

doi: 10.3788/gzxb20164502.0224002

# 非线性介质的表面等离子体波导设计和优化

王丽华, 黄志祥, 况晓静, 吴先良

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

**摘要:**设计了一种基于非线性介质 Si-NC/SiO<sub>2</sub> 的混合表面等离子体波导,利用有限元方法定量分析了这种波导所支持基模的能流密度分布、有效折射率、传播长度和有效面积与几何结构参数以及非线性介质的依赖关系.分析结果表明,光场主要被限制在非线性区域,通过调节非线性层的厚度以及非线性比例因子,可以实现模式的有效折射率和传播长度等传输特性参数的调节.固定非线性介质比例因子,有效折射率和传播距离随非线性层厚度增加而增大;固定波导尺寸,有效折射率随比例因子增大而增大,传播距离和有效面积较小.最后,根据分析结果对非线性效应进行优化,优化后波导最优结构尺寸为波导宽度为 250 nm,非线性材料层厚度为 100 nm,硅层厚度为 150 nm.

**关键词:**非线性介质;有限元法;混合表面等离子体波导;能流密度;折射率

中图分类号:TN252

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)02-0224002-5

## Designing and Optimizing of Surface Plasmonic Waveguide with Nonlinear Media

WANG Li-hua, HUANG Zhi-xiang, KUANG Xiao-jing, WU Xian-liang

(Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** A kind of hybrid surface plasmonic waveguide based on the nonlinear media of Si-NC/SiO<sub>2</sub> was designed. The dependence of the distribution of longitudinal energy flux density, the effective refractive index, the propagation length and the effective area of the fundamental mode of the waveguide, on the geometrical parameters and the nonlinear volume fraction were analyzed by the finite element method. Simulated results reveal that light field is distributed mainly in the nonlinear material. The transmission parameters of the fundamental mode, such as the effective index and propagation length can be adjusted by tuning the size and the volume fraction of nonlinear material. When the volume fraction is given, the effective index and propagation length will increase as the thickness of the nonlinear material increasing. With a certain geometric parameter, the effective index will increase as the volume fraction increasing, the propagation length and the effective area will decrease. Finally, the nonlinear effect was optimized according to the analysis results, and the optimized structure size is given by that, the width of waveguide is 250 nm, the thickness of the nonlinear material layer and silicon layer is 100 nm and 150 nm respectively.

**Key words:** Nonlinear media; Finite element method; Surface plasmonic waveguide; Energy flux density; Refractive index

**OCIS Codes:** 240.6680; 190.4400; 230.7380; 250.4390

## 0 引言

表面等离子体波导(Surface Plasmonic Waveguides,

SPWs)是近年来迅速发展起来的一门新学科,它可以在金属和介质界面以表面等离子体形式引导和控制光传播,极大地提高了光学器件的集成度,实现了光在纳

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 61101064, 51277001, 61471001)、教育部博士学科点专项基金(No. 20123401110009)、安徽省自然科学基金(Nos. 2013SQRL065ZD, 1508085JGD03, 1508085QF130)和教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-12-0596)资助.

**第一作者:**王丽华(1982-),女,讲师,硕士研究生,主要研究方向为光学计算和新型电磁材料. Email: lhwang@ahu.edu.cn

**导师(通讯作者):**黄志祥(1979-),男,教授,博士,主要研究方向为电磁高性能计算、新型电磁材料和新型天线设计. Email: zxhuang@ahu.edu.cn

**收稿日期:**2015-09-23; **录用日期:**2015-11-17

<http://www.photon.ac.cn>

米尺度的传播<sup>[1-3]</sup>.

目前,常见的表面等离子体波导主要包括薄膜型 SPWs<sup>[4]</sup>、条型 SPWs<sup>[5-6]</sup>、楔型 SPWs<sup>[7-8]</sup>、狭缝型 SPWs<sup>[9-10]</sup>、金属介质金属 (Metal-Dielectric-Metal, MDM) 型 SPWs<sup>[11]</sup>、混合型 SPWs<sup>[12-13]</sup> 等. 薄膜型 SPWs 在横向上对光缺乏约束,条型 SPWs、楔型 SPWs、狭缝型 SPWs 等具有复杂的结构,不易加工制作,且对 SPWs 的传输性能稳定性影响较大. MDM 型 SPWs 结构简单,能够将光能很好地控制在介质中,但由于金属的吸收作用,使得 MDM 型 SPWs 的传输损耗较大,从而限制了光波导的传播长度. 混合型 SPWs 具有增强光与物质之间相互作用以及有效降低欧姆损耗的优势,在新型的集成光子器件制作领域中产生重大的作用. 然而,集成光子电路的全光信号处理要求用光来控制光,这使得非线性作用显得尤为重要. 2010 年,刘炳灿等<sup>[14]</sup>给出了金属和非线性介质表面等离子体激元的色散关系,2012 年 IVAN D R 等<sup>[15-16]</sup>认为 Si-NC/SiO<sub>2</sub> 介质是一种很有前途的非线性材料,它具有强大的超快克尔效应并可用于金属氧化物-半导体技术.

