内的电子产生集体共振形成的表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)<sup>[1]</sup>实现了对光场亚波长局域. 表面等离子体波导的结构有沟槽等离子体型(Channel Plasmon Waveguide, CPW)<sup>[2]</sup>, 楔形等离子体型(Wedge Plasmon Waveguide, WPW)<sup>[3-6]</sup>和绝缘体-金属-绝缘体型(Insulator-Metal-Insulator, IMI)<sup>[7]</sup>等. 但是这类波

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61007029)、浙江省自然科学基金(Nos. 2011C21038, 2011C22051, Y1100041)和浙江省重点科技创新团队(No. 2010R50007)资助

第一作者: 周沛(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为球微腔传感. Email: zhoupei0106@163.com

导师(通讯作者): 吴根柱(1967-), 男, 教授, 主要研究方向为新型半导体激光器. Email: wugenzhu@zjnu.cn

收稿日期: 2013-04-07; 录用日期: 2013-05-20

导结构的能量损耗都很大,限制了波导中模式传播距离.

折射率较高的介质波导与表面等离子体波导组合组成的混合表面等离子体波导 (Hybrid Plasmonic Waveguide, HPW)<sup>[8]</sup> 是针对传统表面等离子体波导的缺点而设计的. 由于波导模式与 SPP 模式相互耦合以及结构的“电容”增强效应, 模场很好地被限制在两波导的间隙中. 这种波导既实现了对模场的亚波长局域限制, 又保持了较远的传播距离.

本文设计的纳米线圆顶脊混合表面等离子体波导 (Nanowire Semicircular-nanoridge Plasmonic Waveguide, NSNPW) 由一个硅质纳米线和带有半圆柱形圆顶银脊构成. 为避免高折射率硅和金属银直接接触引起的较高能量损耗, 两个结构都嵌在低折射率的二氧化硅中. 利用有限元法计算了不同结构参量下 NSNPW 模式的有效折射率, 模式面积和传播距离等.

## 1 NSNPW 结构和模式特性

本文提出的 NSNPW 结构如图 1. 圆柱的中心 ( $x=0, y=0$ ) 作为起始坐标. 半径为  $R$  的硅质 (Si) 纳米线在高度为  $h$ , 宽度为  $w$  的银质 (Ag) 脊的正上方. 两个结构  $y$  方向间距为  $t$ , 并且嵌在折射率比较低的二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 中. 当工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时, Si,  $\text{SiO}_2$ , Ag 的折射率分别为  $\epsilon_{\text{Si}} = 3.5$ ,  $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 1.5$ ,  $\epsilon_{\text{Ag}} = -129 + 3.3i$ .

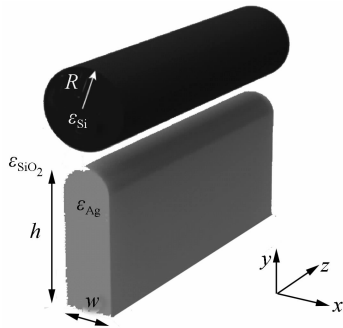


图 1 NSNPW 结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of designed NSNPW

根据二维波动方程<sup>[9]</sup>

$$[\nabla^2 + (n^2 - n_{\text{eff}}^2)(2\pi/\lambda)^2]\psi = 0 \quad (1)$$

分析了 NSNPW 模式分布特征. 其中  $n$  和  $n_{\text{eff}}$  分别为材料和模式的有效折射率. 首先利用有限元数值法求解上述方程得出有效折射率 ( $n_{\text{eff}}$ ), 然后利用公式<sup>[8]</sup>

$$L_m = \lambda / [4\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})] \quad (2)$$

算出传播距离 ( $L_m$ ). 而模面积  $A_m$  由模场总能量和峰值能量密度之比得到<sup>[8]</sup>, 即

$$A_m = \frac{W_m}{\max\{W(\mathbf{r})\}} = \frac{1}{\max\{W(\mathbf{r})\}} \iint W(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r} \quad (3)$$

式中

$$W(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \left( \frac{d(\epsilon(\mathbf{r})\omega)}{d\omega} |E(\mathbf{r})|^2 + \mu_0 |H(\mathbf{r})|^2 \right) \quad (4)$$

$W_m$ 、 $W(\mathbf{r})$  分别为模场总能量和电磁能密度.

