

doi:10.3788/gzxb20144309.0916001

纳米金属肋混合表面等离子体波导模式特性分析

王聪^{1,2}, 吴根柱^{1,2}, 周沛^{1,2}, 张蒙^{1,2}, 陈达如^{1,2}

(1 浙江师范大学 信息光学研究所; 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: 基于传统混合表面等离子体波导, 提出了一种半导体纳米线和纳米金属肋混合的表面等离子体波导. 采用有限元法对其模式特性进行了数值模拟, 研究了该波导的有效折射率、传播损耗、归一化模场面积等特性随波导几何尺寸的变化规律, 分析了该混合波导的增益阈值. 结果表明: 该波导具有较低的传播损耗和较强的光场限制能力, 并且混合模式的最小模面积仅为 $0.00152 \mu\text{m}^2$.

关键词: 混合表面等离子体波导; 模式特性; 增益阈值; 表面等离子体纳米激光器

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0916001-5

Mode Properties of Hybrid Plasmonic Waveguide with an Metal Nano-rib

WANG Cong, WU Gen-zhu, ZHOU Pei, ZHANG Meng, CHEN Da-ru

(1 Institute of Information Optics; 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 novel hybrid plasmonic waveguide which consists of a semiconductor nanowire and a metal nano-rib was proposed based on the traditional hybrid plasmonic waveguide. Relationship between the geometrical sizes and the properties of the proposed hybrid plasmonic waveguide, such as effective refractive index, propagation loss and normalized mode area was numerically simulated by employing a finite element method. And the gain threshold of the hybrid waveguide was analyzed. Simulation results reveal that this kind of hybrid waveguide has a low propagation loss and high field confinement ability, and its minimum mode area is only $0.00152 \mu\text{m}^2$.

Key words: Hybrid plasmonic waveguide; Model properties; Threshold; Surface plasmon polariton nano laser

OCIS Codes: 160.4236; 160.3130; 350.0350; 350.5400; 350.3950; 350.4238

0 引言

基于表面等离子体激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 的表面等离子体波导 (Surface Plasmon Waveguides, SPWs) 能够突破衍射极限, 实现亚波长尺寸的光场限制, 成为人们研究的热点^[1-4]. 基于 SPPs 的特点, 人们提出了多种类型的表面等离子体波导结构, 有金属-绝缘体-金属 (Metal-Insulator-Metal, MIM) 结构^[5-7], 绝缘体-金属-绝缘体 (Insulator-Metal-Insulator, IMI) 结构^[8-9], 金属纳米线结构^[10-11],

沟槽型结构^[3,12], 楔形结构^[13-15]等. 但是这类波导结构在传播距离与光场限制能力之间存在一种“矛盾”的关系, 比如在长程表面等离子体波导^[16]中可以实现厘米量级的传播距离, 但是这种波导的光场限制能力却很弱; 而金属-绝缘体-金属结构的波导具有较强的光场限制能力, 但是因其有较大的能量损耗, 故传播距离较小.

文献^[17-20]提出一种混合型表面等离子体波导 (Hybrid Plasmonic Waveguides, HPW). 这种波导一般由高折射率介质波导放置在金属基底上, 中间形成一个有低折射率介质填充的间隙. 在混合表面等离子体

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, Y14F050008) 和浙江省重点科技创新团队 (No. 2010R50007) 资助

第一作者: 王聪 (1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为球微腔传感. Email: emmajack@126.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: wugen-zhu@zjnu.cn

收稿日期: 2013-12-13; **录用日期:** 2014-04-30

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

波导中, SPP 模式和介质波导模式相互耦合导致有相当一部分的电场能量局域在介质波导和金属基底之间的空隙内, 空隙内的电场分量(主要是 quasi-TE 模式)垂直于交界面, 金属基底产生电荷, 而半导体纳米线会产生极化电荷, 这个电场在空隙内的增强效果相当于一个电容器存储电荷一样, 产生“电容式”的能量存储, 从而使模场可以很好地被局限在介质波导和金属基底之间的空隙处. 这种混合波导能够保持较强的光场限制能力, 同时具有较远的传播距离.

