

脊背型介质加载表面等离子体波导传输特性研究

郑洪全¹, 宁海春²

- (1. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 大连民族大学 信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116600)

摘要: 为降低传输过程中的损耗, 加强介质加载等离子体波导的模式场约束, 并且优化等离子体波导的传输性能, 对基于介质加载的表面等离子体波导的传输特性做了进一步的研究, 设计了一种脊背型介质加载等离子体波导, 并对其模式场分布及其传输参数随波导中的几何参数与电磁参数的变化关系做了相应的研究。仿真结果得出: 基模的电场分量主要分布在该结构的金属/介质层 1 界面。该模式的传输特性, 随着该波导的几何参数的变化而发生相应改变, 因而可以通过改变这种结构的几何参数, 对场实现有效控制, 使其局域性明显增强。

关键词: 等离子体波导; 传输特性; 局域性

中图分类号: O531 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1020005

Research on waveguide transmission characteristics of spine type medium load surface plasmon

Zheng Hongquan¹, Ning Haichun²

- (1. School of Measurement and Control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. School of Information and Communication Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China)

Abstract: In order to reduce the transmission loss, strengthen the medium loaded plasma waveguide mode field constraint and optimize the plasma waveguide transmission performance, a further research on waveguide transmission characteristics of the dielectric loaded surface plasmon was studied. A waveguide with spine type medium load plasma was designed and the relationship between the geometric parameters and the geometrical parameters of the waveguide in the mode field distribution and its transmission parameters were studied. The simulation results show that the electric field component of the base mode is mainly distributed in the metal/dielectric layer 1 interface. As a result, the transmission characteristic of the model changes with the variations of the geometrical parameters of waveguide. Hence, the field can be effectively controlled by shifting the geometrical parameters of the waveguide and localization can be enhanced obviously.

Key words: plasma waveguide; transmission characteristics; locality

收稿日期: 2016-02-11; 修订日期: 2016-03-20

作者简介: 郑洪全(1990-), 男, 硕士生, 主要从事非线性光学方面的研究。Email: zhenghongquan0257@126.com

导师简介: 于晓洋(1962-), 男, 教授, 主要从事数字图像处理方面的研究。

0 引言

在微纳米光电子集成领域, 实现纳米尺度的光波导成为研究的趋势。在各种纳米光子波导中, 表面等离子体(SPPs)波导引起了学者的广泛关注。基于表面等离子体的光子器件能够突破传统光子器件存在的衍射极限的限制, 为进一步将光子和电子的优势结合在一起并在芯片上集成应用提供了可能^[1-2]。等离子体波导及其相关器件在微纳米光电子集成领域拥有巨大的潜力^[3-4], 近些年, 出现了几种等离子体波导结构, 如: 金属条与金属纳米圆柱波导^[5-6], 耦合纳米圆柱波导^[7-8], 金属-V型波导^[9], 金属-介质-金属波导等。然而, 这些波导结构中所存在的传播损耗, 场限制和物理尺寸等问题影响了波导的传输性能。

为了实现较长的传播距离并提高波导的模式限制, 近些年来, 混合表面等离子体波导的研究获得了越来越多的关注^[10-11]。这些混合等离子体波导对深亚波长尺度的光集成有很大的影响, 尤其是介质加载混合等离子体波导, 这是因为该波导存在介质折射率差, 它使得金属/质界面的 SPPs 波局域化加强, 使其具有亚波长场限制下的低损耗^[12-13]。2007 年曾有报道 Holmgaard 等人验证了介质加载等离子体波导具有很好的横向模式场限制和侧向模式场限制, 并且具有较长的传播距离^[14]。2009 年东南大学则指出在金属条的另一边同样放置一个高折射率介质层形成对称的介质加载等离子体波导可以显著提高波导的传输性能, 但是模式尺寸相对较大^[15]。2010 年 Chu 等人提出了一种双层介质加载混合等离子体波导, 结果表明, 这种波导结构可以实现强烈的场限制以及相对较长的传播距离, 但是仍然存在着很严重的传输损耗问题^[16]。

为了降低传输过程中的损耗, 同时加强介质加载等离子体波导的模式场的约束, 进一步优化等离子体波导的传输性能, 文中对这种基于介质加载的表面等离子体波导的传输特性做了进一步的研究。文中设计了一种脊背型介质加载等离子体波导, 并对其模式场分布, 及其传输参数随波导中的几何参数与电磁参数的变化关系做了相应的研究。

