

硅基结构混合等离子激元波导模式特性的数值研究

赵丽美, 关建飞

(南京邮电大学 光电工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 首先建立了一种由相同宽度的金属带, SiO₂ 间隔层与 Si 介质脊构成的导体-夹层-硅基结构 (Conductor-Gap-Silicon, CGS) 的混合等离子激元波导模型, 分析了间隔层的厚度以及波导宽度对模式传输特性的影响, 提出了模场面积为 0.08 μm² 与 430 μm 传输距离的设计方案。在此基础上, 通过增加数值模型中介质脊的宽度而形成硅基板 CGS 波导结构。数值分析结果表明: 硅基板 CGS 波导可将模式有效折射率增至 2.8, 同时传输长度能够延长到 1.74 mm。并且模场面积可以进一步压缩到 0.025 μm²。此外, 硅基板 CGS 波导制作更加简便, 并可采用现有 CMOS 制作技术完成, 进而具有较大的实用前景。

关键词: 混合等离子体波导; 表面等离子体激元; 传输长度; 有效模场面积; 耦合长度
中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1329-06

Numerical study on the modal characteristics of silicon-based hybrid plasmonic waveguides

Zhao Limei, Guan Jianfei

(School of Optoelectronics Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunication, Nanjing 210023, China)

Abstract: A subwavelength conductor gap silicon (CGS) hybrid plasma waveguide was theoretically analyzed, which consisted of a thin low-index layer sandwiched between a silver strip and a high index silicon structure. The guiding properties of surface plasmon polaritons, such as propagation length and mode field area, were investigated for different rib widths and silica gap layer thickness. As a result, an effective modal area of 0.08 μm² and the propagation length of 430 μm can be achieved simultaneously. Based on which, the silicon slab based CGS waveguide can be formed by increasing the width of silicon rib, it should be noted that the structure can generate the larger effective refractive index value of 2.8 and the propagation length of 1.74 mm, moreover, it provided a more strong confinement of the optical field such as 0.025 μm² thickness SiO₂ gap. In addition, more simple structure and CMOS compatible fabrication process make these conductor gap silicon plasmonic waveguide a promising candidate for realizing high integration density plasmonic circuits.

Key words: hybrid plasma waveguide; surface plasmon; propagation length; effective mode area; coupling length

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-09-30

作者简介: 赵丽美(1989-), 女, 硕士生, 主要从事光通信方面的研究工作。Email: well987@qq.com

导师简介: 关建飞(1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤通信技术与导波光学方面的研究工作。Email: guanjf@njupt.edu.cn

0 引言

纳米光波导是光集成电路的基本元件,研究纳米光波导对于实现高集成度电路具有重大意义。近年来相继有三种纳米光波导结构被提出:具有较大折射率差的硅脊介质波导^[1-2],基于光子晶体结构的介质波导^[3]以及表面等离子体波导^[4]。前两种波导的光场约束在每个方向上为一个波长量级,而表面等离子体光波导则能提供更小尺度的纳米级波导及约束。

随着表面等离子体激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)效应的深入研究,诞生了各种不同的 SPP 波导结构,如金属-绝缘体-金属(metal-insulator-metal, MIM)波导结构^[5]。这种结构虽然具有较好的光场约束能力,但是传输损耗较大,以致传输距离通常只能达到几微米^[6-7]。为了解决亚波长约束和长距离传输的对立问题,Marcelo Wu 提出了一种基于“导体-夹层-介质”三明治结构的混合等离子体波导结构^[8],并获得了较为广泛的关注与研究。若介质和导体之间的夹层具有较高的电光系数,此波导结构也可以用来制造低驱动电压、简洁灵活的光学调制器。

近年来,由于制造工艺与 CMOS 微电子技术标准的兼容,硅光子学已经变得越来越具有吸引力,因而以硅作为介质材料的混合等离子体光波导也引起了广泛关注。文中采用有限单元数值方法分析了 CGS 波导的结构参数对其模式传输特性的定量影响,进而为 SPP 波导的设计与制作提供了有效的借鉴。