本文提出的新型混合表面等离子体波导结构主要由 CdS 纳米线和 Ag 质金属肋组成, 在 CdS 纳米线的外面包裹一层纳米量级厚的低折射率 MgF_2 包层. 通过有限元法计算了该波导结构的几何参数改变对其有效折射率、传播损耗、归一化模场面积等的影响, 同时对其增益阈值进行了分析.

1 物理模型

混合表面等离子体波导结构如图 1. 该混合表面等离子体波导由一个金属肋和放置在其正上方的均匀无吸收圆柱形电介质纳米线组合而成. 以金属银为金属肋基底材料, CdS 和 MgF_2 为电介质纳米线的内芯和包层, 其余部分为空气. 在实际制作和使用过程中, 由于波导尺寸极小, 很容易造成上方的纳米线与 Ag 质基底直接接触. 故需在高折射率介质纳米线的外面包裹一层纳米量级厚的低折射率包层. 如果去掉低折射率的 MgF_2 层, 高折射率 CdS 纳米线与金属 Ag 直接接触, 此时较大部分光场能量耦合进入到金属基底将引起较高的传播损耗; 如果 CdS 纳米线外面覆上 MgF_2 包裹层后, CdS 纳米线与 Ag 质基底之间始终有一层低折射率的间隙, 原先在金属中的能量会更多的集中在 MgF_2 中, 使得混合波导的传播损耗降低.

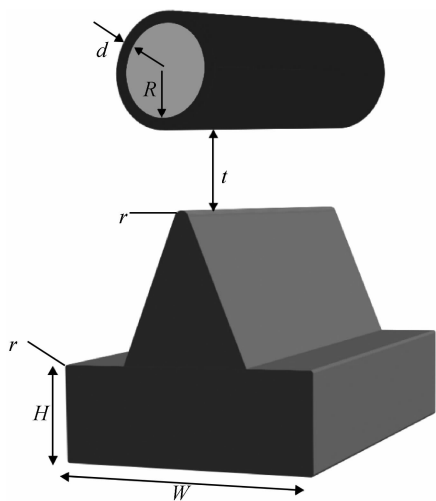


图 1 新型混合表面等离子体波导的结构示意图
Fig. 1 Schematic structure of designed novel hybrid plasmonic waveguide

该波导的基底底部宽度 $W = 250 \text{ nm}$, 高度 $H = 100 \text{ nm}$, 基底顶部尖角的角度 θ 取 $10^\circ \sim 78^\circ$, 为了避免出现奇点, 以及考虑到制作工艺的限制, 文中对金属肋顶端进行圆角处理^[21], 圆角的曲率半径为 $r = 10 \text{ nm}$. CdS 纳米线的半径 R 为 $50 \sim 250 \text{ nm}$, MgF_2 包层的厚度 $d = 5 \text{ nm}$, MgF_2 包层与基底顶角之间的距离 t 取 $10 \sim 50 \text{ nm}$. 由于 CdS 波导模式与 SPP 模式相互耦合, 模场可以很好地被局限在 CdS 波导和 Ag 质基底之间的空隙处, 如图 2 所示.

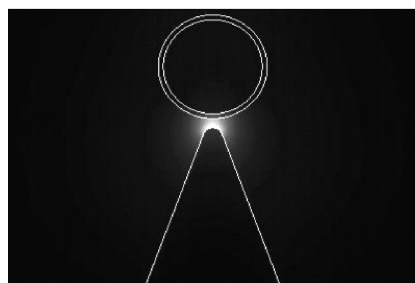


图 2 当 $\theta = 40^\circ$, $t = 10 \text{ nm}$ 时混合表面等离子体的模场分布
Fig. 2 Field distribution of the hybrid plasmonic waveguide when $\theta = 40^\circ$, $t = 10 \text{ nm}$

2 数值仿真及分析

2.1 混合表面等离子体波导的模式特性分析

该混合表面等离子体波导的工作波长 $\lambda = 489 \text{ nm}$ ^[22], Ag、CdS、 MgF_2 的相对介电常数分别为 $\epsilon_m = -9.2 + 0.3i$, $\epsilon_t = 5.76$, $\epsilon_c = 1.96$. 根据二维波动方程^[23]

