文章编号　2095-1531(2014)02-0181-15

硅基混合表面等离子体纳米光波导及集成器件

管小伟,吴　昊,戴道锌*
(浙江大学 光电信息工程学系 现代光学仪器国家重点实验室
光及电磁波研究中心,浙江 杭州 310058)

摘要:总结并展望了硅基混合表面等离子体纳米光波导及集成器件方面的理论和实验研究工作。首先介绍了几种硅基混合表面等离子体纳米光波导结构,其尺寸可小至 100 nm 以下,而传播长度达 100 μm 量级;其次介绍了基于硅基混合表面等离子体纳米光波导的功分器、偏振分束器和谐振器等集成器件,其尺寸为亚微米量级;最后探讨了硅基混合表面等离子体纳米光波导与硅纳米线光波导的耦合及对其进行增益补偿。

关　键　词:光波导;集成器件;表面等离子体;硅纳米线
中图分类号:TN252; TN256　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20140702.0181

Silicon hybrid surface plasmonic nano-optics-waveguide and integration devices

GUAN Xiao-wei, WU Hao, DAI Dao-xin*
(*Center for Optical and Electromagnetic Research*, *State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation*, *Department of Optical Engineering*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *dxdai@zju.edu.cn*

Abstract: In this paper, our recent theoretical and experimental results on silicon hybrid nanoplasmonic waveguides and integrated devices are reviewed. First, we present several types of silicon hybrid nanoplasmonic waveguides, which enable the confinement of optical field within the lateral scale of 100 nm, as well as a ~ 10^2 μm propagation distance. Second, several kinds of submicron photonic integrated devices like power splitters, ultra-compact polarization beam splitters and resonators are presented by using silicon hybrid nanoplasmonic waveguides. Finally, the coupling between silicon hybrid nanoplasmonic waveguides and silicon nanowires, as well as the loss compensation of silicon hybrid nanoplasmonic waveguides with gain mediums has also been discussed.

Key words: optical waveguide; photonic integrated devices; plasmonic; silicon nanowire

收稿日期:2013-11-13;**修订日期**:2014-01-12
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(No. 2011AA010301);国家自然科学基金资助项目(No. 11374263);教育部博士点基金资助项目(No. 20120101110094)

1 引 言

实现超高集成度一直是集成光子器件领域追求的重要目标。为此,人们发展了多种纳米光波导。常见的纳米光波导有 3 种:硅纳米线光波导[1-2]、光子晶体光波导[3]、表面等离子体光波导[4-23]。其中,表面等离子体光波导因其可突破衍射极限且有望在波导结构中同时实现对电信号和光信号的处理而备受关注[19]。表面等离子体激元是外部电磁场诱导金属表面自由电子的集体共振,产生沿金属-介质界面传输的表面波,其具有亚波长局域、近场增强和新颖色散的特性,已在亚波长光子学、数据存储、激光光学等领域有着广泛的应用[17-18]。特别地,在集成光子领域,近十年来人们已经提出了一些可将光场约束于纳米尺度的表面等离子体光波导结构,如金属-介质-金属结构[14-15]、金属 V 型槽结构[15-16]。然而,这些纳米光波导传输损耗很大,即光传输距离极短(仅为几个微米量级)。这无疑在很大程度上限制了表面等离子体纳米光波导的应用范围。因此,如何构造一种具有超强光场约束能力的低损耗表面等离子体光波导成为该领域的一个难点和热点。

近年来,混合表面等离子体纳米光波导备受关注[24-44]。美国加州大学伯克利分校 X. Zhang 研究组于 2008 年提出了一种基于圆形介质纳米线的混合表面等离子体纳米光波导(在金属平板上镀一层低折射率纳米薄膜,然后将圆形介质纳米线置于平板上),实现了超强光场约束和较低损耗[24],并在实验上利用该结构实现了亚微米尺寸的激光器[25]。我们曾提出了一种带有金属帽(metal cap)的硅纳米光波导结构[26]:在方形硅纳米光波导上方有 SiO_2 薄膜以及金属薄膜。之后研究发现:当 SiO_2 厚度减小至几十纳米时,便会获得一种新型硅基混合表面等离子体纳米光波导结构,其光场主要被约束于低折射率的 SiO_2 中,实现了小于 100 nm 的光场约束能力,且传输距离达 10^2 μm 量级,比此前的表面等离子体纳米光波导提高了 1 个数量级以上[27]。

从集成光子器件的角度来看,这种平面结构的硅基混合表面等离子体纳米光波导会更适合、也更易于芯片集成,在面向光电子集成应用时更具有优势,且其制作工艺还具有“CMOS 工艺兼容性”,有望与 CMOS 微电子线路集成于同一芯片,便于大规模生产。同时,它还与当前蓬勃发展的硅光子集成相兼容,便于实现两者的无缝集成。这些无可比拟的优势无疑使得硅基混合表面等离子体纳米光波导及集成器件研究具有重要意义。

混合表面等离子体纳米光波导的机制是利用金属-介质表面等离子体效应以及高-低折射率介质界面电场不连续效应形成一种“混合模式”。研究表明:混合表面等离子体纳米光波导能获得超小弯曲(亚波长量级)[45-46],从而使亚微米量级的光子功能器件成为可能,如耦合器[47-48]、功分器[49-50]以及谐振器[51-53]。注意到硅基混合表面等离子体光波导结构具有显著的双折射效应,由此可实现超小型偏振相关器件,包括:起偏器[54-55]、偏振分束器[56-57]和偏振旋转器[58-59]等。混合表面等离子体纳米光波导在其低折射率纳米薄层中具有显著的光场增强,从而使之在非线性光学[60]和高效率光调制器[61-62]等方面也具有很好的应用前景。

此外,尽管混合表面等离子体纳米光波导已具有较低损耗,但如何进一步减小损耗从而促进其在光子集成中的应用仍备受关注。其中,引入增益介质是一种值得尝试的方法,例如,可在混合表面等离子体纳米光波导高折射率部分或低折射率部分引入增益介质(如掺铒的 SiO_2、量子点或硅纳米晶等)。

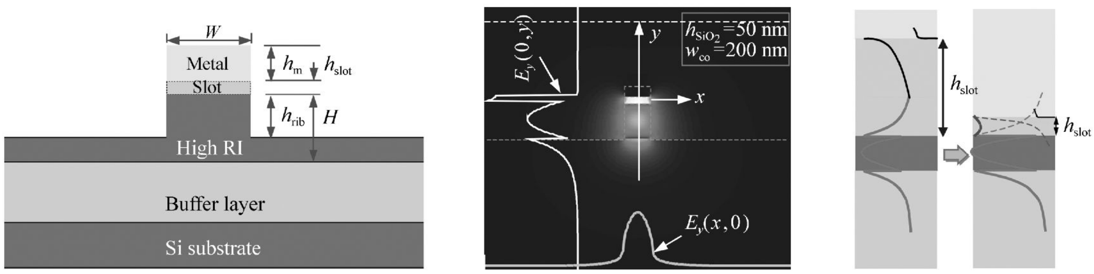
本文回顾和总结了我们近年来在硅基混合表面等离子体纳米光波导及器件方面的研究进展。首先介绍并讨论了几种硅基混合表面等离子体纳米光波导结构及其重要物理特性,包括 TM 型、TE 型硅基混合表面等离子体纳米光波导结构;然后展示了基于这些波导结构的功能器件,包括:方向耦合器、功分器、偏振分束器和谐振器等。最后探讨了硅基混合表面等离子体纳米光波导与硅纳米线光波导的耦合问题、以及如何在混合表面等离子体纳米光波导中引入增益介质对其损耗进行补