1 介质加载型表面等离子体波导结构

1.1 理论分析

图 1 为介质加载型表面等离子体波导结构示意图。

建立该等离子体波导在 TM 模式下的电磁场物理模型^[14]: 设 H_{xi}, E_{yi}, E_{zi} 分别为该结构中第 i 层的电场和磁场, 由于 SPPs 为 TM 偏振波, 则应满足下式:



图 1 y - z 平面上的介质加载型表面等离子体波导结构

Fig.1 Surface plasmon waveguide structure of y - z type medium loaded on the plane

$$\frac{d^2 H_{xi}(y)}{dy^2} + k_{yi}^2 H_{xi}(y) = 0 \quad (1)$$

$$E_{zi}(y) = -\frac{j}{\omega \epsilon_i} \frac{dH_{xi}(y)}{dy} \quad (2)$$

$$E_{yi}(y) = \frac{k_{yi}}{\omega \epsilon_i} H_{xi}(y) \quad (3)$$

其中, 横向波矢 k_{yi} 与纵向波矢 β 满足:

$$k_{yi} = \pm \sqrt{k_0^2 \epsilon_i - \beta^2}, \quad i=1, 2, 3 \quad (4)$$

根据切向场连续的边界条件, 上边界切向场 (H_{xs}, E_{zs}) 和下边界切向场 (H_{xc}, E_{zc}) 可通过传输矩阵 M_i 联系起来:

$$\begin{bmatrix} H_{xs} \\ \frac{dH_{xs}}{\epsilon_s dy} \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^3 M_i \begin{bmatrix} H_{xc} \\ \frac{dH_{xc}}{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{xc} \\ \frac{dH_{xc}}{\epsilon_c dy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(k_{yi} h_i) & -\frac{\epsilon_i}{k_{yi}} \sin(k_{yi} h_i) \\ \frac{k_{yi}}{\epsilon_i} \sin(k_{yi} h_i) & \cos(k_{yi} h_i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

进而可以得到色散方程:

$$F(\beta) = \frac{k_{ys}}{\epsilon_s} m_{11} + \frac{k_{yc}}{\epsilon_c} m_{22} - m_{21} - \frac{k_{ys} k_{yc}}{\epsilon_s \epsilon_c} m_{22} = 0 \quad (7)$$

式中: $k_{yc} = \pm \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_c}$, $k_{ys} = \pm \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_s}$ 。

1.2 波导材料的选择

目前不断有新型材料被研发生产, 其中用于集成光学的材料种类繁多, 包括 $\text{SiO}_2, \text{Si}, \text{LiNbO}_3, \text{GaAs}, \text{InP}$ 以及有机高分子材料等, 这些材料都具有其独特之处, 这就成就了集成电子器件的多样化。

在选择光波导材料时, 主要考虑该材料的损耗

问题, 优先选择损耗较低的材料。通常要求光波导的传输损耗小于 1 dB/cm。在工艺方面, 还要具备便于成膜, 刻蚀等制作等特点。综合考虑, 文中所选择的介质材料为 SiO₂ 和 Si。SiO₂ 材料是最早被广泛应用的光波导材料之一。该材料折射率用如下公式表示:

$$n = \sqrt{1 + \sum_{j=1}^3 \frac{\lambda^2 B_j}{\lambda^2 - \lambda_j^2}} \quad (8)$$

式中: $B_1=0.696\ 163\ 3$, $B_2=0.407\ 942\ 6$, $B_3=0.897\ 499\ 4$, $\lambda_1^2=0.004\ 679\ 148\ \mu\text{m}^2$, $\lambda_2^2=0.013\ 512\ 068\ \mu\text{m}^2$, $\lambda_3^2=97.934\ 002\ \mu\text{m}^2$ 。在光通信波长为 1 550 nm 时, 其折射率约为 1.445。同样 Si 材料也是一种广泛应用集成电路的材料。Si 优越的性能以及与 CMOS 集成电路工艺的兼容, 将降低光子集成器件的成本。基于此, 其得到了广泛的研究和应用。下式为硅折射率与波长的关系:

$$n_s = n_0 + \frac{A_1}{\lambda^2 - \Lambda_1} + \frac{A_2}{(\lambda^2 - \Lambda_1)^2} + A_3 \lambda^2 + A_4 \lambda^4 + (T - T_0) \frac{dn}{dT} \quad (9)$$