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

分析该混合波导的模式特性, 式中 n 代表材料的折射率, N_{eff} 代表模式的有效折射率. 本文研究的混合波导的模式特性主要包括有效折射率(n_{eff})、传播损耗(α_{eff})、归一化模场面积(A_{eff}/A_0)以及限制因子(Γ). 其中有效折射率 $n_{\text{eff}} = \text{Re}(N_{\text{eff}})$; 传播损耗 $\alpha_{\text{eff}} = \text{Im}(N_{\text{eff}})$; 有效模场面积计算公式为^[24]

$$A_{\text{eff}} = \left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2 / \left(\iint |E|^4 dx dy \right) \quad (2)$$

混合模式的归一化模场面积表示为 $A = A_{\text{eff}}/A_0$ ($A_0 = \lambda^2/4$, 代表真空衍射极限下的模场面积); 限制因子 Γ 定义为 CdS 纳米线中的电场能量与该模式波导的总能量之比, 用以表征增益介质纳米线的场强限制能力. 利用有限元数值计算方法求解波动方程(1), 得到混合表面等离子体波导的模式特性.

首先研究混合表面等离子体波导的模式特性随基底顶部角度 θ 以及空气间隙 t 的变化情况, 如图 3. 从图 3 中可以看出, 当空气间隙 t 为一个定值时, 随着基底顶部角度 θ 的增大, 模式的有效折射率和传播损耗均逐渐减小. 而归一化模场面积随着角度 θ 的增大而增大, 且当 $t = 10 \text{ nm}$ 时该值基本保持不变, 归一化模

场面积越小表明对模场的限制能力越强,说明当空气间隙较小时,即使角度 θ 不断增大,该模式也可以保持较强的模场约束能力.当 $\theta=10^\circ, t=10\text{ nm}$ 时该混合波导的有效模场面积最小,可以达到 $0.00152\ \mu\text{m}^2$.随着角度 θ 的增大,限制因子也随之增大,这是由于随着顶部角度的增大,混合模式和增益介质之间的模场重叠

逐渐增加.由图3还可以看出,当角度 θ 保持不变时,随着空气间隙 t 的增大,有效折射率、传播损耗和限制因子均逐渐减小,而归一化模场面积则随着空气间隙的增大而增大,这是因为不断增大的空气间隙导致纳米线中的模场与金属肋中的模场之间的耦合不断减弱.