1 波导结构

1.1 硅脊型 CGS 波导

图 1 是由金属-氧化物-硅基结构的混合等离子体光波导结构截面图,这一结构由于能够实现模式的纳米级约束进而成为纳米光子学集成器件领域的一个研究热点。文中选择的结构参数是: $w_{co}=200\text{ nm}$, $h_m=100\text{ nm}$, $h_{SiO_2}=50\text{ nm}$, $h_{Si_{rib}}=H_{Si}=300\text{ nm}$ 。入射光波波长为 1550 nm ,各层材料的折射率分别为金属银 $n_m=0.1453+11.3587i(\text{Ag})$ ^[7],二氧化硅 $n_{SiO_2}=1.445$,硅层 $n_{Si}=3.455$ 。当硅层和金属层之间的 SiO_2 层厚度较大时,基模模场被很好地约束在 Si 层,金属层对模

场分布几乎没有影响。在这种情况下,当前的结构就像一个规则的 SOI 纳米线。然而,随着 SiO_2 层厚度的减小(如 $<50\text{ nm}$),对于准 TM 极化(电场主要分量垂直于 $Ag-SiO_2$ 界面)的情形,基于电场分量的边界条件及高频光波电场与金属导体表面导带电子之间的耦合效应,金属层将会对导模的场分布产生显著的影响。

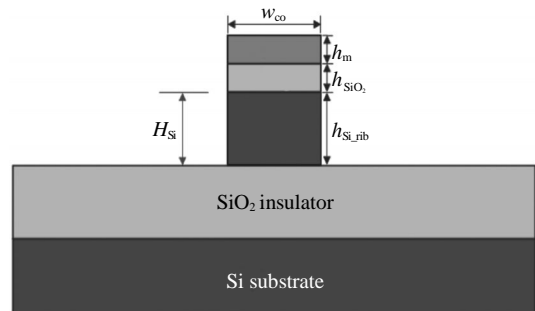


图 1 具有金属帽的混合等离子体光波导结构截面图

Fig.1 Cross section of the hybrid plasma waveguide structure with a metal cap section

图 2 表示出了脊宽为 100 nm , 300 nm 和 500 nm 的准 TM 模中 $E_y(x,y)$ 分量的模场分布图。由图可知,在厚度为 50 nm 的 SiO_2 层有一个明显地场增强区域。这是由于界面两侧介质之间较高的折射率差引起的交界面上电场的突变^[2,9],以及在金属与 SiO_2 交界处表面等离子体激元的场增强效应。SPP 激元的电场强度在金属介质交界面上存在一个峰值,并沿界面两侧呈指数衰减。当 SiO_2 层非常薄(小于消逝波穿透深度)时, SiO_2 层中场的分布会被挤压增强。另一方面,随着硅脊宽度的增加,更多的光能量被约束在硅层中,这也将对模式的传输特性产生显著影响,从而使得导波模式从 SPP 型逐渐向介质波导型过渡。与此相反,当脊的宽度减小到 50 nm 时,

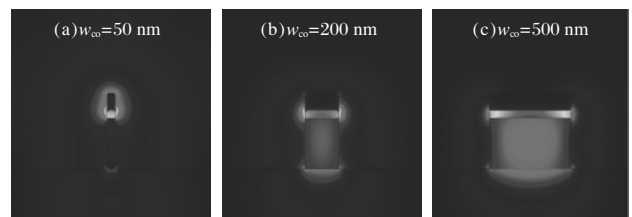


图 2 $h_{SiO_2}=50\text{ nm}$ 时的准 TM 基模的 $E_y(x,y)$ 模场分布图

Fig.2 Field distribution of the quasi-TM fundamental mode on the $h_{SiO_2}=50\text{ nm}$

此混合型光波导仍然有一个导模, 这非常有利于形成纳米级的光约束。

图 3 表示出了模式有效折射率、传输长度及模场面积与波导宽度及 SiO₂ 层厚度的关系曲线。当 SiO₂ 层厚度减小时, 有效折射率 n_{eff} 的实部将会单调递增; 而当硅脊的宽度增加时, 有效折射率 n_{eff} 的实部也相应增加, 如图 3(a) 所示, 这是因为有更多的光能被束缚在硅芯中。衡量等离子体激元波导器件性能的两个重要指标分别是传输距离 L_{prop} 及模场面积 A_{eff} 。传播距离 L_{prop} 定义为导模光场的幅度衰减为 1/e 时的沿波导轴向传输的距离, 即 $L_{\text{prop}}=1/(n_{\text{im}}k_0)$, 其中 n_{im} 是有效折射率的虚部, k_0 是真空中波数。图 3(b) 中混合模式传播距离随硅脊宽度变化的曲线表明, 随着硅基宽度的增加, 模式传播距离将会单调递增; 同时 SiO₂ 夹层厚度的增加也将使传输损耗进一步降低。由图 3(b) 可知, 当夹层厚度为 50 nm 时, 模式最大传输距离将突破 400 μm (这一结果与参考文献[7]的报道相吻合), 而传统的金属表面等离子体波导的传播距离通常为 3~5 μm ^[10]。