式中: $n_0=3.416\ 96$, $A_1=0.138\ 496$, $A_2=0.013\ 924$, $A_3=-2.09 \times 10^{-5}$, $A_4=1.48 \times 10^{-7}$, $\Lambda_1=0.028$, $T_0=293\ \text{K}$, $dn/dT=1.5 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$ 。在光通信波长为 1 550 nm 时, 其折射率为 3.45。

表面等离子体波导的金属材料为色散介质, 其介电常数并不是固定值。当光频率改变时, 介电常数随之发生变化。因此进行表面波导的研究过程中, 选择适当的色散模型是十分必要的。针对微纳米光学结构, 一般选用 Lorentz-Drude 模型。其表达式为:

$$\varepsilon_r = \varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega\gamma} \quad (10)$$

此次所设计的波导选用的金属材料为银, 则当入射波长为 1 550 nm 时, 其介电常数为: $\varepsilon_{Ag} = -126 + 2.9i$ 。

1.3 COMSOL Multiphysics 参数设置

文中选用的 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件, 是基于有限元算法而研发生产的一款多功能软件。使用 COMSOL 软件进行基本参数设置时, 根据需要首先建立模型, 文中所设计的波导结构为二维结构, 因而, 在空间维度节点中选取二维结构; 在物理场的选择节点中, 选取电磁波; 在电磁波模块的求解类型中选取模式分析功能。

模型设计的参数选择: 此次设计的模型为三层波导结构。在仿真过程中, 利用三个矩形结构来代替

三层波导中的三层结构模型。矩形的水平长度代表波导的传播长度, 矩形的垂直宽度表示波导的厚度。其中文中设计的波导结构的银的厚度为 100 nm, 介质 1 的厚度为 50 nm, 介质 2 的厚度为 150 nm。

材料节点的参数选择: 主要是对 Ag 和空气设置介电常数。银的介电常数 $\varepsilon_{Ag} = -126 + 2.9i$ 在求解节点中, 设置波导的入射光波长, 在此例中入射光波波长为 $\lambda = 1\ 550\ \text{nm}$ 。该软件在求解的过程中, 会将解出的每个模式转换成其在波导结构中的有效折射率。

建模节点完成以后, 对波导模型进行计算仿真, COMSOL 软件的仿真结果以图形或者图表的形式显示出来, 利用色彩的变化表现场的分布。

1.4 场分布

当介质为不同组合时, 其基模的归一化电场分布如图 2 所示。通过图 2, 可以观察到传统介质加载型表面等离子体波导结构中, 介质为不同组合时, 基模的电场强度的分布情况。其中 2(a) 和 2(b) 分别显示的是介质 1 和介质 2 均为 SiO₂ 和 Si 时的电场的分布图。从这两幅图中可以看出, 当介质 1 与介质 2 为同一种材料时, 电场的集中程度差, 表面等离子体的局域性较差。图 2(c) 描述的是介质 1 为 Si, 介质 2 为 SiO₂ 条件下的基模电场的分布状态图, 可以看出光波大部分能量分布在介质 2 区域, 介质 1 区域分布较少。图 2(d) 描述的是介质 1 为 SiO₂, 介质 2 为 Si 情况下的电场分布图。此种情况下的表面等离子体局域性较好, 但并不理想, 进而对该结构进行改进。将对改进的结构-脊柱混合介质表面等离子体波导进行进一步分析。