基于非线性介质的优势,本文利用 Si-NC/SiO<sub>2</sub> 设计了一种混合型表面等离子体波导结构,其非线性介质 Si-NC/SiO<sub>2</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 相比,具有更强的非线性效应且与互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS) 工艺兼容性好.

## 1 结构型和理论计算

设计的非线性介质混合型表面等离子体波导的横截面如图 1,选取厚度  $H=300$  nm、宽度  $L=1400$  nm 的 SiO<sub>2</sub> 为基底;厚度为  $h_s$  的 Si 作为缓冲层,在金属和硅层中间填充非线性介质 Si-NC/SiO<sub>2</sub>,该介质是将硅纳米晶体 (Si-NC) 嵌入到二氧化硅中得到的,其厚度为  $h$ ;金属层厚度为 200 nm、宽度为  $w$ . 构成 SPWs 的主要材料属于贵金属,其介电常数与入射光波场的关系较为复杂,计算中采用有限元方法<sup>[17]</sup>,场分布满足波动方程

$$\nabla \times \mu_0^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} = i\omega \mathbf{J} \quad (1)$$

将方程(1)写成弱解形式,即

$$\int_{\Omega} (\nabla \times \varphi) \cdot (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - \omega^2 \varphi \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} dV + \int_{\partial\Omega} \varphi \cdot (\mathbf{n} \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{E})) dA = \int_{\Omega} i\omega \varphi \cdot \mathbf{J} dV \quad (2)$$

式中,  $\varphi$  为  $\mathbf{E}$  的测试函数,  $\epsilon_r$  采用 Drude 模型<sup>[17]</sup>,在边界处理上采用各向异性理想匹配层 (Anisotropic Perfectly Matched Layer, APM) 边界模拟所需的开放边界. 选择光波长  $\lambda$  为 1 550 nm,金属为银,在此波长下,Drude 模型中金属银的折射率为  $N=n-jk$ ,  $n=$

0.144 47,  $k=11.36$ ,基底 SiO<sub>2</sub> 的折射率为 1.45, Si 的折射率为 3.48. 非线性介质 Si-NC/SiO<sub>2</sub> 的折射率变化取决于克尔效应,可以表示为

$$\Delta n = 2n_{\text{NC}} I \quad (3)$$

式中,  $n_{\text{NC}}$  为非线性介质的折射率,  $I$  为光场强度;光场强度与光能量有关,关系为  $I=P/A_{\text{eff}}$ ;  $A_{\text{eff}}$  为导模的有效面积<sup>[18-19]</sup>,定义  $A_{\text{eff}}$  为

$$A_{\text{eff}} = \left( \int_{A_{\infty}} |F(x,y)|^2 dA \right)^2 / \int_{A_{\infty}} |F(x,y)|^4 dA \quad (4)$$

式中,  $F(x,y)$  为波导模式的场分量,对于本文研究的 TM 波,  $F(x,y)=E_x(x,y)$ . 从式(3)和(4)可以看出非线性折射指数变化取决于光场强度和模式有效面积. 因此,对于一个给定的输入功率,有效面积必须最小化以达到最大化的非线性效应.

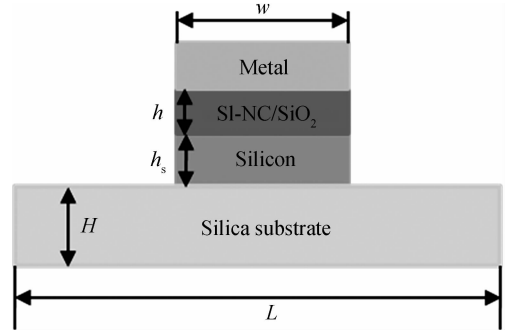


图 1 混合表面等离子体波导横截面

Fig. 1 Cross section of hybrid surface plasmonic waveguide

## 2 结果与讨论

确定基底尺寸,固定非线性介质高度  $h=100$  nm,金属带宽度  $w$  取不同值时基模沿  $z$  轴的能流密度  $S_z$  分布见图 2;固定  $w=300$  nm,高度  $h$  变化时基模沿  $z$  轴的能流密度分布见图 3. 从图 2、3 可以看出,基模能量主要被限制在非线性层,当波导宽度增大,非线性区域的能量也增大,因此传播长度也随着波导宽度  $w$  的增大.