偿。

2　硅基混合表面等离子体纳米光波导结构与特性

2.1　TM 型硅基混合表面等离子体纳米光波导

图1(a)给出了一种 TM 型混合表面等离子体纳米光波导结构横截面示意图。该结构由高折射率介质层、金属层以及它们之间的低折射率介质层组成,其中低折射率介质层的厚度小于100 nm。在光通信波段,高折射率介质可选择硅或Ⅲ~Ⅴ族半导体,而低折射率介质可选择 SiO_2、Al_2O_3、SiN 或聚合物材料。考虑到 CMOS 工艺兼容性,在此选用 Si、SiO_2分别作为高折射率介质、低折射率介质,而金属材料选用银。硅、SiO_2和银的折射率分别为:3.455、1.445、0.1453 + 11.3587i[24](@ λ = 1 550 nm)。图1(b)为 λ = 1 550 nm时该纳米光波导 TM 基模 TM_0的 E_y电场分布,其结构参数为 w = 200 nm、h_m = 100 nm、h_{slot} = 50 nm、h_{rib} = H = 300 nm。从场分布图可以看出,光场在低折射率区域中存在显著的增强。其场增强机制如图1(c)所示。实际上,当 SiO_2薄膜较厚时(如 > 500 nm),该波导存在两种模式:其一是金属与 SiO_2介质界面的表面等离子体模式,该模式场强在金属-介质界面处最强,在金属和介质内部指数衰减;其二是硅纳米线光波导模式,其光场主要限制于高折射率区域(即硅芯层),由于 Si-SiO_2界面电场不连续,其电场分量 E_y在 SiO_2区域也存在增强[63]。对于 SiO_2层较厚的情况,通常激发的是第二个模式。此时金属常作为加热电极,进而对硅纳米线光波导光传输位相进行调制。而当 SiO_2层逐渐变薄至一定程度(如 < 100 nm),两种模式合成为一种模式,导致光场在 SiO_2层明显增强。这就是称其为"混合光波导"的原因。由于混合表面等离子体纳米光波导仅在单个界面上具有表面等离子体效应,金属吸收较小,因而其传输损耗较低,使得未来实现纳米尺度的混合表面等离子体集成光子器件及回路成为可能。



(a) 波导横截面示意图
(a) Cross-section of the waveguide

(b) TM_0模式主要电场分量E_y分布图
(b) Disbutions for the main electric field E_y of TM_0 mode

(c) 场增强分析图
(c) Mechanism for the field enhancement in the slot region

图1　TM 型硅基混合表面等离子体纳米光波导

Fig. 1　TM-type silicon hybrid nanoplasmonic waveguide

要实现超高集成度光子集成,光波导还需具备超强的弯曲能力。图2(a)~2(b)给出了硅基混合表面离子体纳米光波导特性随弯曲半径减小而变化的情况,分别是有效折射率 n_{eff}实部和虚部。由图2(a)可见,当弯曲半径从2 μm 减小到0.5 μm 时,等效折射率 n_{eff}实部逐渐减小,这主要是其模场分布变化所导致的。而对于其有效折射率虚部,由图2(b)可见:当弯曲半径 R 小于某值(R_0)时,其有效折射率虚部随着弯曲半径减小而显著增大;而当 $R > R_0$时,其有效折射率虚部几乎不变,此时损耗来源主要是金属吸收引起的本征损耗。当 $R < R_0$时,弯曲波导的泄露为主要损耗来源,该损耗随弯曲半径的减小迅速增大[64]。正因为这两种损耗来源的综合作用,存在一个对应于90°弯曲波导最低总损耗的最优弯曲半径 R_{opt},如图2(c)所示。例如,当波导宽度 w = 400 nm

时,最优弯曲半径 $R_{opt}\approx800$ nm。图2(d)给出了此时硅基混合表面等离子体弯曲波导基模 TM_0 的场分布 $E_y(x,y)$,可见光场仍然能够被很好地限制在波导中。应当注意的是,硅基混合表面等离子体纳米光波导尺寸很小,其制备工艺存在一定难度。例如,在实验中发现由于金属线与介质接触面积很小,其附着力较弱,因而在制作的过程中可能会发生金属脱落的问题。

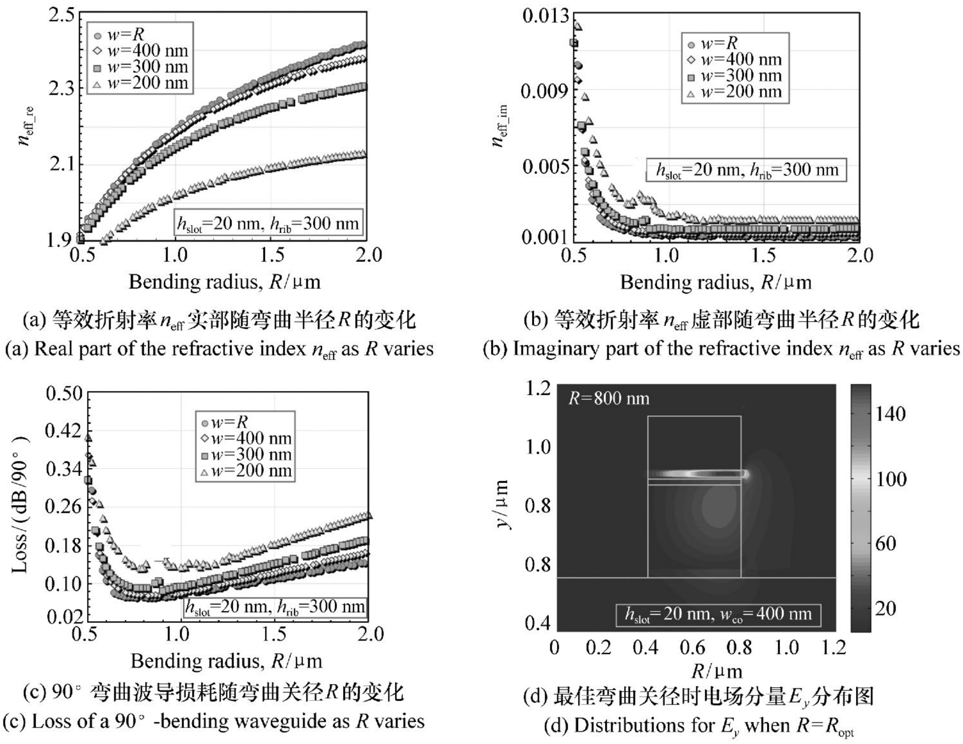


图2 硅基混合表面等离子体纳米光波导弯曲特性

Fig. 2 Bending characteristics for the TM-type silicon hybrid nanoplasmonic waveguides

图3给出了制作的硅基混合表面等离子体纳米光波导 SEM 图。由图可见,250 nm 宽的银纳米线在制作过程中有部分脱落。为了解决这一问题,提出了一种改进 TM 型硅基混合表面等离子体纳米光波导结构(如图4(a)所示),接下来对此进行介绍。

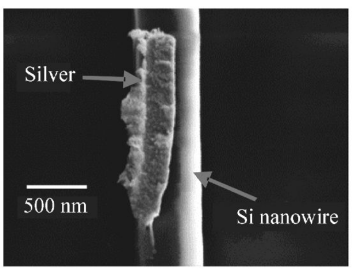
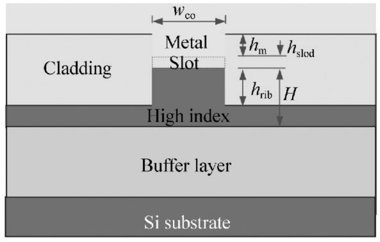


图3 制作的硅基混合表面等离子体纳米光波导 SEM 图

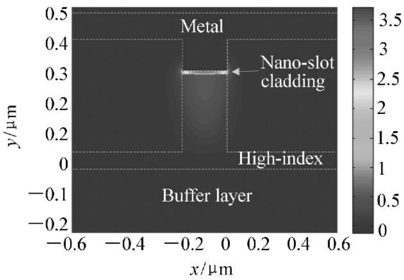
Fig. 3 SEM image of a TM-type silicon hybrid nanoplasmonic waveguide