为避免基底对 NSNPW 模式特性的影响, 首先研究确定银质结构的合适高度. 图 2 为  $R=100 \text{ nm}$ 、 $t=30 \text{ nm}$ 、 $w=100 \text{ nm}$  时 NSNPW 混合模式的归一化模式面积  $A_m/A_0$  ( $A_0=\lambda^2/4$  代表真空衍射极限下的模场面积),  $L_m$  在不同高度  $h$  下的变化情况. 当  $h < 100 \text{ nm}$  时, 银质波导底面两个直角棱角 (二维平面结构) 会产生场发散, 这类类似于两个顶角为直角的 WPW. 当  $h$  很小时, 这两个发散模场甚至和上方的柱形模式的模场产生相互作用 (见插图). 这引起  $L_m$  和  $A_m/A_0$  的剧烈变化. 当  $h > 600 \text{ nm}$ , 模式特征趋向稳定. 这说明当银质波导的高度大于  $600 \text{ nm}$  时就能够避免银质波导底部形状和基底的影响.

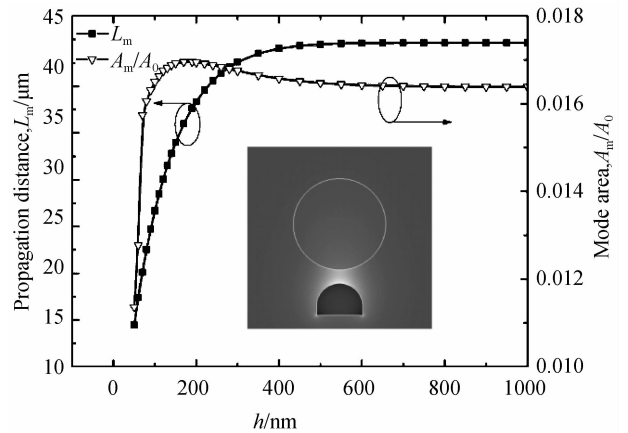
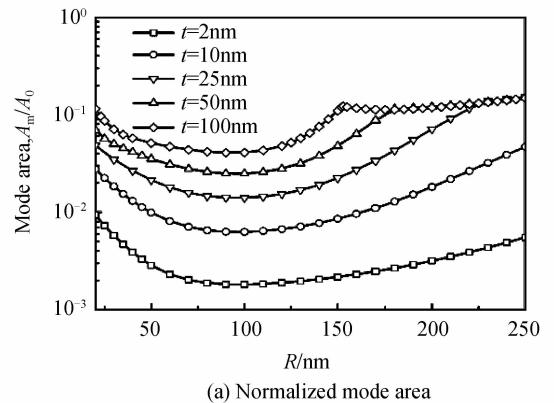


图 2 传播距离 ( $L_m$ ) 和归一化模式面积 ( $A_m/A_0$ ) 随高度  $h$  变化, 插图为当  $h=70 \text{ nm}$  的模场图

Fig. 2 Propagation distance, ( $L_m$ ) and normalized mode area, ( $A_m/A_0$ ) versus height  $h$ , field distribution of the mode (inset)

其次需要研究在不同  $R$  和  $t$  情况下模式面积和传播距离的变化. 从图 3(a) 中可以看到, 归一化模式面积  $A_m/A_0$  随着  $t$  的变小而变小, 当  $t=2 \text{ nm}$ ,