图 4 为有效折射率  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  和传播长度  $L_p$  随  $w$  的变化关系曲线,其中  $\text{Re}(n_{\text{eff}}) = \text{Re}(\beta)/k_0$ ,  $L_p = 1/2\text{Im}(\beta)$ . 从图 4(a)中可以看出,对于不同厚度的非线性层,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  随  $w$  的增大而增大,在同一宽度的情况下,有效折射率随非线性层材料的厚度增加而减小. 由图 4 (b)中可以看出,随着波导宽度  $w$  的增大,非线性区域能量增大,传播长度随之增大,在同一波导宽度情况下,  $L_p$  随着非线性层材料厚度的增加而增大,因为金属表面的强耦合作用,等离子体模式传播距离不能增加很多,结合传播距离,非线性层的厚度一般选取在 100 nm 以上.

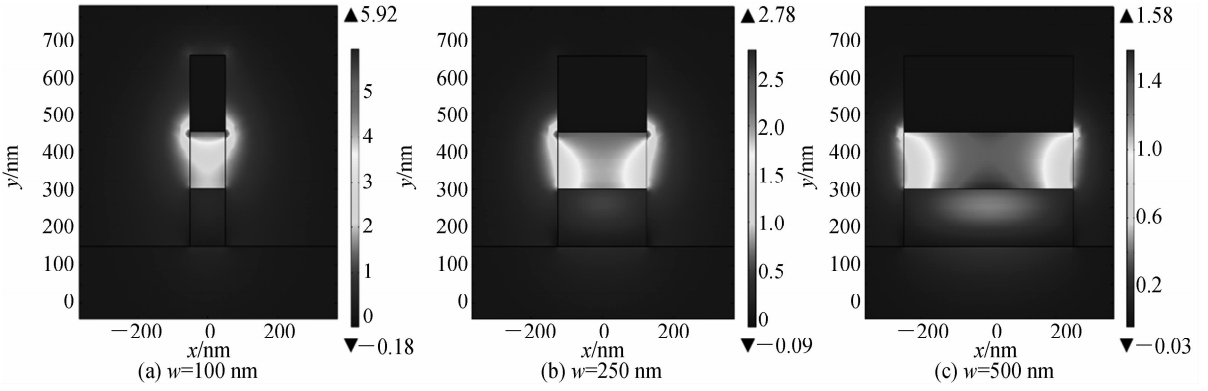


图2 基模沿z轴的能流密度 $S_z$ 在横截面的分布与 $w$ 的关系

Fig. 2 Relations of  $S_z$  distributions of the fundamental mode with different  $w$

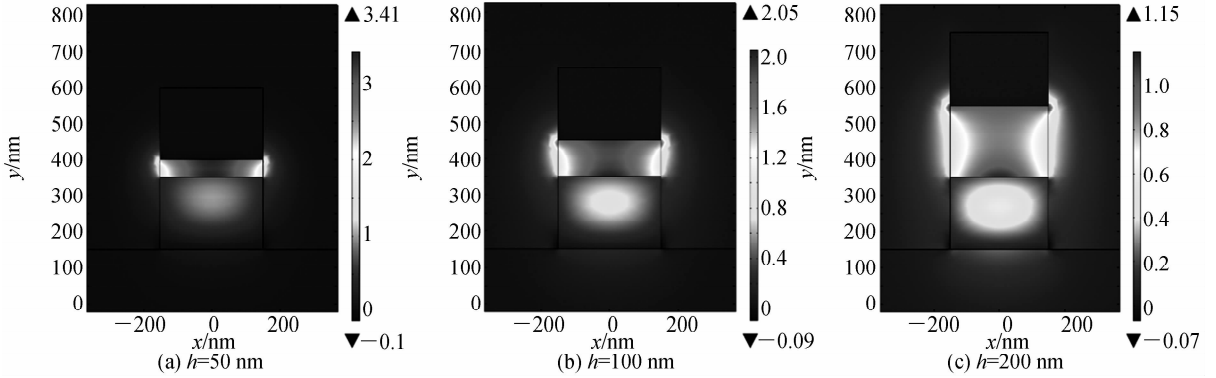


图3 基模沿z轴的能流密度 $S_z$ 在横截面的分布与 $h$ 的关系

Fig. 3 Relations of  $S_z$  distributions of the fundamental mode with different  $h$