2.2 改进 TM 型硅基混合表面等离子体纳米光波导

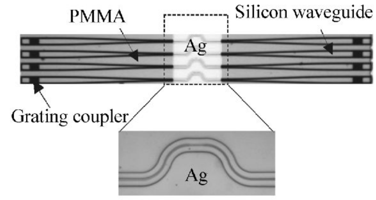
图4(a)为一种改进的硅基混合表面等离子体纳米光波导结构。在此结构中,整个波导上方均覆盖有金属薄膜,由此金属与介质的接触面积大大增加,其粘合更加牢固。图4(b)给出了基模 TM_0 的 E_y 电场分布,可以看出在 SiO_2 区域也存在显著的光场增强,与图1(b)所示光场分布相似。图4(c)给出了所制作的改进 TM 型硅基混合表面等离子体纳米光波导阵列俯视图。在硅材料与金属银薄膜之间填充的是 PMMA 材料。光波导两头包含有光栅耦合器,以便于与光纤耦合。在此实验过程中,由于金属与介质的接触面积很大,未观察到金属脱落的现象。



(a) 波导横截面示意图
(a) Cross-section of the waveguide



(b) TM_0模式主要电场分量E_y分布图
(b) Distributions of the main electric field E_y of TM_0 mode



(c) 波导阵列的显微镜图(俯视)
(c) Microscope picture for the fabricated waveguides(top view)

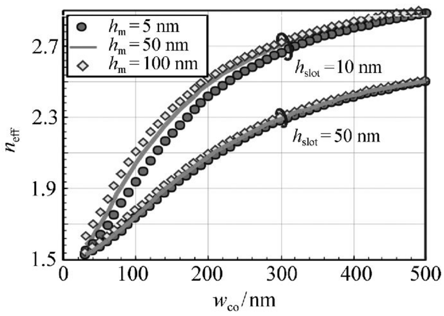
图 4　改进 TM 型硅基混合表面等离子体纳米光波导

Fig. 4　Improved TM-type silicon hybrid nanoplasmonic waveguides

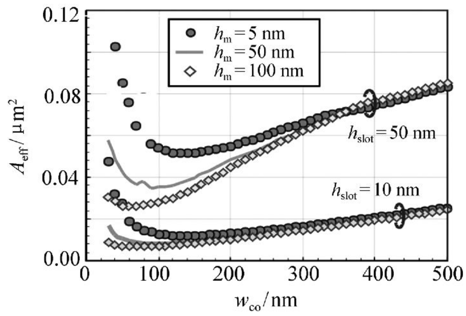
图 5(a)~(d)给出了对改进 TM 型硅基混合表面等离子体纳米光波导的进一步分析,包括其基模 TM_0模的有效折射率(n_{eff})实部、有效模式面积(A_{eff})、金属区域的功率限制因子(Γ_{metal})和模式损耗。在此,A_{eff}的定义如下[24]:

$$A_{eff} = \frac{\int_S \boldsymbol{P}(x,y)\,dx dy}{\max[\boldsymbol{P}(x,y)]}, \tag{1}$$

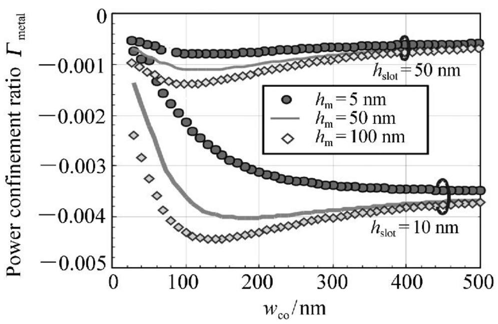
式中,$\boldsymbol{P}(x,y)$是能流密度,即坡印廷矢量,其可以表示为:$\boldsymbol{P}(x,y) = \boldsymbol{E}(x,y) \times \boldsymbol{H}(x,y)$。由图可见,



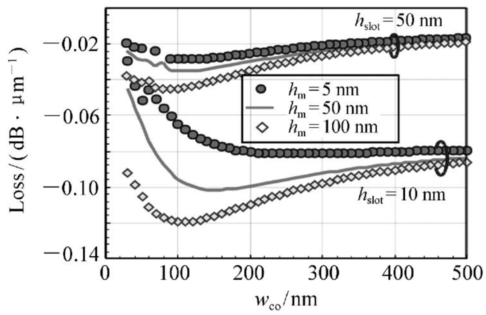
(a) 等效折射率n_{eff}实部随波导宽度w_{co}的变化
(a) Real part of the refractive index n_{eff} as w_{co} varies



(b) 有效模式面积A_{eff}随波导宽度w_{co}的变化
(b) Effective mode area A_{eff} as w_{co} varies



(c) 金属区域功率限制因子Γ_{metal}随波导宽度w_{co}的变化
(c) Power confinement ratio in the Γ_{metal} metal as w_{co} varies



(d) 波导损耗随波导宽度w_{co}的变化
(d) Waveguide loss as w_{co} varies

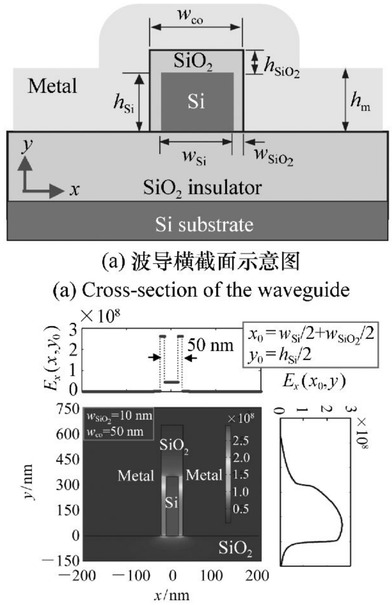
图 5　改进 TM 型硅基混合表面等离子体纳米光波导特性

Fig. 5　Characteristics of the improved TM-type silicon hybrid nanoplasmonic waveguides

其有效折射率实部随波导宽度的增大而增大，而 A_{eff} 随宽度变化出现一个极小值点。这是因为：当光波导宽度很小时（如 <50 nm），随着波导宽度的减小，改进硅基混合表面等离子体纳米光波导对光场限制变弱，更多的光场分布于低折射率包层区域，因而其 n_{eff} 实部变小、A_{eff} 变大；而当波导宽度较大时（如 >400 nm），随波导宽度的增大，更多光场被限制于高折射率的硅芯层区域，导致其 n_{eff} 变大，而 A_{eff} 也随之增大。A_{eff} 出现极小值点时对应于波导具有最好的光场约束能力，此时也正好对应于金属区域的功率限制因子 Γ_{metal} 最大、损耗最大（如图5（c）~（d）所示）。Γ_{metal} 为负值，表示波导的焦耳损耗[65]。同时，SiO_2 层厚度 h_{slot} 和金属倒脊形层的高度 h_m 对损耗也有影响，计算表明：SiO_2 层越厚、金属倒脊形层越薄，则损耗越小。但是，当 SiO_2 纳米层变厚或倒脊形层变薄后，光场的有效面积增大，波导对光场的限制能力变差。因此，在选择 SiO_2 层厚度和金属倒脊形层厚度时，可综合考虑对波导损耗和有效场面积的要求。

2.3 TE 型硅基混合表面等离子体纳米光波导

图6（a）给出了适用于 TE 偏振光的硅基混合表面等离子体纳米光波导结构示意图，它是由高折射率的硅脊形区域、顶部金属区域以及位于两者之间的低折射率 SiO_2 区域组成，其中硅脊形区域两侧的 SiO_2 区域仅为 1~100 nm 尺度。为了降低金属吸收损耗，顶部 SiO_2 层较厚（如 100 nm）。图6（b）给出了这种光波导的 TE 基模场主要电场分量 $E_x(x,y)$ 的场分布。在此例中，硅波导宽度 $w_{Si}=50$ nm、SiO_2 厚度 $w_{SiO_2}=10$ nm。由此图可见，即使波导宽度小至 50 nm，光场依然可以被很好地限制在波导中，理论计算还表明此时的传输距离大于 20 μm。从其光场分布还可以看出，硅两侧的 SiO_2 纳米薄层存在显著的光场增强，相应的有效区域面积 A_{eff} 只有 0.007 μm^2。倘若进一步减小 SiO_2 纳米薄层的厚度，可获得更小的有效区域面积。若纳米薄层采用非线性介质材料（如电光材料），则可显著增强非线性效应，实现可调控光子器件。