混合型波导的模场有效面积的可以定义为:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\int_s W_e(x,y) ds}{\max[W_e(x,y)]} \quad (1)$$

式中: $W_e(x,y)$ 为电场能量密度。图 3(c) 给出了模场有效面积随波导硅脊宽度改变的变化曲线。曲线走势表明: 导模有效模场面积随脊宽度 w_{co} 的减小而减小, 同时也随 SiO₂ 层厚度 h_{SiO_2} 的减小而减小。因此, 当选取更窄脊宽度和更薄 SiO₂ 层厚度时, 该波导结构能提供更加有效的模式束缚, 进而具有更小的有效面积^[11]。例如, 当 $w_{\text{co}}=50 \text{ nm}$, $h_{\text{SiO}_2}=5 \text{ nm}$ 时, 此波导的有效面积接近 600 nm^2 。这非常利于对非线性光学器件或光调制器的研究。

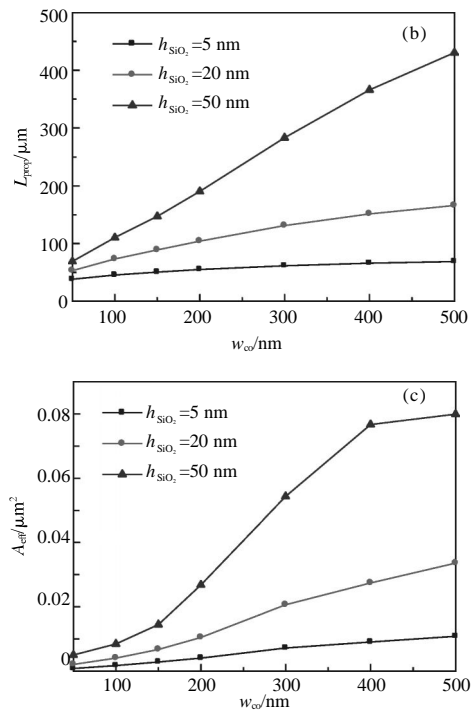
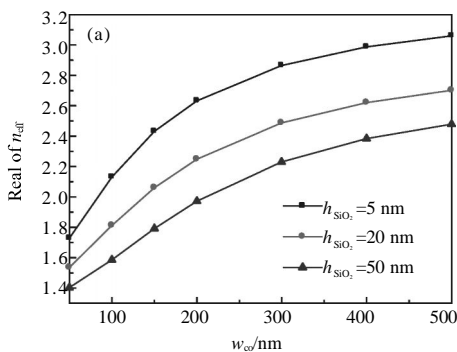


图 3 随着 w_{co} 的变化, SiO₂ 的厚度 h_{SiO_2} 分别为 50 nm, 20 nm, 5 nm 处的有效折射率的实部曲线图(a), 传播距离 L_{prop} 曲线图(b) 和有效面积曲线图(c)

Fig.3 For the cases of $h_{\text{SiO}_2}=50 \text{ nm}$, 20 nm, 5 nm, the real part of the effective refractive index (a), propagation distance L_{prop} (b) and effective mode area(c) as the change of w_{co}

图 3(b) 中曲线表明, SiO₂ 纳米层的厚度 h_{SiO_2} 将对 SPP 模的传播距离产生显著影响。当 SiO₂ 层的厚度达到 50 nm 时, 大部分光能量将被约束在硅层中, 进而随着硅脊宽度的减小, 约束在硅层的光能量的改变将会非常显著。换言之, 当 h_{SiO_2} 相对较大时, 硅脊的宽度对传播距离的影响更加显著。例如, 当 $h_{\text{SiO}_2}=50 \text{ nm}$ 时脊的宽度从 0.5 μm 减小到 50 nm 时, 传播距离从 430 μm 减小到 69 μm 。相反, 当 $h_{\text{SiO}_2}=5 \text{ nm}$ 时, 随着脊宽度的减小, 传播距离则从 68 μm 减小到 38 μm 。