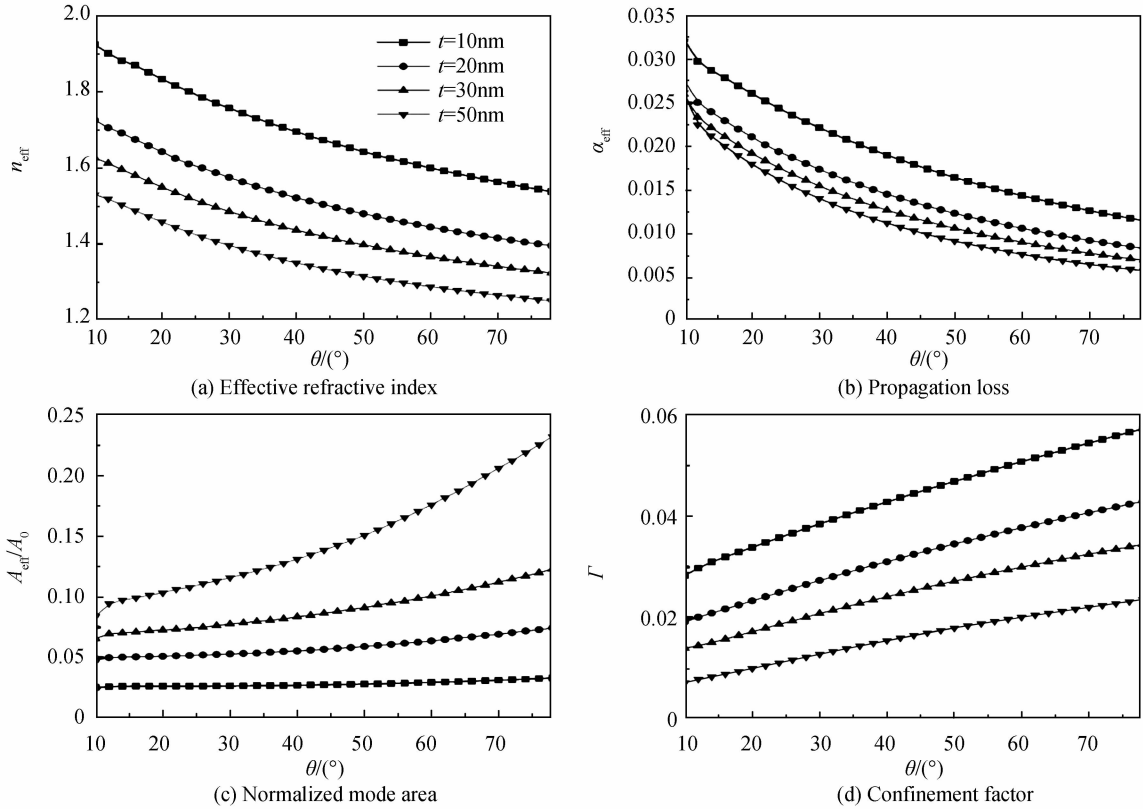
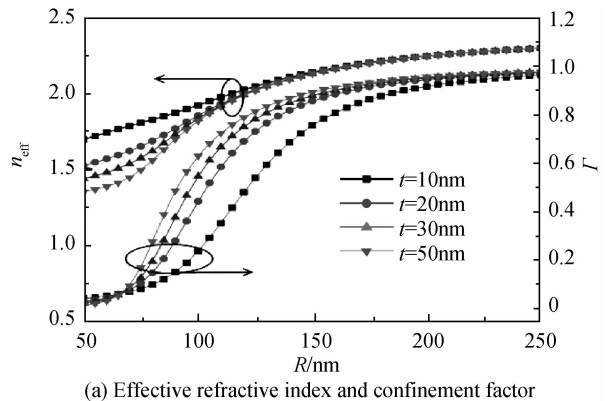


图3 混合型表面等离子体波导模式特性随基底顶部角度 θ 以及空气间隙 t 的变化
Fig. 3 Model properties of the hybrid plasmonic modes versus degree θ and gap t

其次研究了混合表面等离子体波导的模式特性在不同半导体纳米线半径 R 以及空气间隙 t 下的变化情况,如图4.从图4中可以看出,当空气间隙距离 t 为一个定值时,随着半导体纳米线半径 R 的增大,模式的有效折射率、归一化模场面积和限制因子均逐渐增大,而传播损耗则减小.半导体纳米线半径 R 增大会引起归一化模场面积的增大,这是由于随着 R 的增加,能量更多地集中在纳米线中,相对于在金属中传播,能量在纳米线中的传播损耗要小的多,因此传播损耗急剧减小.从图4中还可以看出,空气间隙 t 从 10 nm 增大到 50 nm 的过程中,当纳米线半径 $R < 150\text{ nm}$ 时,模式的有效折射率随 t 的增大而减小,而当 $R > 150\text{ nm}$ 时有效折射率基本保持不变,这是由于当纳米线尺寸比较大时,混合模式的特性逐渐表现为仅有一个纳米线时的柱形模式,此时空气间隙的变化对波导模式的影响很小;随着空气间隙的增大,传播损耗逐渐减小,归一化模场面积逐渐增大,这是由于当空气间隙增大时,在纳米线与基底之间的光耦合效应逐渐减弱;而限制因

子随 t 的增大呈现出不同的趋势,对于尺寸较小的纳米线 ($R < 65\text{ nm}$) 限制因子逐渐减小,当纳米线的尺寸较大时 ($R > 65\text{ nm}$) 限制因子逐渐增大,这是由于当纳米线尺寸比较小时,随着 t 的增大纳米线中的模场与银质金属肋中的模场耦合不断减弱导致的,随着纳米线尺寸的增加,这种耦合会不断增强,从而使限制因子随 t 的增大而增大.