(b) TE 基模主要电场分量 E_x 分布图
(b) Distributions for the main electric field E_x of the TE fundamental mode

图6 TE 型硅基混合表面等离子体纳米光波导

Fig. 6 TE-type silicon hybrid nanoplasmonic waveguides

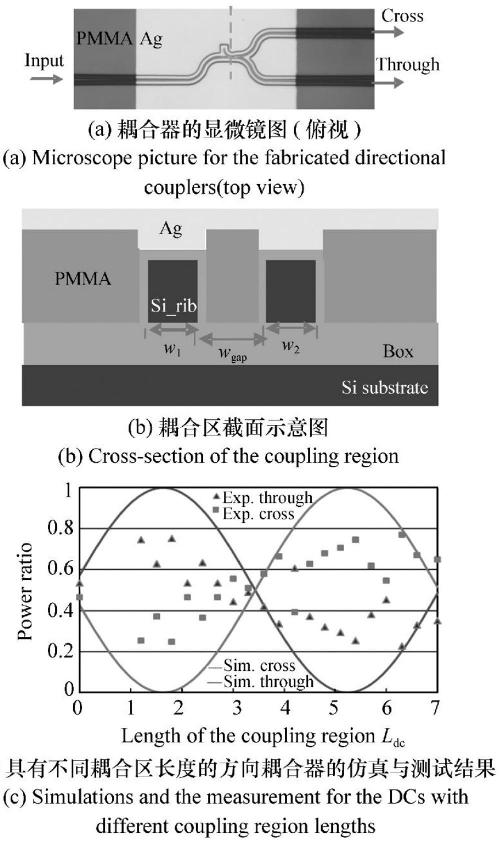
3 硅基混合表面等离子体纳米光波导集成器件

利用硅基混合表面等离子体纳米光波导结构对光场的超强限制，可以实现亚微米尺寸的耦合器、功分器、偏振分束器和谐振器等光子器件。

3.1 方向耦合器

方向耦合器是构成马赫曾德干涉仪（MZI）、微环谐振器等功能器件的基本单元。为此，采用改进 TM 型硅基混合表面等离子体纳米光波导，设计并制作了一系列具有不同耦合区长度的方向耦合器，如图7（a）耦合器显微镜照片（俯视）和图7（b）耦合区截面示意图所示。在此，方向耦合器的波导宽度为 $w_1=w_2=220$ nm、间距 $w_{gap}=170$ nm。图7（c）给出了这些方向耦合器交叉耦合端和直通端输出功率比的测试与仿真结果，可见测试与仿真吻合较好。通过选择不同耦合区长度，可获得不同的耦合比，这与传统纯介质方向耦

合器的特性相似。例如,当其耦合区长度为 3.3 μm时,则获得 3 dB 耦合器。



(a) 耦合器的显微镜图(俯视)
(a) Microscope picture for the fabricated directional couplers(top view)
(b) 耦合区截面示意图
(b) Cross-section of the coupling region
(c) 具有不同耦合区长度的方向耦合器的仿真与测试结果
(c) Simulations and the measurement for the DCs with different coupling region lengths

图 7　基于改进 TM 型硅基表面混合等离子体纳米光波导的方向耦合器(DC)

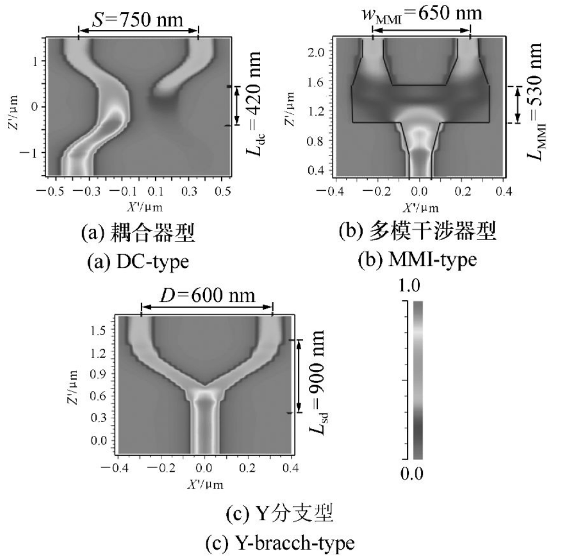
Fig. 7　Directional couplers (DCs) based on the improved TM-type silicon hybrid nanoplasmonic waveguides

3.2　功分器

功分器也是光通信应用中的基本器件之一,利用硅基混合表面等离子体纳米光波导设计了几种超小型功分器,分别基于方向耦合器、多模干涉(MMI)和 Y 分支等。对于方向耦合器形式,如上节所述,其优点是设计方便、易于通过调节耦合区长度来实现输出端功分比调节。图 8(a)给出了一个基于方向耦合器的 3 dB 功分器,器件总长度仅为 3 μm。

利用 1×2 MMI 也可实现 3 dB 功分器,如图 8(b)所示。在此,采用对称干涉结构。干涉区宽度 $w_{\mathrm{MMI}}=650$ nm,其对应的多模干涉长度 $L_{\mathrm{MMI}}=530$ nm。为了减小模式不匹配引入的损耗,输入输出部分选择引入了宽度从 100 nm 增加至 200 nm的锥形结构(其长度为 500 nm)。数值计算表明,该 1×2 MMI 功分器中心波长的传输效率达 91%(损耗主要来自于金属吸收损耗以及 MMI 部分与输出波导连接界面的反射),在 1.25~1.7 μm 波长范围内传输效率均为 80% 以上。

对称型 Y 分支也是实现 3 dB 功分器的常见形式。图 8(c)为基于硅基混合表面等离子体纳米光波导的 1×2 Y 分支结构中光场传输图,其中 S 型弯曲波导长度 $L_{\mathrm{sb}}=900$ nm、输出波导间隔 $D=600$ nm。



(a) 耦合器型
(a) DC-type
(b) 多模干涉器型
(b) MMI-type
(c) Y分支型
(c) Y-bracch-type

图 8　几种不同结构的基于硅基混合表面等离子体纳米光波导的 3 dB 功分器的光传输图(平均场)

Fig. 8　Light propagation (average) in several types of 3 dB power splitters based on silicon hybrid nanoplasmonic waveguides

从以上设计可以看出,利用硅基混合表面等离子体纳米光波导可以实现长度仅为 1~3 μm 的超小型功分器。若需更多通道,则可采用级联结构[49]。

3.3　硅基混合表面等离子体纳米光波导中的 TE 模式特性以及相关超小型偏振分束器

硅基混合表面等离子体纳米光波导结构中不仅存在 TM 模式,在波导较宽时(大于 200 nm),还会存在类似于硅纳米线波导中的 TE 模式。

图9给出了宽度均约为300 nm的硅基混合表面等离子体纳米光波导(HPW)和硅纳米线波导(NM)的TE基模和TM基模场分布图。由图可以看出,HPW中的TE模式与NW中的TE模式差别很小,而其TM模式的场主要集中的低折射率介质层。实际上,HPW中的TE模式由于几乎不受金属的影响,可以由普通的硅纳米线波导进行激发,而其传输损耗非常小,通常比TM模式的传输损耗小一个量级或更小。相比于普通硅纳米线波导,该TE模对光场并没有更强的限制,因此此处不讨论其增强效应,而只以TM模式为参考,来考察硅基混合表面等离子体纳米光波导的偏振相关性,并藉此设计超小型的偏振分束器。