1.2 硅基型 CGS 波导

硅脊型波导是硅层被完全蚀刻的情形, 当脊宽度较小时(如~100 nm), 此波导的纵横比较高, 这将增加制造的难度。经研究发现, 对于如图 4(a) 所示不蚀刻硅层的 CGS 波导模型同样可以实现有效传输 SPP 模式。为进一步硅基型等离子体光波导的导波性质, 文中计算了在 $w_{\text{co}}=50 \text{ nm}$ (大约为 $\lambda/30$) 下准 TM 极化

的主要分量 $E_y(x, y)$ 的场分布, 如图 4(b) 所示。同时在图 4(c) 和 (d) 清晰地显示了模式沿 $x=0$ 及 $y=0$ 截线上的场分布 $E_y(x, 0)$ 和 $E_y(0, y)$, 由此可知光场主要集中在 SiO_2 纳米层所处的 $50 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$ 区域。

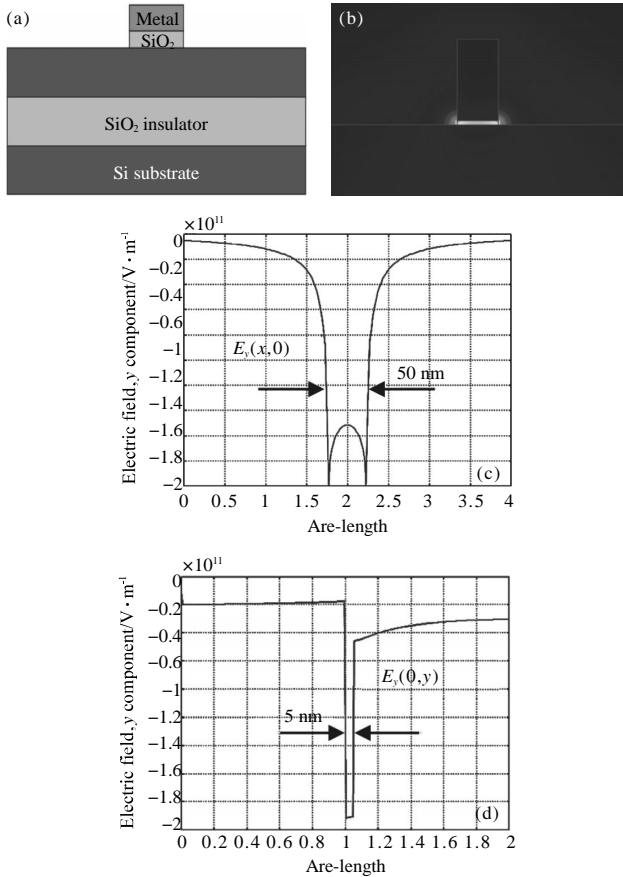


图 4 当 $h_{\text{Si,rib}}=0, h_{\text{SiO}_2}=5 \text{ nm}, w_{\text{co}}=50 \text{ nm}$ 时, 不蚀刻硅层且带金属帽的混合等离子体光波导结构截面图 (a); 间隔层 SiO_2 处准 TM 基模的模场分布 (b); (c) 和 (d) 分别是 $E_y(x, 0)$ 和 $E_y(0, y)$ 的场分布

Fig.4 Cross section of hybrid plasma waveguide structure with no etching silicon layer and with a metal cap (a); in the case of $h_{\text{Si,rib}}=0, h_{\text{SiO}_2}=5 \text{ nm}, w_{\text{co}}=50 \text{ nm}$, the field distribution of the quasi -TM fundamental mode on the SiO_2 layer (b); (c) and (d) are the field distribution of $E_y(x, 0)$ and $E_y(0, y)$

2 数值分析

图 5 给出了硅基型 CGS 波导 ($h_{\text{Si,rib}}=0$) 与硅脊型 CGS 波导 ($h_{\text{Si,rib}}=300 \text{ nm}$) 传输特性的比较, 硅基型波导具有更高的模式有效折射率, 而且当 SiO_2 纳米层厚度越薄时, 其模式有效折射率越大, 有效折射率随 w_{co} 的变化曲线 (实线、虚线、点线分别表示为间隔层