(a) Normalized mode area

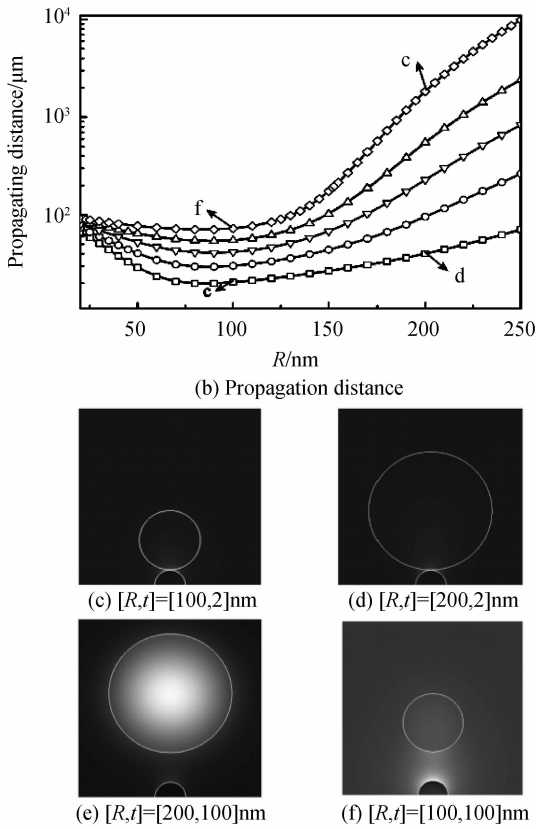


图 3 当  $h=2\ 000\ \text{nm}$ ,  $w=100\ \text{nm}$  混合模的归一化模式面积, 传播距离和模场分布随半径  $R$  和间距  $t$  的变化  
Fig. 3 Normalized mode area, propagation distance and field distributions of hybrid mode versus radius  $R$  and gap  $t$  when  $h=2\ 000\ \text{nm}$  and  $w=100\ \text{nm}$

$R=100\ \text{nm}$  时达到最小模面积  $0.001\ 81A_0$ . 这显著小于文献[8]中金属平板混合表面等离子体波导 (Flat-metal Hybrid Plasmonic Waveguide, FMHPW)  $0.006A_0$  的模式面积. 当  $t$  为一个定值,  $R$  变大的过程中, 模式面积曲线有一个明显的转折点. 例如在  $t=100$ ,  $R=150\ \text{nm}$  附近, 这时能量主要聚集在纳米线中, 混合模式的特性表现为仅有一个纳米线时的柱形模式.

从图 3(b) 可以看出传播距离  $L_m$  同样随着  $t$  减小而变小. 这是由于当  $t$  逐渐变小, 纳米线中的模场与银质脊中的模场耦合不断增强. 两者的有效接触面积变大, 模场在金属中的损耗变大, 因此传播距离变短. 为了更清楚的理解结构参量对传播损耗的影响, 继续分析了电磁场能量密度在不同介质中的分布. 图 4 为当  $t=25\ \text{nm}$ ,  $h=2\ 000\ \text{nm}$ ,  $w=100\ \text{nm}$  时能量密度分布. 金属银中的能量密度最高约为 10%, 在较大  $R$  时甚至小于 1%, 这极大的减少了模场在金属中的能量损耗, 因此 NSNPW 有着几百微米量级的传播距离. 从图 4 中可以看出当  $R < 130\ \text{nm}$  时, 能量主要集中在  $\text{SiO}_2$  介质中. 这时由于  $\text{SiO}_2$  介质的折射率比较低, 能量在传播过程中损耗变小.

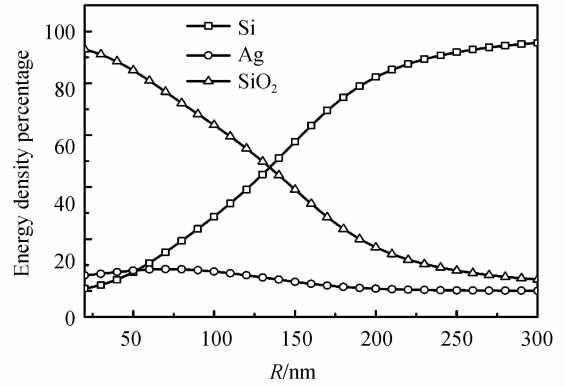


图 4 Si, Ag 和  $\text{SiO}_2$  中的能量密度分布  
Fig. 4 Energy density percentage in Si, Ag and  $\text{SiO}_2$

用耦合模式理论分析时, 混合模式 ( $\theta_{\text{hyb}}$ ) 可以看做是柱形模式 ( $\theta_{\text{cy}}$ ) 跟 SPP 模式 ( $\theta_{\text{SPP}}$ ) 的线性叠加.

$$\theta_{\text{hyb}}(R, t) = a(R, t)\theta_{\text{cy}}(R) + b(R, t)\theta_{\text{SPP}} \quad (5)$$

$$|a(R, t)|^2 = \frac{n_{\text{hyb}}(R, t) - n_{\text{SPP}}}{2n_{\text{hyb}}(R, t) - n_{\text{cy}}(R) - n_{\text{SPP}}} \quad (6)$$