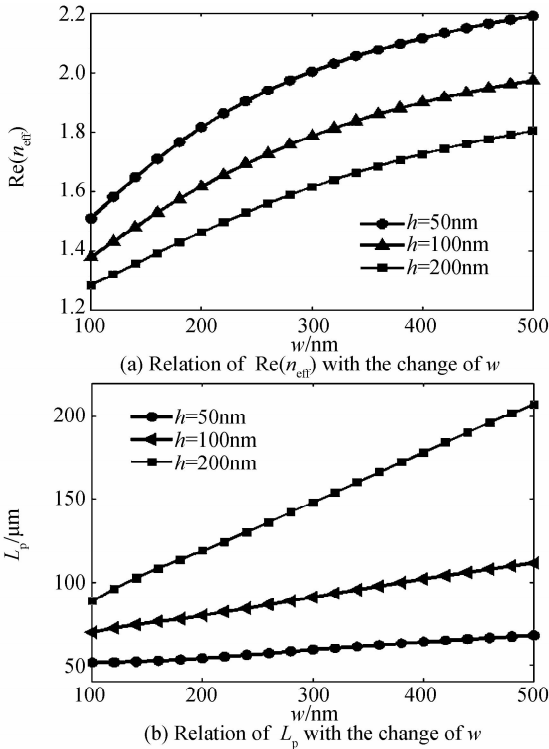


图4 在非线性区域高度分别为50 nm,100 nm,200 nm 情况下, $Re(n_{eff})$ 和 $L_p$ 随 $w$ 的变化关系曲线

Fig. 4 Relation of  $Re(n_{eff})$  and  $L_p$  with the change of  $w$  when  $h=50\text{ nm}, 100\text{ nm}, 200\text{ nm}$

考虑到导模有效面积 $A_{eff}$ 与波导中沿z轴的能流密度矢量有关<sup>[18-19]</sup>,图5(a)、(b)分别给出了归一化有

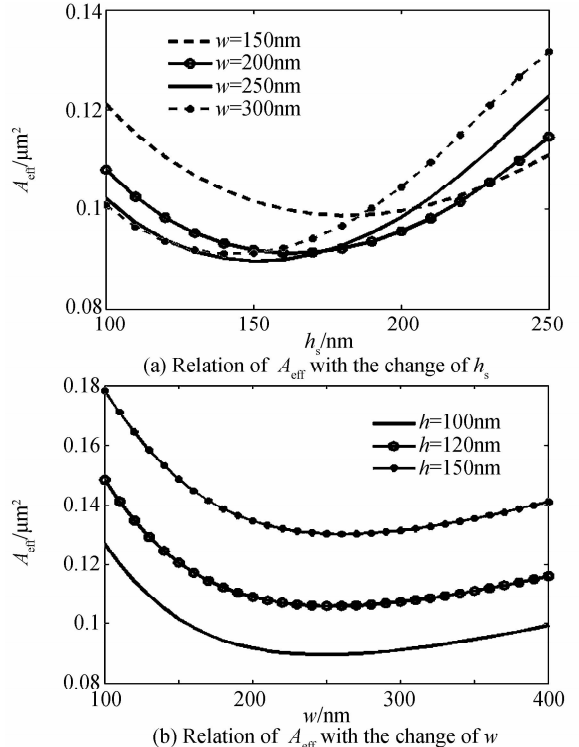


图5 有效面积随 $h_s$ 及 $w$ 的变化关系曲线

Fig. 5 Relation of effective area with the change of  $h_s$  and  $w$

有效面积  $A_{\text{eff}}$  随着硅层厚度  $h_s$  和金属层宽度  $w$  变化关系曲线. 从图 5(a) 可以看出, 当固定  $h=100$  nm 时,  $w=250$  nm,  $h_s=150$  nm, 模式的有效面积具有最小值. 从图 5(b) 可以看出, 当固定  $h_s=150$  nm 时,  $w$  在 200~300 nm 之间,  $h=100$  nm 时, 模式的有效面积具有最小值. 由于有效面积的定义与电场和磁场有关, 当  $A_{\text{eff}}$  具有最小值时, 表示具有最强的能量限制在非线性材料中, 根据图 5 结果对波导结构参数进行优化, 选择波导宽度  $w=250$  nm, 非线性材料层厚度  $h=100$  nm, 硅层厚度  $h_s=150$  nm, 此时可以达到最大的非线性变化情况.

