

基于锯齿共振腔耦合金属波导结构的多通道 等离子体逻辑门输出光源

肖功利^{1,2**}, 徐俊林¹, 杨宏艳^{2*}, 韦清臣¹, 窦婉滢¹, 杨秀华¹, 张开富¹,
杨寓婷¹, 李海鸥¹, 李琦¹, 陈永和¹, 傅涛¹

¹ 桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004;

² 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

摘要 提出了一种基于锯齿共振腔耦合金属波导结构。研究发现,该波导结构在加入锯齿共振腔后有更好的信号输出频率,可通过调整锯齿共振腔长度和宽度实现对逻辑门光源输出信号频率的控制;并通过增加结构中输出波导数量来增加逻辑信号的输出端口,可实现双通道及三通道逻辑信号的输出功能。该锯齿共振腔耦合金属波导结构构建的逻辑门输出光源具有较好的传输效率和较宽的工作带宽,通过调整锯齿共振腔的长宽参数,传输效率可达 60%,平均工作范围为 1000 nm。

关键词 集成光学; 逻辑输出光源; 时域有限差分方法; 传输效率; 金属波导

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.121301

Multi-Channel Plasmonic Logic-Gate Output Light Source Based on Sawtooth Resonant Cavity Coupled with Metal-Waveguide Structure

Xiao Gongli^{1,2**}, Xu Junlin¹, Yang Hongyan^{2*}, Wei Qingchen¹, Dou Wanying¹, Yang Xiuhua¹,
Zhang Kaifu¹, Yang Yuting¹, Li Haiou¹, Li Qi¹, Chen Yonghe¹, Fu Tao¹

¹ *Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;*

² *School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract A sawtooth resonant-cavity-coupled metal-waveguide structure is proposed. It is found that adding a sawtooth resonator improves the signal output frequency of the waveguide structure. In addition, the output signal frequency of the logic-gate light source can be controlled by adjusting the length and width of the sawtooth resonator. Moreover, the increase of logic signal output ports by increasing the number of output waveguides can help to realize the two- and three-channel signal outputs. This logic gate output light source, constructed by coupling a sawtooth resonator with a metal waveguide structure, has a broad working bandwidth and a high transmission efficiency. With a suitable adjustment of the length and width of the sawtooth resonator one can get a transmission efficiency of 60% and an average working range of 1000 nm.

Key words integrated optics; logic output light source; finite-difference time-domain method; transmission efficiency; metal waveguide

OCIS codes 130.3990; 350.2450; 350.3950; 350.5400; 300.6170

收稿日期: 2018-12-17; 修回日期: 2018-12-19; 录用日期: 2019-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(61465004, 61765004)、广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198164, 2016GXNSFAA380006)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(2019YCX028)、广西精密导航技术与应用重点实验室(DH201804, DH201703)

* E-mail: yhy.gl@126.com; ** E-mail: xgl.hy@126.com

1 引言

表面等离子激元(SPP)是沿着金属/介质界面传播的倏逝波,它能有效地克服传统光学的衍射极限,并在入射光波波长与数值孔径相比拟时实现光的异常透射(EOT)^[1-4]。对EOT现象的研究,将人类对光与金属/介质界面的电磁学研究带入了纳米尺度的世界。具有微纳尺寸的等离子体波导组件能够克服传统光学衍射极限的缺点,具有尺寸小、速度快的优点,是有效克服制约集成电路发展问题的下一代芯片的新技术。近十年来,具有强电磁波耦合的亚波长尺寸下的等离子体波导已经被学者广泛而深入地研究^[5-8]。在早期研究中,对于不同类型的等离子体波导的基本原理和固有特性以及波导的有效激发方式已有深入的研究,各种等离子体波导器件应运而生,如耦合器^[9]、布拉格光栅反射器^[10]、Mach-Zehnder干涉仪^[11]、环形谐振器^[12]、齿形波导滤波器^[13-16]和等离子体准直器^[17-20]等。然而,基于表面等离子激元组件的研究也有其缺陷,即光学波长范围内贵金属具有不可避免的欧姆热损耗。基于此,科研人员开始专注于解决降低等离子体损耗的关键问题。最近,研究人员开发了各种功能组件和器件,如Huang课题组及Shapoval课题组研究的等离子体激光器^[21-22],Kawashima课题组研究的可调谐等离子体调制器^[23]和Dolatabady课题组及Ferreira课题组研究的等离子体逻辑门^[24-25]等。然而,人们对全光器件逻辑单元的并行端口输入光源的研究甚少,如Wen课题组提出了一种等离子体逻辑光源^[1],但其还存在一些不足的问题,如传输效率较小、工作范围较短等。