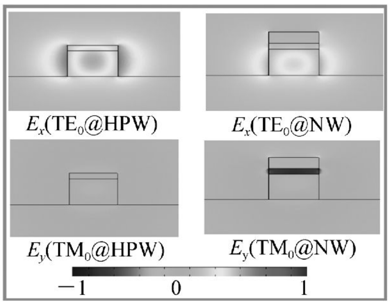
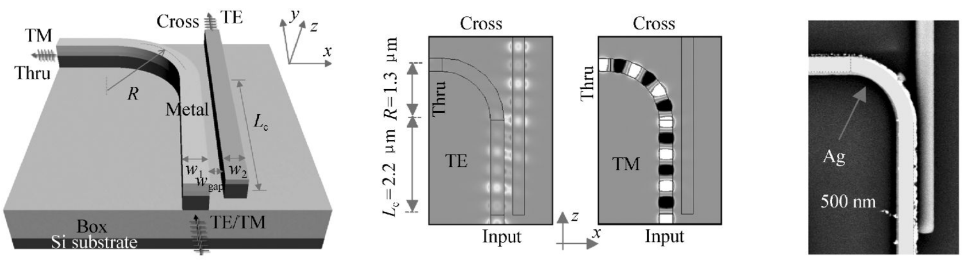


图9　硅基混合表面等离子体纳米光波导(HPW,w=310 nm)和硅纳米线波导(NW,w=280 nm)中$TM_0(E_y)$和$TE_0(E_x)$基模的主要电场分量场分布图

Fig.9　Field distributions for $TM_0(E_y)$ and $TE_0(E_x)$ fundamental modes in a silicon hybrid nanoplasmonic waveguide with width 310 nm and a silicon nanowire with width 280 nm

光子集成线路时常涉及偏振调控问题,其中偏振分束器(PBS)是最重要的器件之一。基于传统介质波导(如硅波导、磷化铟波导等)的偏振分束器(PBS)尺寸往往在数十微米量级或更大[66-69]。相比之下,采用硅基混合表面等离子体纳米光波导可获得尺寸仅为数微米的超小型PBS[70],如图10(a)所示。

这种PBS采用由硅基HPW与硅基NW组成的非对称方向耦合结构。我们注意到,硅基HPW与硅基NW两者的TM基模有效折射率差异很大,而TE模有效折射率甚为接近。因此,通过合理设计两波导的宽度(w_1=310 nm,w_2=280 nm,如图9所示),可使两者的TE基模满足相位匹配条件而TM基模存在严重的相位失配。此时,TM偏振几乎没有耦合而TE偏振可发生近乎100%的交叉耦合,从而实现两偏振光的分离。为了进一步提高消光比,在耦合区末端引入了一个基于硅基HPW的90度超小弯曲(半径R=1.3 μm)。考虑到制作工艺难度,选取较大的波导间隔(~200 nm),对应的耦合区长度L_c=2.2 μm。此时,直通端TM偏振光和交叉端TE偏振光的消光比(ER)分别为13和14 dB,TM、TE偏振的插入损耗分别为0.66和0.025 dB。图10(b)和图10(c)分别给出了TE、TM偏振光输入时优化设计的PBS的光场传输图。可见,两偏振光被有效地分离。理论分析还表明:该PBS还具有超大带宽



(a) 结构示意图
(a) Configuration of the structure

光传输图(平均场),
(b)/(c)分别为TE/TM偏振光输入
Light propagation(average), for
TE(b)/TM(c)-polarized light imput

(d) 制作的器件的
SEM图(俯视)
(d) SEM picture for the
fabricated PBS(top view)

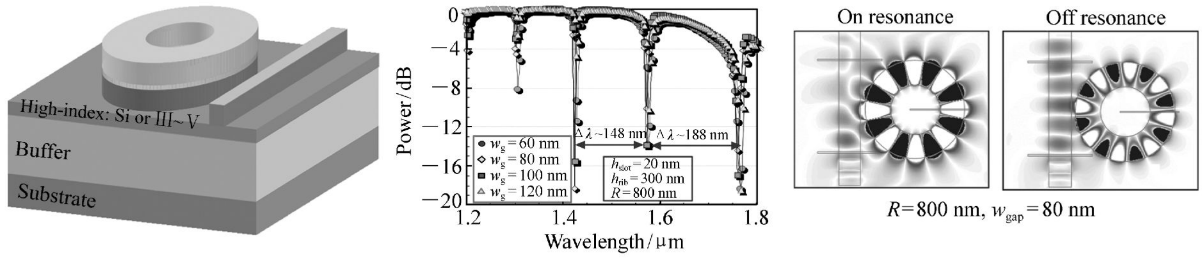
图10　基于硅基混合表面混合等离子体纳米光波导的超小型偏振分束器(PBS)

Fig.10　Proposed ultra-compact polarization beam splitter(PBS) based on silicon hybrid nanoplasmonic waveguides

(~120 nm @ ER > 10 dB)和较大的工艺容差。图 10(d)给出了所制作 PBS 的 SEM 图片。

3.4　亚微米谐振腔

光学谐振腔是光子集成线路里常用的器件,其应用范围包括光源[71]、光滤波器[72]、调制器或光开关[73]、光传感[74]以及非线性光学[75]等。利用硅基混合表面等离子体纳米光波导的超强弯曲能力,可实现亚微米谐振器[52],如图 11(a)所示。该亚微米谐振器采用了一条纯介质波导进行耦合,将介质波导及器件同混合表面等离子体波导和器件有机地结合起来,从而可通过该纯介质波导实现较长距离的光互连,且不需要额外的模式转换。图 11(b)给出了耦合间距 w_g 分别为 60、80、100 和 120 nm 时弯曲半径为 R = 800 nm 的环形谐振器的频谱响应。由于色散的存在,可以发现自由波谱范围(FSR)并不均匀,波长 1 550 nm 附近的 FSR 约为 148 nm。图 11(c)给出了该亚微米腔在谐振波长(1 423.67 nm)、非谐振波长(1 437 nm)时的电场 $E_y(x,z)$ 的分布图。可以看出,即使弯曲半径仅为 R = 800 nm,光场也可很好地被限制在谐振腔中。采用这种硅基混合表面等离子体谐振腔,还可进一步实现超小型有源混合表面等离子体光电器件。例如,通过引入高电光系数的电光聚合物[76]可以实现高效的光调制器或光开关;若引入增益介质,则可能实现亚微米尺度的激光器。



(a) 结构示意图
(a) Configuration of the structure

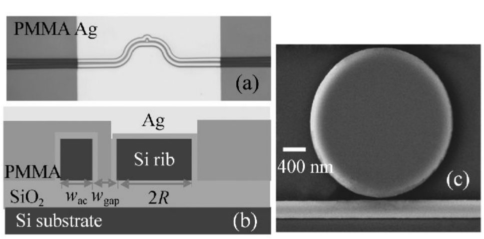
(b) 半径为800 nm的环形谐振腔的频谱
(b) Spectral for a donut resonator with R=800 nm

(c) 谐振腔在谐振和非谐振时的光传输图(平均场)
(c) Light propagation(average) for a resoator on/off resonance

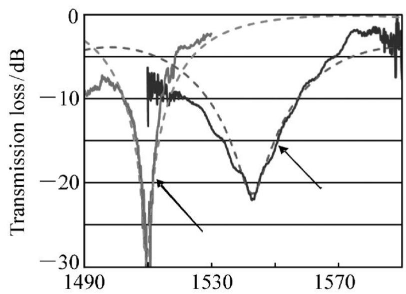
图 11　基于硅基混合表面等离子体纳米光波导的纳米环形谐振腔

Fig. 11　Nano-donut resonators based on silicon hybrid nanoplasmonic waveguides

除微环外,微盘也是构成谐振腔一种常用结构,且制作更简单。图 12(a)给出了基于改进 TM 型硅基表面混合等离子体纳米光波导的微盘谐振腔的显微镜照片(俯视图)。图 12(b)给出了该



(a) 器件显微镜照片(俯视)
(a) Microscope picture for the fabricated resonator(top view)
(b) 耦合区截面示意图
(b) Cross section of the coupling region
(c) 制作的微盘谐振腔 SEM 图(介质部分)
(c) SEM image of the micro-disk resonator(dielectric part)