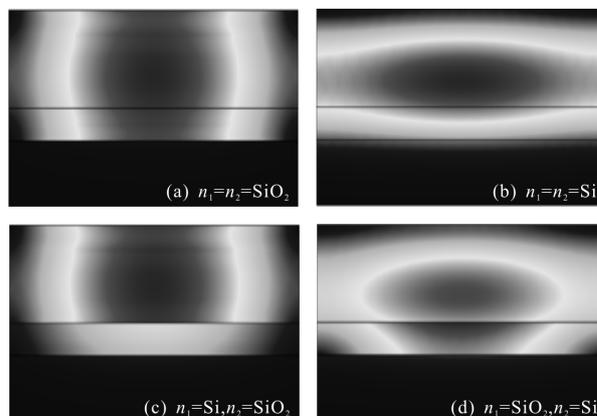


图 2 介质组合不同时的电场分布情况

Fig.2 Electric field distribution when the medium has different combination

2 脊背型介质加载表面等离子体波导模型设计

如图 3 所示为脊背型介质加载型表面等离子体结构,介质 1(SiO₂)和介质 2(Si)的高度分别为 d 和 t ,介

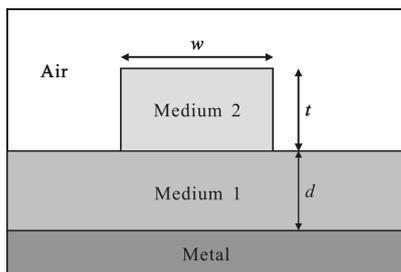


图 3 脊背型介质加载型表面等离子体结构示意图

Fig.3 Surface plasma structure diagram of spine type medium load

质 2 的宽度为 w ,其中介质 1 的折射率表示为 n_1 ,介质 2 的折射率表示为 n_2 。将理论模型应用于该结构,即可得到该结构的色散方程为:

$$\tan\left(k_H t - \tan^{-1}\left(\frac{\varepsilon_C k_H}{\varepsilon_H \gamma_C}\right)\right) = \frac{\varepsilon_H \gamma_L}{\varepsilon_L \gamma_H} \cdot \left(\frac{\varepsilon_M \gamma_L + \varepsilon_L \gamma_M - (\varepsilon_M \gamma_L + \varepsilon_L \gamma_M)e^{(-2\gamma_L d)}}{\varepsilon_M \gamma_L + \varepsilon_L \gamma_M + (\varepsilon_M \gamma_L + \varepsilon_L \gamma_M)e^{(-2\gamma_L d)}}\right) \quad (11)$$

式中:传播常数为 $\beta = \beta_r + j\beta_i$ 。其可以表示为:

$$\beta^2 = \beta_r^2 - \beta_i^2 = \varepsilon_H k_0^2 - k_H^2 = \varepsilon_L k_0^2 + \gamma_L^2 = \varepsilon_C k_0^2 + \gamma_C^2 = \varepsilon_M k_0^2 + \gamma_M^2 \quad (12)$$

式中: ε_L 和 ε_H 分别为介质 1 和介质 2 的介电常数; ε_M 为金属的介电常数; $\gamma_L, \gamma_M, \gamma_C$ 为金属中的衰减系数。所选用的 COMSOL 软件可以在求解波导结构的过程中,直接算得该结构的传播常数,从而得到该模式下有效折射率 $N_{\text{eff}} = \beta_r/k_0$ 和传播长度 $L_{\text{prop}} = 1/2\beta_i$ 。

3 脊背型介质加载表面等离子体波导传输特性分析

文中的重点内容为讨论波导的几何参数,对于电磁场能量分布的影响,从而有针对性地调整波导结构,有效提高波导的传输距离,降低损耗。有效折射率和传播距离常常被用来衡量波导传输性能。针对文中所设计的波导结构,选择 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 的入射波,分析波导几何参数对于基模的电场分布的影响,以及有效折射率和传播距离同波导几何参数所存在的变化关系。

3.1 介质 1 厚度 d 对传输特性的影响

当 $t = 150 \text{ nm}$, $w = 200 \text{ nm}$, 介质 1 厚度 d 分别取 10、30、50 nm 时,电场基模的分布图如图 4 所示,从图中可以发现,基模的电场主要分布于脊背介质加载型波导的介质 1 区域。通过观察这三幅图可以发现,当 t 和 w 固定,脊背介质加载型波导的介质 1 厚度 d 较小时,电场的局域性增强,能量主要分布于介质 1 中,而分布于介质 2 中的能量明显减少。

针对图 4,为了更清楚地理解这一现象,分析了同有效折射率和传播长度之间的关系,图 5 即为有效折射率和传播长度随介质 1 厚度 d 的变化关系曲线图。

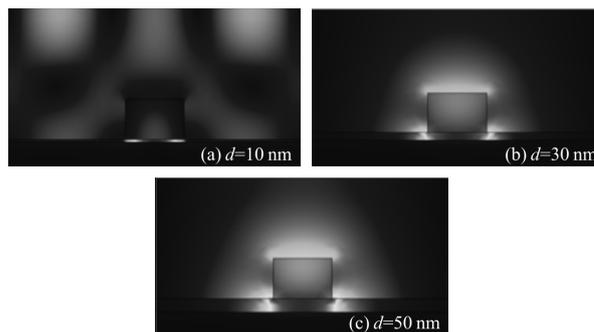
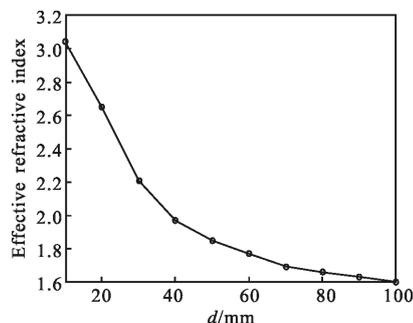