为了解决上述问题,本文提出了一种锯齿共振腔耦合金属波导结构,对锯齿共振腔与波导组成的纳米尺度系统的传输响应进行时域有限差分(FDTD)方法的数值分析和研究。通过设计等离子体光学器件构建级联逻辑门,该组件将单个光束分成多个光束,然后将它们聚焦在逻辑门的输入端,可同时形成双端口及三端口逻辑门信号源。通过改变共振腔的长度和宽度改变滤波器结构的传输响应,实现对逻辑光源信号的频率控制。优化这些参数后,发现该结构可体现较好的逻辑门光源输出特性,相较于Wen等^[1]提出的等离子体逻辑门输出信号源,传输效率提高10%以上,工作带宽增大500 nm。该发现为下一代高性能等离子体逻辑门输出光源设计提供了理论基础。

2 结构与数值分析

等离子体逻辑门输出光源系统示意图如图1(a)所示,其二进制信息在外部由平面光和可控波长滤波器控制,等离子体逻辑光源由锯齿共振腔耦合金属波导结构构成,数字二进制信息从源的输出端口进入等离子体算术逻辑单元。图1(b)为本文设计的锯齿共振腔耦合金属波导结构,该结构由多个矩形波导和与波导接触的矩形谐振腔构成;其中波导按照功能分为入射波导和出射波导。入射波导的一端延伸到金属薄膜的左侧边缘,形成光的入射口,出射波导延伸到金属薄膜右侧,形成光的出射口。图1(c)为此结构的 x - y 平面二维结构图,其中输出端口被标记为port1、port2,波导宽度 $w=50$ nm,波导port1长度 $L_1=2.4$ μm ,波导port2长度 $L_2=1.6$ μm ,中间竖直波导长度 $L_3=500$ nm。平面光在装置左侧沿着入射波导水平入射时,金属膜表面激发的SPP通过隧道效应从左传播到右,在入射波导接触的输出波导和谐振腔中发生干涉,与局域表面等离子激元发生共振耦合,在出射波导的另一侧出射透射光,使得该结构实现解复用功能。由于每个解复用端口近似于逻辑信号的输出端口,通过复用效果可实现等离子逻辑门功能。利用SPP共振腔的局域耦合作用,通过调节共振腔的结构参数,可实现不同的性质、不同的功能。在模拟中,等离子体波导在横磁(TM)模式下的网格尺寸被设置为 5 nm \times 5 nm,采用Ag(Ag是在可见光谱中损耗最低的金属)^[2]作金属材料, SiO_2 作基底。为了更好地匹配真实材料,银的介电函数 ϵ_m 使用Lorentz-Drude模型^[26],可表示为

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\gamma)], \quad (1)$$

式中: $\epsilon_\infty = 3.7$,为高频介电函数; $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$ Hz,为等离子体频率; $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$ Hz,为自由电子振荡时的阻尼频率; ω 为入射波的角频率。在结构模型中,当入射光从入射波导传输到波导岔口前,只有TM模式被激发,光波转换成SPP波,当经过波导岔口和谐振腔时,可产生共振波长 λ_m ,被表示为

$$\lambda_m = \frac{4n_{\text{eff}}D}{(2m+1) - \frac{\theta}{\pi}}, \quad (2)$$

式中: n_{eff} 为结构的有效折射率; m 为一个结构整体; θ 为SPP波在空气/银界面发生反射时产生的相位移动; D 为入射光传输距离。从(2)式可以看出,

SPP 的共振波长与共振腔的深度、结构的有效折射率呈线性关系。单一的金属-绝缘体-金属(MIM)波导结构中 n_{eff} 可以表示为

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{MIM}}} + i \frac{\lambda}{4\pi L_{\text{SPP}}}, \quad (3)$$