(d) 微盘谐振腔的频谱(R=1350 nm, 1850 nm)
(d) Spectral responses of the micro-disks with R=1350 nm and R=1850 nm

图 12　基于硅基混合表面等离子体纳米光波导的微盘谐振腔

Fig. 12　Micro-disk resonator based on silicon hybrid nanoplasmonic waveguides

谐振腔耦合区的截面示意图,其由纯介质波导进行耦合输入和输出。图12(c)给出了所制作微盘谐振腔的SEM图片(介质部分)。分别测试了半径为1 350 nm、1 850 nm的两个微盘谐振腔的频谱(如图12(d)所示),其谐振中心波长分别为1 507.8 nm、1543.2 nm。对于R=1 350 nm的微盘谐振腔,消光比可以达到25 dB,Q值约70。

我们还考虑了基于硅基混合表面等离子体纳米光波导的微盘谐振腔的温度特性。图13是半径为1 350 nm的微盘谐振腔在不同温度时的频谱。在此,温度变化范围为30~100 ℃。由图可见,随着温度的增加,该微盘谐振波长从1 508 nm逐渐红移至1 514.8 nm,温度相关性约为0.097 nm/℃。

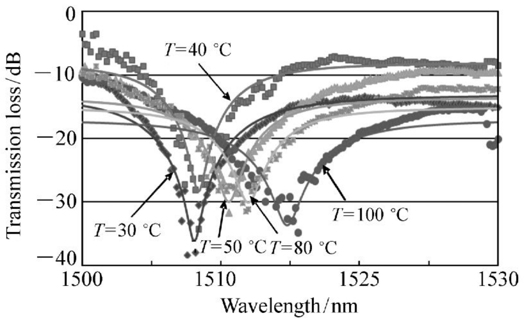


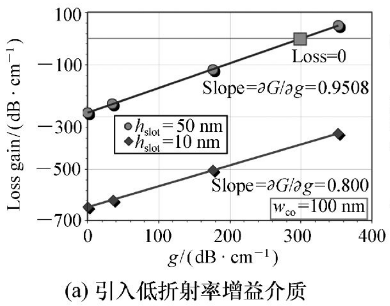
图13 不同温度下,基于硅基混合表面等离子体纳米光波导的微盘谐振腔(R=1350 nm)的频谱

Fig. 13 Spectral responses of a micro-disk (R = 1350 nm) based on silicon hybrid nanoplasmonic waveguides as the temperature varies

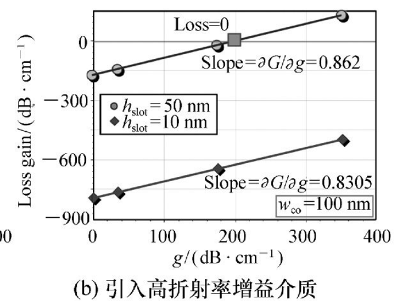
4 硅基混合表面等离子体纳米光波导在长程光互连中的应用

尽管硅基混合表面等离子体纳米光波导相比于传统金属纳米波导损耗较低,但仍难以应用于长程光互连。为了解决这一问题,可采用将其与硅纳米线光波导相结合形成混合集成:硅基混合表面等离子体纳米光波导器件作为局域元件,而硅纳米线波导作为元件之间的互联通道,从而既可利用硅纳米线的低损耗特点,又能发挥硅基混合表面等离子体纳米光波导小尺寸的优势,且这两者的工艺过程是兼容的。为此,需实现硅纳米线光波导和硅基混合表面等离子体纳米光波导间的高效率耦合。通常有两种方式:(1)端面耦合。采用很简短的模式耦合器就可以实现高达70%~80%的耦合效率[39];(2)倏逝场耦合[52]。通过调整耦合区两条波导的尺寸以满足相位匹配条件,从而其耦合效率可达近100%[77]。

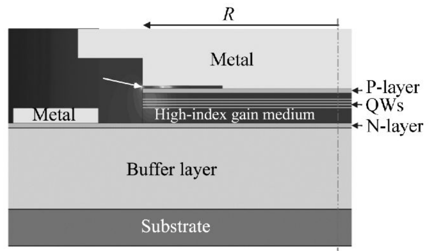
此外,还可以在等离子波导结构中引入增益介质以补偿损耗乃至于获得净增益[78-86]。正如前文所述,硅基混合表面等离子体纳米光波导自身具有较低的本征损耗,因而引入具有普通增益系数的介质即可实现对损耗的补偿。可考虑引入低折射率增益介质或高折射率增益介质两种情况。对于硅基混合表面等离子体纳米光波导,低折射率增益介质可以是硅纳晶或掺有量子点的聚



(a) 引入低折射率增益介质
(a) Introducing the low-index gain medium



(b) 引入高折射率增益介质
(b) Introducing the high-index gain medium



(c) 一种具有量子阱增益介质的混合表面等离子体纳米光波导微盘谐振腔设计
(c) A micro-disk resonator with a hybrid nanoplasmonic waveguide with quantumwells as the gain medium

图14 具有增益介质的硅基混合表面等离子体纳米光波导的损耗或增益情况

Fig. 14 Loss or gain coefficient of silicon hybrid nanoplasmonic waveguides with gain medium

合物,也可以在硅中掺入铒离子作为高折射率增益介质[87]。

图 14(a)和 14(b)分别给出了引入低折射率增益介质和高折射率增益介质后波导的损耗(正值表示增益)与介质增益系数的关系。由图可见,当低折射率增益介质的增益系数 > 300 dB/cm 时即可完全补偿波导损耗甚至获得净增益;而对于高折射率增益介质,增益系数仅需 > 200 dB/cm。这样的增益系数是比较容易实现的[82-86]。当形成净增益之后,可以进一步地实现超小型的有源器件(如放大器、激光器)。图 14(c)给出了一种具有高折射率增益介质的混合表面等离子体纳米光波导微腔,可用于实现超小型激光器。而且,利用混合表面等离子体纳米光波导自身的金属部分,有望实现电泵浦方式,并实现光信号和电信号的同时处理。这也是硅基混合表面等离子体纳米光波导结构作为一种表面等离子体光波导结构的重要潜在价值。

5　结束语

综上所述,本文综述了近年来在硅基混合表面等离子体纳米光波导与器件在理论和实验研究方面的研究进展,主要介绍了在这方面的理论和实验工作。着重介绍了 TM 型、TE 型硅基混合表面等离子体纳米光波导结构,其不但可实现纳米尺度的光场超强限制(小于 100 nm),还可获得较长传输距离(几十个波长量级)。其结构设计与制作简单、灵活性大,且与 CMOS 工艺兼容。本文也对基于硅基混合表面等离子体纳米光波导的深亚微米弯曲特性及应用进行了总结。硅基混合表面等离子体纳米光波导的超强限制和较低损耗的特性有助于实现性能良好、尺寸超小的功能器件,包括长度仅为 1 ~3 μm 的 3 dB 功分器、亚微米弯曲半径的谐振器和尺寸仅为 ~ 1.9 × 3.7 μm^2(消光比 > 13 dB、带宽 > 120 nm)的偏振分束器。总之,硅基混合表面等离子体纳米光波导具有强限制、低损耗、与 CMOS 工艺兼容、制作简单和设计灵活性强等特点,在进一步提高光子集成线路集成度及其它应用方面存在巨大的潜力。

参考文献:

[1] TSUCHIZAWA T,YAMADA K,FUKUDA H,*et al.*. Microphotonics devices based on silicon microfabrication technology[J]. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*,2005,11(1):232-240.

[2] ALMEIDA V R,XU Q,BARRIOS C A,*et al.*. Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Opt. Lett.*,2004,29(11):1209-1211.

[3] THYLEN L,QIU M,ANAND S. Photonic crystals-a step towards integrated circuits for photonics[J]. *Chemphyschem*,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]. *Appl. Phys. Lett.*,2004,84(6):852-854.

[5] CHARBONNEAU R,LAHOUD N,MATTIUSSI G,*et al.*. Demonstration of integrated optics elements based on long-ranging surface plasmon polaritons[J]. *Opt. Express*,2005,13(3):977-984.