厚度 $h_{\text{SiO}_2}=5 \text{ nm}, 20 \text{ nm}, 50 \text{ nm}$); 如图 5(a) 所示; 硅基型波导具有更长的传输长度, 而且当 SiO_2 纳米层厚度越厚时, 其传输长度越长, 传播距离 L_{prop} 随 w_{co} 的变化曲线 (实线、虚线、点线分别表示为间隔层厚度 $h_{\text{SiO}_2}=5 \text{ nm}, 20 \text{ nm}, 50 \text{ nm}$) 如图 5(b) 所示; 硅基型波导具有更小的模场面积, 间隔层厚度 $h_{\text{SiO}_2}=5 \text{ nm}$ 时有效面积随 w_{co} 的变化曲线如图 5(c) 所示。硅基波导的硅层具有平板波导结构特征, 将会使更多的光能量约束在硅层。因而, 硅基型波导与硅脊型波导相比, 不仅加工难度降低, 而且具有更大的有效折射率与更远的传播距离。

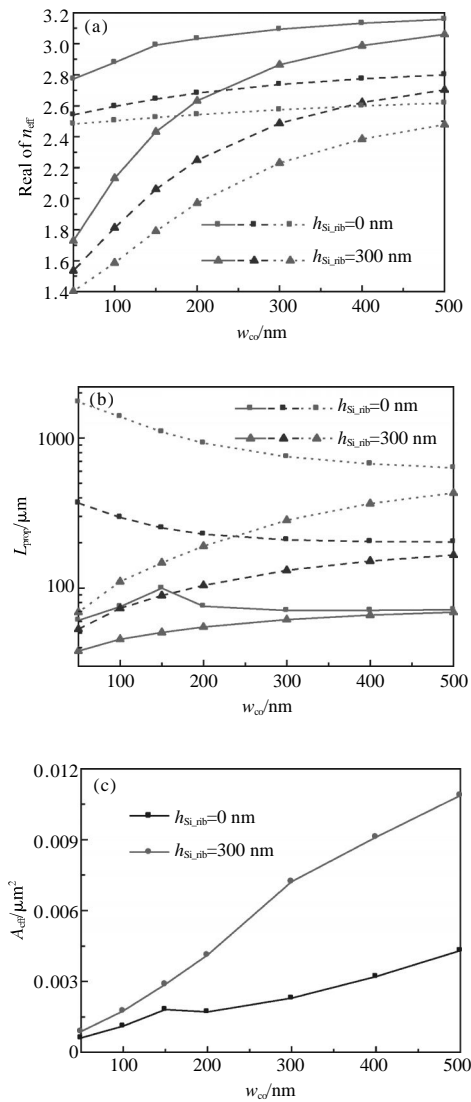


图 5 两种波导 (硅基和硅脊) 传输特性随 w_{co} 的变化曲线图
Fig.5 Transmission characteristics of two waveguide (rib and slab silicon) as the change w_{co}

图6显示了两个具有相同参数($h_{\text{Si}_{12}\text{rib}}=0, w_{\text{co}}=50\text{nm}$)且沿轴向平行排列的混合等离子体CGS波导在不同 SiO_2 层厚度 h_{SiO_2} 和不同芯间距 D 下的耦合长度。这里耦合长度的计算公式采用: $L_c=\pi/(\beta_o-\beta_e)$,其中 β_o 和 β_e 分别是平行波导中奇模和偶模的传播常数。图6中曲线表明:随两个平行波导芯间距 D 的增加,此波导的耦合长度几乎呈指数增加,这一变化趋势与传统的微波及光波导相吻合。另外,平行混合等离子体光波导的耦合长度随 SiO_2 层厚度 h_{SiO_2} 的减小而增加,尤其是当 SiO_2 层厚度为 5nm ($h_{\text{SiO}_2}=5\text{nm}$)时,两个平行混合等离子体光波导的耦合长度将超过 $100\mu\text{m}$,这一结果与参考文献[12]相吻合。

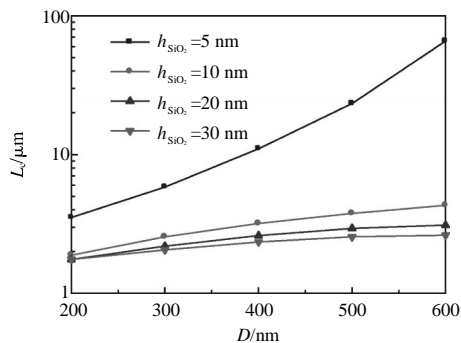


图6 两个平行且具有相同参数($h_{\text{Si}_{12}\text{rib}}=0, w_{\text{co}}=50\text{nm}$)的混合等离子体光波导在不同 SiO_2 层厚度 h_{SiO_2} 和不同距离 D 下的耦合长度
Fig.6 Coupling length of the hybrid plasma waveguide with two parallel and same parameter ($h_{\text{Si}_{12}\text{rib}}=0, w_{\text{co}}=50\text{nm}$) as the change of thickness of SiO_2 layer and distance D