式中: β 为传播常数; $k = 2\pi/\lambda$, 为自由空间波数;

λ_{MIM} 为 MIM 波导的导波波长; L_{SPP} 为 SPP 的传播距离 L_{SPP} ; λ 为入射光的波长。由(3)式可知, n_{eff} 为一个复数, 它的实部决定了 MIM 波导的导波波长 λ_{MIM} , 它的虚部决定了 SPP 的传播距离 L_{SPP} 。如图 2(b)所示结构, 其有效折射率主要与共振腔的长、宽有关^[27]。

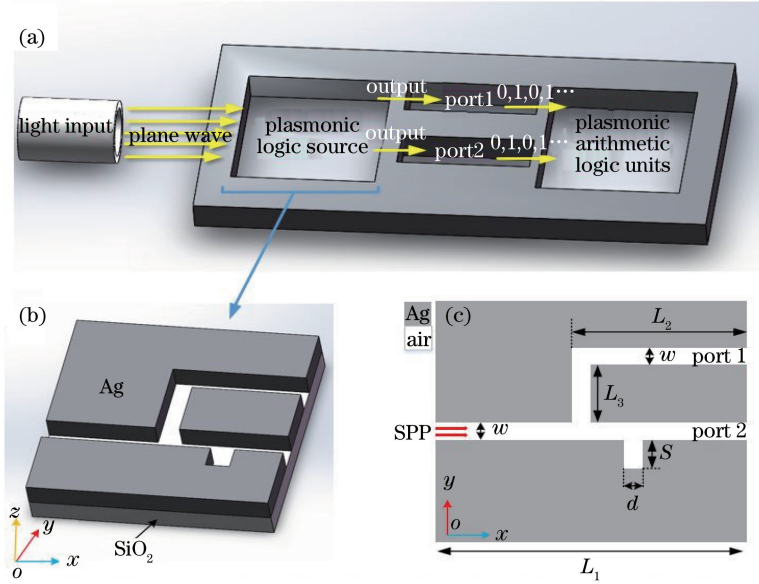


图 1 等离子体逻辑门输出光源。(a)系统示意图;(b)三维结构示意图;(c) x - y 平面二维结构示意图

Fig. 1 Plasma logic-gate output source. (a) Schematic of system; (b) schematic of three-dimensional structure; (c) schematic of two-dimensional structure in x - y plane

3 结果与讨论

采用 FDTD 方法^[28]模拟共振腔结构参数对金属波导结构光传输特性的影响。光通过锯齿共振腔耦合金属波导结构的透射率 T 定义为

$$T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = |E_{\text{out}}/E_{\text{in}}|^2, \quad (4)$$

式中: P_{out} 为锯齿共振腔耦合金属波导结构透射光波功率; P_{in} 为入射光波功率; E_{out} 为透射光波电场强度; E_{in} 为入射光波电场强度。图 2(a)为锯齿共振腔耦合金属波导结构的透射光谱图, 其中实线与虚线分别表示装置中端口 1 和端口 2 的光透射率。为了研究逻辑信号源输出特性, 标准化传输的阈值设置为 14 dB(15%)^[1], 大于此值的信号传输为信号 1, 小于此值则为信号 0。在结构设置中, 共振腔的长度 s 设置为 400 nm, 共振腔宽度 d 设置为 100 nm。从模式传输谱中可以看出, 当输入波长分别为 736, 483, 663, 543 nm 时, 逻辑信号源输出 00、01、10、11 信号。该机构输出信号 1 的传输效率平均值为 60%, 输出信号 0 的传输效率平均值为 5%。此结果比同类型逻辑输出光源(文献[1])传输效率高

10%。

这是因为: 与文献[1]的耦合谐振腔结构相比较, 共振腔耦合波导结构在传输效率方面具有更大的优势。为了对上述情况进行深入说明, 分别模拟了不同逻辑信号组合的电场密度分布, 如图 2(b)~(e)所示。从这些电场密度分布图可以看出, 当波长 $\lambda = 543$ nm 时, 信号从输入端正常传输至输出端口, 实现 11 信号输出, 而当 λ 分别为 736, 483, 663 nm 时, 特定波长的能量被局域在共振腔中, 实现 0 信号输出。