图 4 d 为不同值时的电场分布情况

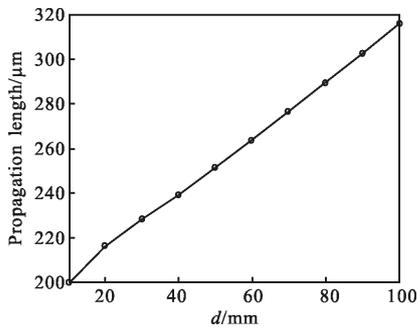
Fig.4 Electric field distribution when d is different

观察图 5 可知,当 d 增大时,有效折射率减小,但传播距离变化趋势与之相反,其随着 d 的增大而增大。这是因为通过减小 d ,金属与介质的耦合程度增强,能量主要分布在金属/介质 1 界面上,使得场的局域性增强;当 d 增大时,金属与介质 1 的耦合程度降低,这使得场的能量分布较分散,场的局域性减弱,有一部分能量分布在介质 2 中,从而损耗降低,传播距离增加。



(a) 有效折射率随介质 1 厚度 d 变化关系曲线图

(a) Relationship graph of the effective refractive index change with the thickness d of medium 1



(b) 传播长度随介质 1 厚度 d 的变化关系曲线图

(b) Relationship graph of the propagation length change with the thickness d of medium 1

图 5 介质 1 厚度 d 为不同值时波导的传输特性曲线

Fig.5 Transfer characteristic curve of waveguide when the thickness d of medium 1 is different

3.2 介质 2 的几何参数对传输特性的影响

其他仿真条件不变,对介质 2 的厚度 t 对波导传输特性的影响进行分析。当 $d=30\text{ nm}$, t 分别取 100、150、200 nm 时,电场分布情况如图 6 所示。

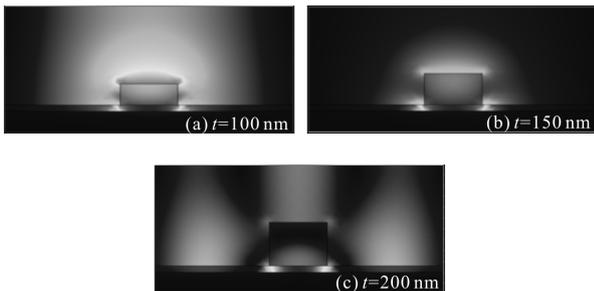


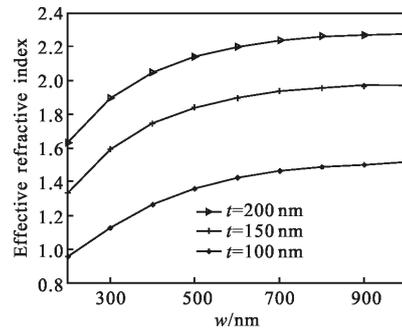
图 6 介质 2 厚度 t 为不同值时的电场分布情况

Fig.6 Electric field distribution when the thickness t of medium 2 is different

对比图 6 和图 4 可以发现,两组图电场分布情况相类似,但其强度有所改变。基模的电场分量主要分布于脊背介质加载型波导的介质 1 区域。对有效折射率和传播长度同 w 的变化关系进行分析,结果如图 7 所示。

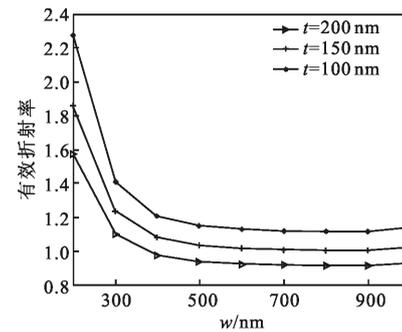
观察图 7 可以发现,有效折射率随 w 的增大而增大,传播距离的变化趋势同之相反,传播距离随 w 的增大而减小。同时可以发现当 w 一定时,有效折射率随着 t 增加而增加,如图 7(a)所示,传播距离随着 t 增加而减小,如图 7(b)所示。这是因为随着介质 2 的厚度 t 的增加,高折射率介质限制了场的能力加强,从而使得金属与介质的耦合作用加强,能量分布