[6] ZIA R,SELKER M D,CATRYSSE P B,*et al.*. Geometries and materials for subwavelength surface plasmon modes[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*,2004,21(12):2442-2446.

[7] KUSUNOKI F,YOTSUYA T,TAKAHARA J,*et al.*. Propagation properties of guided waves in index-guided two-dimensional optical waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2005,86(21):211101-3.

[8] PILE D F P,GRAMOTNEV D K. Plasmonic subwavelength waveguides:next to zero losses at sharp bends[J]. *Opt. Lett.*,2005,30(10):1186-1188.

[9] XIAO S S,LIU L,QIU M. Resonator channel drop filters in a plasmon-polaritons metal[J]. *Opt. Express.*,2006,14(7):2932-2937.

[10] WANG B,WANG G P. Surface plasmon polariton propagation in nanoscale metal gap waveguides[J]. *Opt. Lett.*,2004,

29(17):1992-1994.

[11] TANAKA K,TANAKA M. Simulations of nanometric optical circuits based on surface plasmon polariton gap waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*,2003,82(8):1158-1160.

[12] TANAKA K,TANAKA M,SUGIYAMA T. Simulation of practical nanometric optical circuits based on surface plasmon polariton gap waveguides[J]. *Opt. Express*,2005,13(1):256-266.

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

[14] VERONIS G,FAN S H. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2005,87(13):131102-3.

[15] PILE D F P,GRAMOTNEV D K. Channel plasmon-polariton in a triangular groove on a metal surface[J]. *Opt. Lett.*,2004,29(10):1069-1071.

[16] 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.

[17] 雷建国,刘天航,林景全,等.表面等离子体激元的若干新应用[J].中国光学与应用光学,2010,3(5):432-439.
LEI J G,LIU T H,LIN J Q,*et al.*. New application of surface plasmon polaritons[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*,2010,3(5):432-439.(in Chinese)

[18] 陈泳屹,佟存柱,秦莉,等.表面等离子体纳米激光器技术及应用研究进展[J].中国光学,2012,5(5):453-463.
CHEN Y Y,TONG C ZH,QIN L,*et al.*. Progress in surface plasmon polariton nano-laser technologies and applications [J]. *Chinese Optics*,2012,5(5):453-463.(in Chinese)

[19] ZIA R,SCHULLER J A,CHANDRAN A,*et al*. Plasmonics:the next chip-scale technology[J]. *Materials Today*,2006,9(7):20-27.

[20] GUO X,MA Y,WANG Y,*et al.*. Nanowire plasmonic waveguides, circuits and devices[J]. *Laser Photonics Reviews*,2013,6(7):855-881.

[21] WANG W,YANG Q,FAN F,*et al.*. Light propagation in curved silver nanowire plasmonic waveguides[J]. *Nano Lett.*,2011,11(4):1603-1608.

[22] LUO H,LI Y,CUI H,*et al.*. Dielectric-loaded surface plasmon-polariton nanowaveguides fabricated by two-photon polymerization[J]. *Appl. Phys. A.*,2009,97(3):709-712.

[23] GUO X,QIU M,BAO J,*et al.*. Direct coupling of plasmonic and photonic nanowires for hybrid nanophotonic components and circuits[J]. *Nano Lett.*,2009,9(12):4515-4519.

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

[25] OULTON R F,SORGER V J,ZENTGRAF T,*et al.*. Plasmon lasers at deep subwavelength scale[J]. *Nature*,2009,461(7264):629-632.

[26] DAI D ,YANG L,HE S. Ultrasmall thermally tunable microring resonator with a submicrometer heater on Si nanowires [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*,2008,26(6):704-709.

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

[28] FUJII M,LEUTHOLD J,FREUDE W. Dispersion relation and loss of subwavelength confined mode of metal-dielectric-gap optical waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*,2009,21(6):362-364.

[29] ALAM M Z,MEIER J,AITCHISON J S,*et al.*. Super mode propagation in low index medium[C]. Photonic Applications Systems Technologies Conference. Optical Society of America,2007.

[30] 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]. *Opt. Express*,2010,18(12):12971- 12979.

[31] WANG Z,DAI D,SHI Y,*et al.*. Experimental realization of a low-loss nano-scale Si hybrid plasmonic waveguide[C]. Optical Fiber Communication Conference,OSA Technical Digest(CD),Optical Society of America,2011.

[32] ZHU S,LO G Q,KWONG D L. Experimental demonstration of vertical Cu-SiO2-Si hybrid plasmonic waveguide components on an SOI platform[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2012,24(14):1224-1226.

[33] KIM J T,JU J J,PARK S,*et al*.. Hybrid plasmonic waveguide for low-loss lightwave guiding[J]. *Opt. Express*,18,2010,18(3):2808-2813.

[34] HUANG Q,BAO F,HE S. Nonlocal effects in a hybrid plasmonic waveguide for nanoscale confinement[J]. *Optics Express*,2013,21(2):1430-1439.

[35] DAI D,HE S. Low-loss hybrid plasmonic waveguide with double low-index nano-slots[J]. *Opt. Express*,2010,18(17):7958 16653.

[36] KWON M S. Metal-insulator-silicon-insulator-metal waveguides compatible with standard CMOS technology[J]. *Opt. Express*,2011,19(9):8379-8393.

[37] GOYKHMAN I, DESIATOV B, LEVY U. Experimental demonstration of locally oxidized hybrid silicon-plasmonic waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett*.,2010,97(14):141106-3.

[38] KIM J T,JU J J,PARK S,*et al*.. Hybrid plasmonic waveguide for low-loss lightwave guiding[J]. Opt. Express,2010,18(3):2808-2813.

[39] SONG Y,WANG J,LI Q,*et al*.. Broadband coupler between silicon waveguide and hybrid plasmonic waveguide[J]. *Opt. Express*,2010,18(12):13173-13179.

[40] 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]. *Opt. Express*,2010,18(18):18945-18959.

[41] 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.

[42] CHEN L,LI X,WANG G. A hybrid long-range plasmonic waveguide with sub-wavelength confinement[J]. *Opt. Communications*,2013,291:400-404.

[43] CHU H,LI E,BAI P,*et al*.. Optical performance of single-mode hybrid dielectric-loaded plasmonic waveguide-based components[J]. *Appl. Phys. Lett*.,2010,96(22):221103-3.

[44] 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]. *Opt. Express*,2011,19(23):22417-22422.

[45] WU M,HAN Z,VAN V. Conductor-gap-silicon plasmonic waveguides and passive components at subwavelength scale[J]. *Opt. Express*,2010,18(11):11729-11737.

[46] ZHU S,LO G Q,KWONG D L. Components for silicon plasmonic nanocircuits based on horizontal Cu-SiO_2-Si-SiO_2-Cu nanoplasmonic waveguides[J]. *Optics Express*,2012,20(6):5867-5881.

[47] LOU F,WANG Z,DAI D,*et al*.. Experimental demonstration of ultra-compact directional couplers based on silicon hybrid plasmonic waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett*.,2012,100(24):241105-4.

[48] GUAN X,CHEN P,WANG X,*et al*.. Ultrasmall directional coupler and disk-resonantor based on nano-scale silicon hybrid plasmonic waveguides[C]. Asia Communications and Photonics Conference,OSA Technical Digest(online),Optical Society of America,2012.

[49] WANG J,GUAN X,HE Y,*et al*.. Sub-μm2 power splitters by using silicon hybrid plasmonic waveguides[J]. *Opt. Express*,2011,19 (2):838-847.

[50] SONG Y,WANG J,YAN M,*et al*.. Efficient coupling between dielectric and hybrid plasmonic waveguides by multimode interference power splitter[J]. *J. Optics*,2011,13(7):075002.

[51] SONG Y,WANG J,YAN M,*et al*.. Subwavelength hybrid plasmonic nanodisk with high Q factor and Purcell factor[J]. *J. Opt*.,2011,13(7):075001.