非线性 Si-NC/SiO<sub>2</sub> 介质的折射率与纳晶硅中镶嵌的二氧化硅体积比有关, 该折射率可由布莱格曼公式<sup>[6]</sup> 给出

$$n_{\text{NC}} = \{ u + [u^2 + (n_{\text{si}} n_{\text{siO}_2})^2 / 2]^{1/2} \}^{1/2} \quad (5)$$

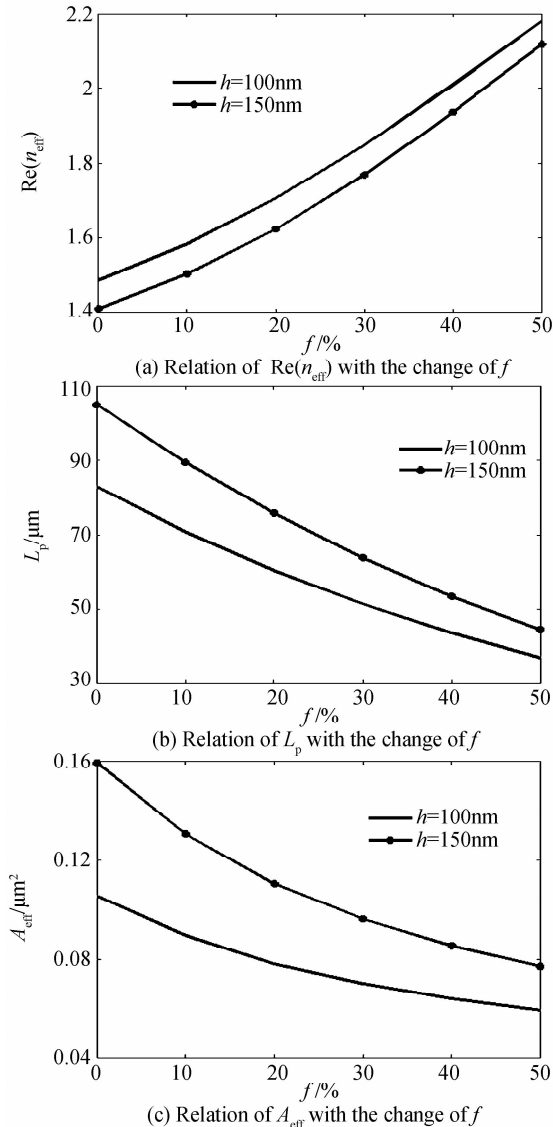


图 6 传输特性随  $f$  的变化关系图

Fig. 6 Relation of the propagation properties with the change of  $f$

式中,  $u = [(2-3f)n_{\text{SiO}_2}^2 + (3f-1)n_{\text{Si}}^2]/4$ ,  $f$  为二氧化硅在纳晶硅中的体积比. 可以通过改变 Si-NCs 的体积比来调整其折射率, 图 6 分别给出了在优化结构参数  $w$  为 250 nm,  $h_s$  为 150 nm 情况下等离子体波导的有效折射率、传播长度和有效面积随体积密度  $f$  的变化关系. 从图 6(a) 中可以看出波导的有效折射率随着 Si-NCs 的体积比  $f$  的增大而增大. 从图 6(b) 可以看出,  $L_p$  随  $f$  的增大而减小. 从图 6(c) 可以看出,  $A_{\text{eff}}$  随着  $f$  增大而减小. 这种现象可以从非线性介质的折射率的变化来解释: 由于场主要集中在非线性区域, 当 Si-NCs 体积比较小时, 非线性 Si-NC/SiO<sub>2</sub> 材料的折射率也较小, 场与金属表面接触面积较大, 与金属银的相互作用较弱, 有效折射率较小, 传播距离和有效面积较大. 而在  $f$  增大时, 非线性材料的折射率随着增大, 场在非线性区域的分布范围较小, 场与金属银的相互作用较弱, 有效折射率较大, 传播距离和有效面积随之变小.