相对集中。



(a) 有效折射率随介质 2 宽度 w 的变化关系曲线图

(a) Relationship graph of the effective refractive index change with the width w of medium 2



(b) 传播长度随介质 2 宽度 w 的变化关系曲线图

(b) Relationship graph of the propagation length change with the width w of medium 2

图 7 介质 2 宽度 w 不同时波导的传输特性曲线

Fig.7 Transfer characteristic curve of waveguide when the width w of medium 2 is different

4 结论

文中设计了一种脊背型介质加载型表面等离子体波导结构,这种波导的结构由介质 1 的厚度 d 、介质 2 的厚度 t 和宽度 w ,三个几何参数共同作用。选用 COMSOL 软件进行模拟分析该结构的几何参数对传输特性的影响。从仿真结果可以看出:基模的电场分量主要分布该结构的金属/介质 1 界面。改变介质 1 和介质 2 组合,其电场分布也随之发生变化,当介质 1 为低折射率介质,介质 2 为高折射率介质时,其电场大部分能量集中于金属/介质 1 界面,表明其局域性增强;通过增加介质 1 和介质 2 的厚度,传播长度分别呈现增加和减小的变化趋势,因而可以通过调节结构的几何参数,达到改变耦合电磁场能量的目的。通过对比分析可知:文中设计的

脊背型介质加载型表面等离子体波导结构相比于传统的介质加载型表面等离子体波导结构, 具有更高的性能, 能够对场实现更加有效的控制, 使其局域性更强。文中设计的结构不仅拓宽了介质加载型表面等离子体波导结构的理论基础, 并且在纳米光学的集成光学器件的研究中具有一定的应用潜能。

参考文献:

- [1] Ozbay E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, 311(5758): 189–193.
- [2] Dong P, Liu X, Chandrasekhar S, et al. Monolithic silicon photonic integrated circuits for compact 100 Gb/s coherent optical receivers and transmitters[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4): 150–157.
- [3] Almedia V R, Xu Q, Barrios C A, et al. Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Optics Letter*, 2004, 29(11): 1209–1211.
- [4] Zia R, Schuller J A, Chandran A, et al. The next chip-scale technology[J]. *Materials Today*, 2006, 9(7): 20–27.
- [5] Paul A, Zhen Y R, Wang Y, et al. Dye-assisted gain of strongly confined surface plasmon polaritons in silver nanowires[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(6): 3628–3633.
- [6] Lal S, Hafner J H, Halas N J, et al. Noble metal nanowires: from plasmon waveguides to passive and active devices[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2012, 45(11): 1887–1895.
- [7] Chu H S, Ewe W B, Koh W S, et al. Remarkable influence of the number of nanowires on plasmonic behaviors of the coupled metallic nanowire chain [J]. *Applied Physics Letter*, 2008, 92(10): 3103–3104.
- [8] Xu W, Zhu Z H, Liu K, et al. Dielectric loaded graphene plasmon waveguide[J]. *Optics Express*, 2014, 23(4): 5147–5153.
- [9] Pile D F P, Ogawa T, Gramotnev D K, et al. Two-dimensionally localized modes of a nanoscale gap plasmon waveguide[J]. *Applied Physics Letter*, 2005, 87(26): 1114–1117.
- [10] 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]. *Optics Letters*, 2014, 38(16): 3005–3008.
- [11] Gao L, Tang L, Hu F, et al. Active metal strip hybrid plasmonic waveguide with low critical material gain [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11487–11495.
- [12] Kamalakis T, Alexandropoulos D, Vainos N. Efficient design of polymer micro-ring resonator filters based on coupled mode theory and finite difference mode solver [J]. *Optics Communications*, 2014, 339(27): 123–128.
- [13] Holmgaard T, Bozhevolnyi S I. Theoretical analysis of dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides [J]. *Physical Review B*, 2007, 75(24): 245405.
- [14] Yun Binfeng, Hu Guohua, Cui Yiping. Bound modes analysis of symmetric dielectric loaded surface plasmon-polariton waveguides[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3610–3618.
- [15] Flammer P D, Banks J M, Furtak T E, et al. Hybrid plasmon/dielectric waveguide for integrated silicon-on-insulator optical elements [J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 21013–21023.
- [16] Chu H S, Li E P, Bai P, et al. Optical performance of single-mode hybrid dielectric-loaded plasmonic waveguide-based components [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(22): 221103.