图7为 $h_{\text{SiO}_2}=5\text{nm}, h_{\text{Si}_{12}\text{rib}}=0$ 时,脊宽度 w_{co} 分别为

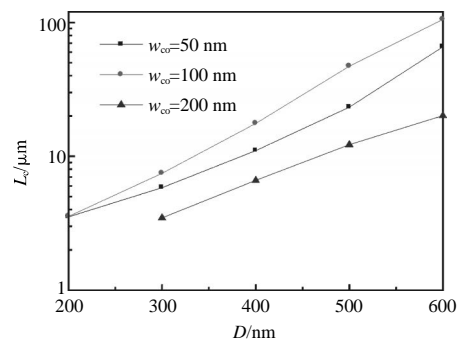


图7 两个平行且具有相同参数($h_{\text{Si}_{12}\text{rib}}=0, h_{\text{SiO}_2}=5\text{nm}$)的混合等离子体光波导在不同脊宽度 w_{co} 和距离 D 下的耦合长度
Fig.7 Coupling length of the hybrid plasma waveguide with two parallel and same parameter ($h_{\text{Si}_{12}\text{rib}}=0, w_{\text{co}}=50\text{nm}$) as the change of width of rib silicon and distance D

50 nm, 100 nm 及 200 nm 时耦合长度随芯间距 D 的变化情况,图中曲线表明:当波导脊宽度从50 nm增加到200 nm时,耦合长度呈现先增大而后减小的趋势,其中100 nm宽的波导具有最大的耦合长度。另一方面,当芯间距 D 减小到200 nm时,耦合长度也相应减小到 $3.56\mu\text{m}$,这使紧凑型定向耦合器(耦合器是光集成电路的基本元器件)的实现成为可能。

3 结论

文中研究了基于金属、二氧化硅及硅层结构的混合等离子激元波导,此波导能提供纳米级的光约束力。研究表明,当工作在 1550nm 处时,此混合等离子体光波导,能提供纳米量级(例如, $50\text{nm}\times 5\text{nm}$)的光约束力以及相对较长的传输距离(100个量级的波长)。当使用硅平板代替硅脊,不仅使得制作更加简单容易,而且在模场束缚及传输长度上更有优势。通过合理的选择结构参数可以有效提升该波导的耦合长度,减小相邻波导之间的串扰,为实现单芯片高密度集成提供了理论参考。

参考文献:

- [1] Tsuchizawa T, Yamada K, Morita H, et al. Microphotonic devices based on silicon microfabrication technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(1): 232-240.
- [2] Almeida V R, Xu Q, Lipson M, et al. Guiding and confining light in void nanostructure [J]. *Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology*, 2004, 29 (11): 1209-1211.
- [3] Thylén L, Qiu M, Anand S. Photonic crystals—A step towards integrated circuits for photonics[J]. *Chem Phys Chem*, 2004, 5(9): 1268-1283.
- [4] Goto T, Katagiri Y, Fukuda H, et al. Propagation loss measurement for surface plasmon-polariton modes at metal waveguides on semiconductor substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(6): 852-854.
- [5] Anu Chandran, Edward S Barnard, Justin S White, et al. Metal-dielectric-metal surface plasmon-polariton resonators [J]. *Phys Rev B*, 2012, 85(8): 085416.
- [6] Pile D F, Gramotnev D K. Channel plasmon-polariton in a triangular groove on a metal surface [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1069-1071.

- [7] Bozhevolnyi S 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.
- [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] Sun R, Dong P, Feng N N, et al. Horizontal single and multiple slot waveguides: optical transmission at $\lambda = 1550$ nm[J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 17967–17972.
- [10] Chen L, Shakya J, Lipson M. Subwavelength confinement in an integrated metal slot waveguide on silicon [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(14): 2133–2135.
- [11] Dai D, He S. Low-loss hybrid plasmonic waveguide with double low-index nano-slots [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (17): 17958–17966.
- [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.