### 3 结论

设计了一种基于非线性介质 Si-NC/SiO<sub>2</sub> 的混合表面等离子体波导, 使用有限元方法仿真模拟了结构参数和 Si-NCs 体积比对传输特性的影响. 数值计算结果表明: 基模沿纵向的能量主要分布在非线性区域, 且越靠近金属, 能量密度越大. 通过调节这种波导的几何参数以及 Si-NCs 体积比, 调节基模的传输特性, 得到波导最优结构参数, 以达到最大的非线性变化情况. 本文只讨论了非线性介质 Si-NC/SiO<sub>2</sub> 的优化结果, 但此优化结果可用于其它非线性介质中, 并为非线性介质的混合表面等离子体波导在光子集成和光学操控领域的应用提供理论依据.

#### 参考文献

- [1] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824-830.
- [2] OZBAY E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189-193.
- [3] MARIE S A. Plasmonics: The promise of highly integrated optical devices[J]. *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics*, 2007, **12**(6): 1671-1677.
- [4] LIU Bing-chan, LIU Zhi-xin, YU Jin. The dispersion relation for surface plasmon at a metal-Kerr nonlinear medium interface [J]. *Acta Physica Sinica*. 2010, **59**(2): 1180-1184  
刘炳灿, 逯志欣, 于丽. 金属和 Kerr 非线性介质界面上表面等离子体激元的色散关系 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 1180-1184.
- [5] IVAN D R, MALIN P. Optimization of nonlinear performance of silicon-nanocrystal cylindrical nanowires [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(3): 952-959.
- [6] IVAN D R, MALIN P, GOVIND P A. Effective mode area and its optimization in silicon-nanocrystal waveguides [J]. *Optics Letters*, 2012, **32**(12): 2295-2297.
- [7] ZHANG Jiang-tao, GU Zheng-xian, DENG Chuan-lu. Traditional approximate theory and thin film optical theory in

- SPR[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7):1216.
- 张江涛,顾铮先,邓传鲁.表面等离子共振效应中传统近似理论与薄膜光学理论[J].光子学报,2010,**39**(7):1216.
- [8] TANAKA K, TANAKA M. Simulations of nanometric optical circuits based on surface plasmon polariton gap waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(8): 1158-1160.
- [9] KUSUNOKI F, YOTSUYA T, TAKAHARA J, *et al.* Propagation properties of guided waves in index-guided two-dimensional optical waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(21): 211101.
- [10] BIAN Y S, ZHENG Z, ZHAO X, *et al.* Highly confined hybrid plasmonic modes guided by nanowire-embedded-metal grooves for low-loss propagation at 1550 nm [J]. *IEEE Journal of selected Topics Quantum Electron*, 2013, **19**(3): 4800106.
- [11] PILE D F P, GRAMOTNEV D K. Channel plasmon-polariton in a triangular groove on a metal surface[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(10): 1069-1071.
- [12] TIAN J, YAN W. Broadband high-efficiency surface plasmon-polariton coupler with silicon-metal interface [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(1):013504.
- [13] LI Zhi-quan, FENG Si-yuan, Sun Yu-chao, *et al.* Design of a silicon-based slot surface plasmonic waveguide [J]. *Acta Photonica sinica*, 2014, **43**(2):0213002.
- 李志全,冯思远,孙宇超,等.一种基于硅基金属狭缝表面等离子体波导的设计[J].光子学报,2014,**43**(2):0212002.
- [14] CHEN L, CAO Z Q, OU F, *et al.* Observation of large positive and negative lateral shifts of a reflected beam from symmetrical metal-cladding waveguides [J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(11): 1432-1434.
- [15] 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.
- [16] GUAN X W, WU H, DAI D X. Silicon hybrid nanoplasmonics for ultra-dense photonic integration[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2014, **7**(3):330-319.
- [17] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical Constants of the Noble Metals [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, **6**(12): 4370-4379.
- [18] VILLENEUVE A, AITCHISON J S, VOGELE B, *et al.* Waveguide design for minimum nonlinear effective area and switching energy in AlGaAs at half the bandgap [J]. *Electronics Letters*, 1995, **31**(7): 549 - 551.
- [19] FOSTER M A, MOLL K D, GAETA A L. Optimal waveguide dimensions for nonlinear interactions[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(13): 2880-2887.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61101064, 51277001, 61471001), the Natural Science Foundation of Anhui Province (Nos. KJ2012A013,1508085JGD03,1508085QF130), the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (No. 20123401110009) and the New Century Excellent Talents in University (No. NCET-12-0596).