为了进一步研究锯齿共振腔耦合金属波导结构的光透射现象, 详细探讨了共振腔长度 s 和共振腔宽度 d 两个参数对光传输特性的影响。首先讨论了 s 对滤波性能的影响, 令波导宽度 $w = 50$ nm, 通过调节 s , 使得其分别为 0, 100, 200, 300, 400, 500 nm。图 3(a)所示为该结构在不同的共振腔长度 s 下光透射率与共振波长的关系, 图中数字 1~6 分别为不同 s 下的共振波峰对应编号, code 为各端口输出逻辑编码。结果表明, 当出现加入共振腔后, 共振峰个数开始增加, 且随着参数 s 的增加, 共

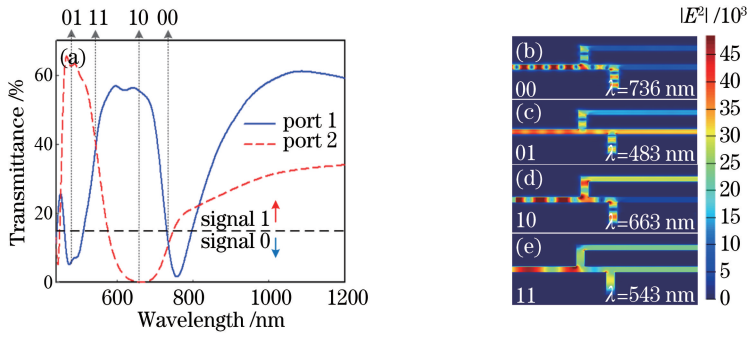


图2 二端口锯齿共振腔耦合金属波导结构。(a)透射光谱图;(b)~(e)在不同的逻辑门信号输出波长条件下的电场强度
Fig. 2 Two-port sawtooth resonator coupled with metal waveguide structure. (a) Transmission spectra; (b)-(e) electric field intensities at different output wavelengths of logic-gate signal

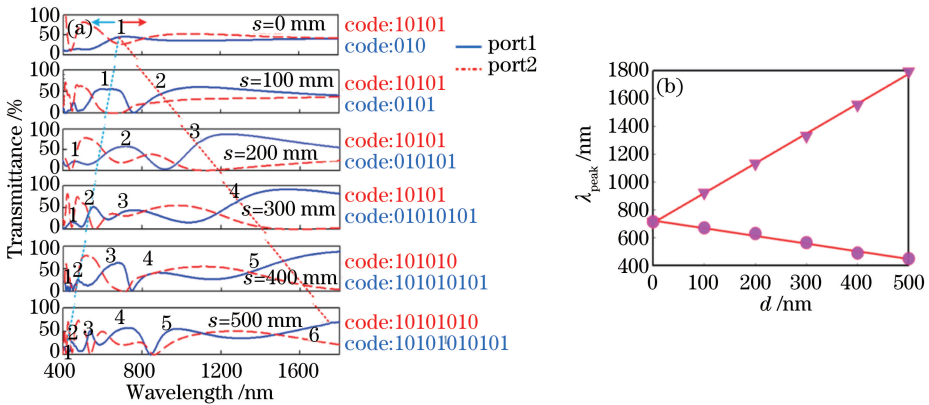


图3 锯齿共振腔耦合金属波导结构。(a)在不同的共振腔长度 s 下光透射率与共振波长的关系;(b)共振波长与 s 的关系
Fig. 3 Sawtooth resonator coupled with metal waveguide structure. (a) Transmittance versus resonant wavelength under different lengths s of resonant cavity; (b) resonant wavelength versus s

共振腔产生的共振峰向两侧分裂,逻辑输出光源的输出信号频率(逻辑输出编码)也随着 s 增加。从图 3 (b)中可以看出,向两侧分裂的共振腔波长与共振腔呈线性关系。模拟结果表明,通过调整耦合共振腔的长可以线性调整输出信号频率,且随着 s 的增加,逻辑门输出信号的波峰发生红移,而输出信号的

波谷发生蓝移。

共振腔宽度 d 的变化对光传输特性的影响,如图 4(a)所示(图中实线圈和虚线圈分别代表 port1 和 port2 输出信号偏移点)。波导的长度及宽度保持不变,当共振腔的长度 $s=400$ nm,通过调节共振腔宽度 d ,使共振腔的宽度 d 分别为 0, 50, 100,