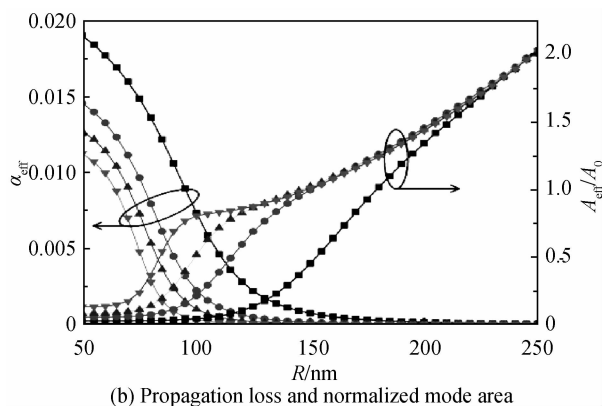


图4 混合型表面等离子体波导模式特性随半导体纳米线半径 R 以及空气间隙 t 的变化

Fig. 4 Model properties of the hybrid plasmonic modes versus radius R and gap t

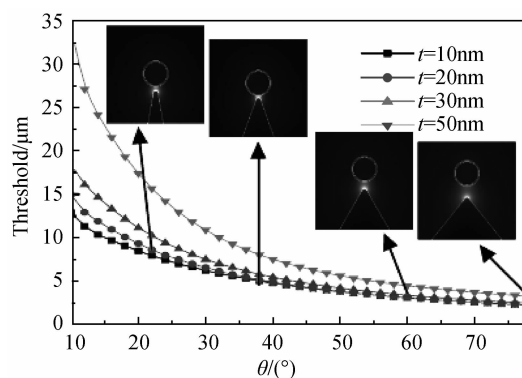


图5 增益阈值随基底顶部角度 θ 以及空气间隙 t 的变化, 插图为相应的模场分布

Fig. 5 Threshold(g_{th}) versus degree θ and gap t . The insets plot the corresponding distribution of the hybrid mode

2.2 混合表面等离子体波导的增益阈值分析

混合等离子体波导可以应用于低阈值表面等离子体纳米激光器. 当激光器的增益介质是 CdS 纳米线, 在抽运光的作用下, 在金属表面产生的 SPPs 模式耦合进入 CdS 纳米线, CdS 纳米线同时又可以做为光学谐振腔, 使 SPPs 模式和高增益介质纳米线的波导模式相互耦合, 场强得到极大的增强后从纳米线两端面发射^[22, 25].

该混合波导的增益阈值受半导体纳米线的长度 L 和端面反射率 R 的影响, 本文取该波导结构中纳米线纵向长度为 $30 \mu\text{m}$, 其中端面反射率定义为

$$R = \frac{(n_{\text{eff}} - 1)}{(n_{\text{eff}} + 1)} \quad (3)$$

增益阈值表示为^[26]

$$g_{\text{th}} = (k_0 \alpha_{\text{eff}} + \ln(1/R)/L) / \Gamma(n_{\text{eff}}/n_{\text{wire}}) \quad (4)$$

式中, 等式右边第一项表示传播损耗(α_{eff}), 包括金属损耗和纳米线与 Ag 脊耦合产生的辐射损耗; 第二项表示谐振腔腔面损耗. 如前所述这里只考虑均匀无吸收情况, 忽略纳米线的内部吸收和散射损耗. 真空中的波数 $K_0 = 2\pi/\lambda$, n_{wire} 为增益介质纳米线的折射率, 比例因子 $n_{\text{eff}}/n_{\text{wire}}$ 为模式有效折射率的增强部分.