式中  $a(R, t)$ 、 $b(R, t)$  分别为柱形模式和 SPP 模式的加权系数.  $n_{\text{hyb}}(R, t)$  为混合模式的有效折射率,  $n_{\text{cy}}(R)$  为没有银质波导情况下柱形模式的折射率.  $n_{\text{SPP}}$  为在没有纳米线情况下 SPP 模式的折射率, 当  $w=100\ \text{nm}$ ,  $h=2\ 000\ \text{nm}$ , SPP 模式的有效折射率  $n_{\text{SPP}}=1.552$ . 可以用  $|a(R, t)|^2$  来表示混合模式的特性. 如图 5(b) 所示, 当  $R < 120\ \text{nm}$  ( $|a(R, t)|^2 <$

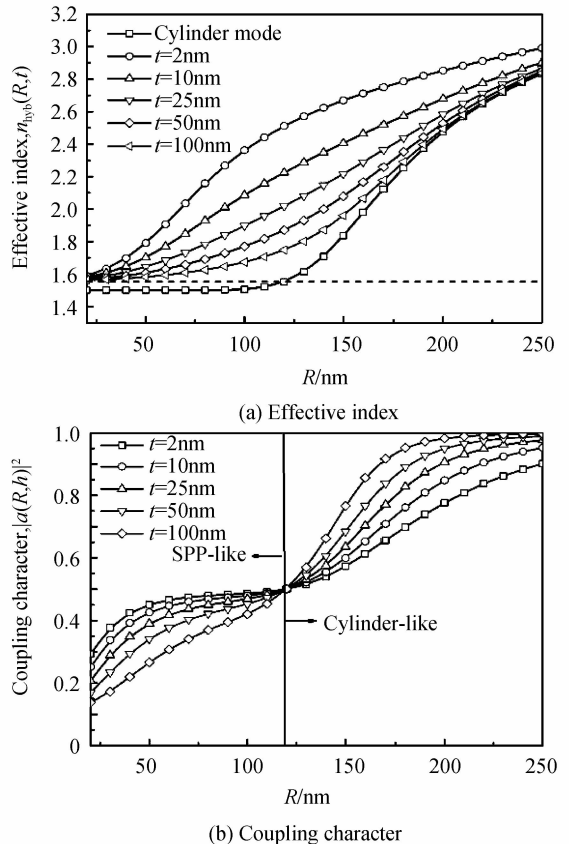


图 5 模式的有效折射率和耦合特性(虚线为 SPP 模式的折射率  $n_{\text{SPP}}$ )  
Fig. 5 Effective index and coupling character of modes, black broken line denotes effective index of SPP mode  $n_{\text{SPP}}$

0.5), 混合模式趋向表现为 SPP 模式. 反之则表现为柱形模式. 在  $R=120\text{ nm}$  时 ( $|a(R,t)|^2=0.5$ ) 为恰耦合状态, 此时 NSNPW 有最好的性能.

为了更直观, 准确地显示出 NSNPW 的性能, 将 NSNPW 与文献[8]中 FMHPW 的性能作对比. 设定两种波导中纳米线的半径  $R$  都为  $120\text{ nm}$ . 较小的模式面积和较远的传播距离是 HPW 的重要特性. 从图 6 中可以明显看出本文设计的 NSNPW 性能曲线在参考文献[8]FMHPW 的左上方, 这表明在相同模场面积下, NSNPW 有更远的传播距离, 或在相同的传播距离下, NSNPW 有更小的模场面积. 因此本文提出的 NSNPW 有更大的优势.

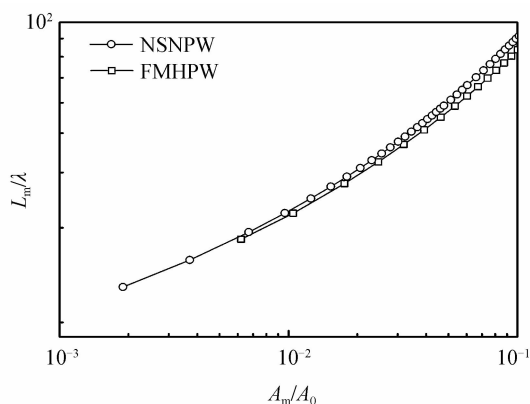


图 6 不同  $t$  情况下, NSNPW 与文献[8]中 FMHPW 的综合性能对比

Fig. 6 The comparison of NSNPW we proposed and FMHPW in Ref. [8] with the vary of gap  $t$

## 2 结论

本文提出了一种新型混合等离子体波导 NSNPW, 这种波导由硅质纳米线和半圆顶银质脊构成. 用有限元法分析混合模式的特性后表明, NSNPW 在有着很小的模场面积的同时能传播较远的距离. 这很好的解决了衍射极限问题, 大大提高了元器件中波导集成度.