[52] DAI D,SHI Y,HE S,*et al*.. Silicon hybrid plasmonic submicron-donut resonator with pure dielectric access waveguides[J]. *Opt. Express*,2011,19(24):23671-23682.

[53] ZHU S,LO G Q,KWONG D L. Performance of ultracompact copper-capped silicon hybrid plasmonic waveguide-ring resonators at telecom wavelengths[J]. *Optics Express*,2012,20(14):15232-15246.

[54] ALAM M Z, AITCHISON J S, MOJAHEDI M. Compact and silicon-on-insulator-compatible hybrid plasmonic TE-pass polarizer[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(1): 55-57.

[55] SUN X, ALAM M Z, WAGNER S J, *et al.*. Experimental demonstration of a hybrid plasmonic transverse electric pass polarizer for a silicon-on-insulator platform[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(23): 4814-4816.

[56] CHEE J, ZHU S, LO G Q. CMOS compatible polarization splitter using hybrid plasmonic waveguide[J]. *Opt. Express*, 2012, 20(23): 25345-25355.

[57] LOU F, DAI D, WOSINSKI L. Ultracompact polarization beam splitter based on a dielectric hybrid plasmonic dielectric coupler[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(16): 3372-3374.

[58] CASPERS J N, ALAM M Z, MOJAHEDI M. Compact hybrid plasmonic polarization rotator[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(22): 4615-4617.

[59] GUO L, HUO Y, HARRIS S J, *et al.*. Ultra-compact and low-loss polarization rotator based on asymmetric hybrid plasmonic waveguide[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2013, 25(21): 2081-2084.

[60] ZHOU G, WANG T, PAN C, *et al.*. Design of plasmon waveguide with strong field confinement and low loss for nonlinearity enhancement[C]. Group IV Photonics(GFP), 2010 7th IEEE International Conference on, Beijing. IEEE, 2010: 69-71.

[61] SUN X, ZHOU L, LI X, *et al.*. Design and analysis of a phase modulator based on a metal polymer silicon hybrid plasmonic waveguide[J]. *Appl. Optics*, 2011, 50(20): 3428-3434.

[62] ZHU S, LO G Q, KWONG D L. Theoretical investigation of silicon MOS-type plasmonic slot waveguide based MZI modulators[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(26): 27802-27819.

[63] SUN R, DONG P, FENG N N, *et al.*. Horizontal single and multiple slot waveguides: optical transmission at lambda = 1550 nm[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(26): 17967-17972.

[64] SHENG Z, DAI D, HE S. Comparative study of losses in ultrasharp silicon-on-insulator nanowire bends[J]. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE J.*, 2009, 15(5): 1406-1412.

[65] TOURNOISA P, LAUDE V. Negative group velocities in metal-film optical waveguides[J]. *Optics Communications*, 1997, 137(1): 41-45.

[66] HONG J M, RYU H H, PARK S R, *et al.*. Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, 15(1): 72 74.

[67] YAMAZAKI T, AONO H, YAMAUCHI J, *et al.*. Coupled waveguide polarization splitter with slightly different core widths[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, 26(21): 3528 3533.

[68] AUGUSTIN L M, HANFOUG R, VAN DER TOL J J G M, *et al.*. A compact integrated polarization splitter/converter in InGaAsP-InP[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, 19(17): 1286-1288.

[69] AO X, LIU L, LECH W, *et al.*. Polarization beam splitter based on a two-dimensional photonic crystal of pillar type[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(17): 171115-3.

[70] GUAN X, WU H, SHI Y, *et al.*. Ultracompact and broadband polarization beam splitter utilizing the evanescent coupling between a hybrid plasmonic waveguide and a silicon nanowire[J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(16): 3005-3008.

[71] LIANG D, FIORENTINO M, OKUMURA T, *et al.*. Electrically-pumped compact hybrid silicon microring lasers for optical interconnects[J]. *Opt. Express*, 2009, 17: 20355-20364.

[72] DONG P, FENG N N, FENG D, *et al.*. GHz-bandwidth optical filters based on high-order silicon ring resonators[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(23): 23784-23789.

[73] XU Q, SCHMIDT B, PRADHAN S, *et al.*. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 325-327.

[74] WANG J, DAI D. Highly sensitive Si nanowire-based optical sensor using a Mach-Zehnder interferometer coupled microring[J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(24): 4229-4231.

[75] DEKKER R, USECHAK N, FORST M, *et al.*. Ultrafast nonlinear all-optical processes in silicon-on-insulator waveguides[J]. *J. Phys. D: Applied Physics*, 2007, 40(14): R249-R271.

[76] WANG X,LIN C Y,CHAKRAVARTY S,*et al*.. Effective in-device r33 of 735 pm/V on electro-optic polymer infiltrated silicon photonic crystal slot waveguides[J]. *Opt. Lett.*,2011,36(6):882-884.

[77] LI Q,SONG Y,ZHOU G,*et al*.. Asymmetric plasmonic-dielectric coupler with short coupling length, high extinction ratio, and low insertion loss[J]. *Opt. Lett.*,2010,35(19):3153-3155.

[78] DE LEON I,BERINI P. Amplification of long-range surface plasmons by a dipolar gain medium[J]. *Nature Photon.*, 2010,4(6):382-387.

[79] NOGINOV M A,ZHU G,MAYY M,*et al*.. Stimulated emission of surface plasmon polaritons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008,101(22):226806-4.

[80] AMBATI M,NAM S H,ULIN-AVILA E,*et al*.. Observation of stimulated emission of surface plasmon polaritons[J]. *Nano Lett.*,2008,8(11):3998-4001.

[81] VAN DEN HOVEN G N,KOPER R J I M,POLMAN A,*et al*.. Net optical gain at 1. 53 mm in Er-doped Al_2O_3 waveguides on silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*,1996,68(14):1886-1888.

[82] GRANDIDIER J,DES FRANCS G C,MASSENOT S,*et al*.. Gain-assisted propagation in a plasmonic waveguide at telecom wavelength[J]. *Nano Letters*,2009,9(8):2935-2939.

[83] NEZHAD M P,TETZ K,FAINMAN Y. Gain assisted propagation of surface plasmon polaritons on planar metallic waveguides[J]. *Opt. Express*,2004,12(17):4072-4079.

[84] GENOV D A,AMBATI M,ZHANG X. Surface plasmon amplification in planar metal films[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*,2007,43(11):1104-1108.

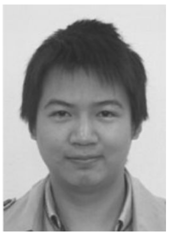
[85] ALAM M Z,MEIER J,AITCHISON J S,*et al*.. Gain assisted surface plasmon polariton in quantum wells structures[J]. *Opt. Express*,2007,15(1):176-182.

[86] PLUM E,FEDOTOV V A,KUO P,*et al*.. Towards the lasing spaser: controlling metamaterial optical response with semiconductor quantum dots[J]. *Opt. Express*,2009,17(10):8548-8551.

[87] DAI D,SHI Y,HE S,*et al*.. Gain enhancement in a Si hybrid plasmonic nano-waveguide with a low-index or high-index gain medium[J]. *Opt. Express*,2011,19(14):12925-12936.

作者简介:

管小伟(1988—),男,河南新蔡人,博士研究生,2009 年于东南大学获得学士学位,主要从事硅纳米线波导和硅基混合表面等离子体纳米光波导及集成器件等方面的研究。E-mail: guanxiaowei@coer. zju. edu. cn



吴　昊(1990—),男,江苏常州人,博士研究生,2013 年于浙江大学获得学士学位,主要从事硅基混合表面等离子体纳米光波导和集成器件的研究。E-mail: wuhao@ coer-zju. org

戴道锌(1979—),男,江西吉安人,博士,教授,博士生导师,2000 年、2005 年于浙江大学分别获得学士、博士学位,主要从事硅基集成光子器件及应用的研究。E-mail:dxdai@ zju. edu. cn