混合表面等离子体波导的增益阈值随角度 θ 以及空气间隙 t 的变化曲线如图 5. 从图中可以看出当 t 保持不变时, 随着 θ 的增大其增益阈值逐渐减小, 这是由于当 θ 较小时混合模式和增益介质之间的模场重叠比较小, 且传播损耗比较大, 因此其增益阈值也比较大; 而随着 θ 的增大这种情况逐渐改变, 因此增益阈值也随之减小, 当 θ 越大 t 越小时, 其阈值越低. 对于该混合等离子体波导, 只要当光增益达到增益介质纳米线的阈值时, 便可产生激光, 从而实现低阈值表面等离子体纳米激光器.

3 结论

提出了一种新型的混合表面等离子体波导, 这种波导由外层包裹有低折射率 MgF_2 包层的 CdS 纳米线和 Ag 质金属肋组成. 用有限元法分析了该混合波导结构的模式特性同时对该波导的增益阈值进行了分析, 该波导具有较强的光场限制能力, 并且可以保持较低的传播损耗. 该混合波导在实现低阈值表面等离子体纳米激光器方面存在着潜在的应用.

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] OZBAY E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nano scale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5788): 189-193.
- [3] BOZHEVOLNYIS I, VOLKOV V S, DEVAUX E, et al . Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. *Nature*, 2006, **440** (7083): 508-511.
- [4] MAIER S A. Plasmonics: The promise of highly integrated optical devices [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(6): 1671-1677.
- [5] LIU L, HAN Z H, HE S L. Novel surface plasmon waveguide for high integration[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(17): 6645-6650.
- [6] VERONIS G, Fan S H. Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(24): 3359-3361.
- [7] FENG N N, BRONGERSMA M L, NEGROL D. Metal - dielectric slot-waveguide structures for the propagation of surface plasmon polaritons at $1.55 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **43**(6): 479-485.
- [8] JU J J, PARK S, KIM M S, et al . Polymer-based long-range surface plasmon polariton waveguides for 10-Gbps optical signal transmission applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(11): 1510-1518.
- [9] BERINI P. Plasmon-polariton waves guided by thin lossy metal films of finite width: Bound modes of symmetric structures[J]. *Physical Review B*, 2000, **61**(15): 10484-10503.

- [10] TAKAHARA J, YAMAGISHI S, TAKI H, *et al.* Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(7):475-477.
- [11] ZOU C L, SUN F W, XIAO Y F, *et al.* Plasmon modes of silver nanowire on a silica substrate[J]. *Applied Physics Letters* 97, 2010, **97**(18):183102-183102-3.
- [12] 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.
- [13] 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):061106-061106-3.
- [14] 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):023901-023901-4.
- [15] 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.
- [16] HOLMGAARD T, GOSCINIAK J, BOZHEVOLNYI S I. Long-range dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(22):23009-23015.
- [17] 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.
- [18] AVRUTSKY I, SOREF R, BUCHWALD W. Sub-wavelength plasmonic modes in a conductor-gap-dielectric system with a nanoscale gap [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(1):348-363.
- [19] ALAM M Z, MEIER J, AITCHISON J S, *et al.* Propagation characteristics of hybrid modes supported by metal-low-high index waveguides and bends[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12):12971-12979.
- [20] ZHANG X Y, HU A, WEN J Z, *et al.* Numerical analysis of deep sub-wavelength integrated plasmonic devices based on Semiconductor-Insulator-Metal strip waveguides [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(18):18945-18959.
- [21] ANDERSEN J and SOLODUKHOV V, *et al.* Field behavior near a dielectric wedge[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, **26**(4):598 - 602.
- [22] OULTON R F, SORGER V J, ZENTGRAF T, *et al.* Plasmon lasers at deep subwavelength scale [J]. *Nature*, 2009, **461**(7264):629-632.
- [23] ZOU C L, SUN F W, XIAO Y F, *et al.* Plasmon modes of silver nanowire on a silica substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(18):183102-183102-3.
- [24] BIAN Y, ZHENG Z, ZHAO X, *et al.* Hybrid plasmonic structures based on CdS nanotubes; a novel route to low-threshold lasing on the nanoscale[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, **45**(50):505105-505105-7.
- [25] 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.
- [26] ZHU Lin. Modal properties of hybrid plasmonic waveguides for nanolaser applications[J]. *Technology Letters*, 2010, **22**(8):535-537.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.