### 参考文献

[1] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(8): 824-830.

[2] BOZHEVOLNYI S I, VOLKOV V S, DEVAUX E, *et al.* Channel Plasmon-polariton guiding by subwavelength metal grooves[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **95**: 046802-1-4.

[3] PILE D F P, OGAWA T, GRAMOTNEV D K, *et al.* Theoretical and experimental investigation of strongly localized plasmons on triangular metal wedges for subwavelength waveguiding[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(6): 061106.

[4] MORENO E, RODRIGO S G, BOZHEVOLNYI S I, *et al.* Guiding and focusing of electromagnetic fields with wedge Plasmon polaritons[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(2): 023901.

[5] YATSUI T, KOUROGI M, OHTSU M. Plasmon waveguide

for optical far/near-field conversion[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, **79**: 4583-4585.

[6] BOLTASSEVA A, VOLKOV V S, NIELSEN R B, *et al.* Triangular metal wedges for subwavelength Plasmon-polariton guiding at telecom wavelengths[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(8): 5252-5260.

[7] LIU L, HAN Z, HE S. Novel surface plasmon waveguide for high integration[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(17): 6645-6650.

[8] OULTON R F, SORGER V J, GENOV D A, *et al.* A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(8): 496-500.

[9] ZOU C, SUN F, XIAO Y, *et al.* Plasmon modes of silver nanowire on a silica substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(18): 183102-183102-3.

[10] LU Q, CHEN D, WU G. Low-loss hybrid plasmonic waveguide based on metal ridge and semiconductor nanowire[J]. *Optics Communications*, 2013, **289**: 64-68.

[11] ZHANG J, CAI L, BAI W, *et al.* Hybrid plasmonic waveguide with gain medium for lossless propagation with nanoscale confinement[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(12): 2312-2314.

[12] DAI D, HE S. A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(19): 16646-16653.

[13] GUO J, PAN Z. Guided surface plasmon mode of semicircular cross section silver nanoridges[J]. *Optical Society of America*, 2012, **29**(9): 2548-2553.

[14] BIAN Y, ZHENG Z, LIU Y, *et al.* Hybrid wedge plasmon polariton waveguide with good fabrication-error-tolerance for ultra-deep-subwavelength mode confinement[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(23): 22417-22422.

[15] BIAN Y, ZHENG Z, ZHAO X, *et al.* Symmetric hybrid surface plasmon polariton waveguides for 3D photonic integration[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(23): 21320-21325.

[16] YANG Ji-chao, SONG Mu-ping. Dispersion characteristics and the application for dispersion compensation of silicon slot optical waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 417-422.

杨纪超, 宋牟平. 硅狭缝光波导的色散特性及其色散补偿应用的研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 417-422.

[17] GAO Yong, FENG Song, YANG Yuan, *et al.* The structure design of ridged SiGe-OI optical waveguide based on optiwave[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1692-1696.

高勇, 冯松, 杨媛, 等. 基于 Optiwave 的脊形 SiGe-OI 光波导结构设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1692-1696.

[18] LI Ji-jun, WANG Guo-ping. Numerical simulation of transmission characters of two-dimensional gap plasmonic waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1793-1798.

李继军, 汪国平. 数值模拟二维间隙表面等离子体波导传输特性[J]. *光子学报*, 2011, **40**(12): 1793-1798.

[19] QIN Xiao-juan, GUO Ya-nan, XUE Wen-rui. Propagation properties of a surface plasmonic waveguide with a double-square-shaped air core[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **30**(12): 3537-3541.

秦小娟, 郭亚楠, 薛文瑞. 双正方形中空表面等离子体光波导的传输特性研究[J]. *光子学报*, 2010, **30**(12): 3537-3541.

[20] ZHANG Yang-yang, ZHU Fang-ming, SHEN Lin-fang, *et al.* Terahertz surface plasmon polaritons on metal surfaces corrugated by shallowly dielectric-filled grooves[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 389-393.

张羊羊, 朱方明, 沈林放, 等. 介质填充浅槽周期结构表面上的太赫兹表面等离子体激元[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 389-393.