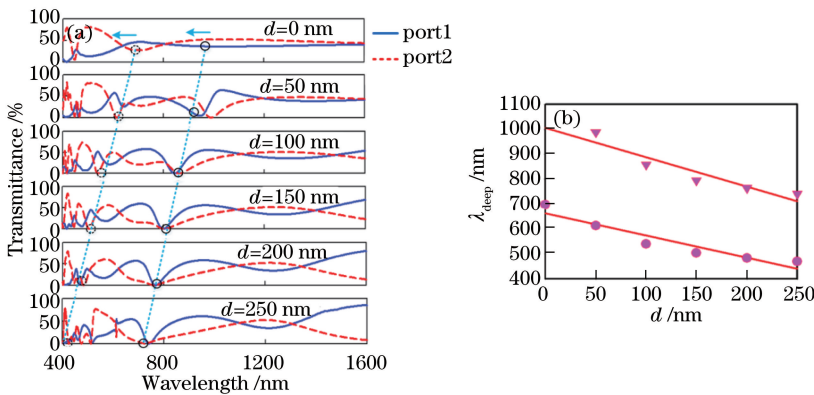


图4 锯齿共振腔耦合金属波导结构。(a)不同的共振腔宽度 d 下光透射率与共振波长的关系;(b)共振波长与 d 的关系
Fig. 4 Sawtooth resonator coupled with metal waveguide structure. (a) Transmittance versus resonant wavelength under different widths d of resonant cavity; (b) resonant wavelength versus d

150, 200, 250 nm。结果表明,随着共振腔的宽度 d 逐渐增大,透射峰发生蓝移,发生这一现象主要原因是随着共振腔变宽,共振腔对于能量的局域能力不断增加,从而使共振波长变小。图 4(b)所示为端口 1 和端口 2 中共振波谷的波长和共振腔宽度的关系,从图中可以看出,共振波谷几乎和共振腔宽度呈线性关系。模拟结果表明,通过控制共振腔的宽度可以调整逻辑输出光源的输出共振波长,且随着 d 的增加,逻辑门输出信号的波峰及波谷均发生蓝移。

根据上述锯齿共振腔耦合金属波导结构实现两端口输出逻辑信号源的特点,提出并研究了一种三端口输出的逻辑信号源系统。如图 5(a)所示,新增一条输出波导位于入射波导的一侧,同时在新增波导的一侧增加一条局域 SPP 能量的矩形共振腔,作用和原有共振腔一样。由于该结构是单输入三输出结构,因此将每个输出分别标记为 port1、port2、port3。相应的结构参数设置为 $w = 50$ nm, $L_1 = 2.4$ μ m, $L_2 = 1.6$ μ m, $L_3 = 500$ nm, 谐振腔的结构参数设置为 $s_1 = 300$ nm, $s_2 = 400$ nm, $d_1 = 100$ nm,

$d_2 = 100$ nm。图 5(b)为三个通道的透射光谱。port1、port2、port3 端口的共振峰波长分别以不同的频率输出信号,共振峰随着波长的变化发生重合,最终达到输出三位逻辑门信号的目的。同时,通过设置不同矩形共振腔的参数,可以很好地调节输出信号源的分频参数。图 5(c)~(j)为该结构在不同逻辑门信号段的电场密度分布图,根据对输入波长的控制,可以实现 000、001、010、011、100、101、110、111 逻辑门信号输出。上述结果表明,该三输出逻辑信号源的 1 信号平均传输效率达 60%,而 0 信号的平均传输效率为 5%,同时其工作范围为 1200 nm。与文献[1]相比,该结构具有更好的传输效率,更大的工作带宽,这个结果说明采用该结构在未来光学逻辑信号源的设计中具有重要的应用价值。然而,随着输出信道的增加,长波方向的透射功率会略有减少,这是由于增加的信道中会有一些不可避免的能量损耗,这个现象会在不同程度上限制输出信道的扩展数,因此减少信道中的能量损耗是本文需要面对的另外一个研究问题,也是下一步工作重点。

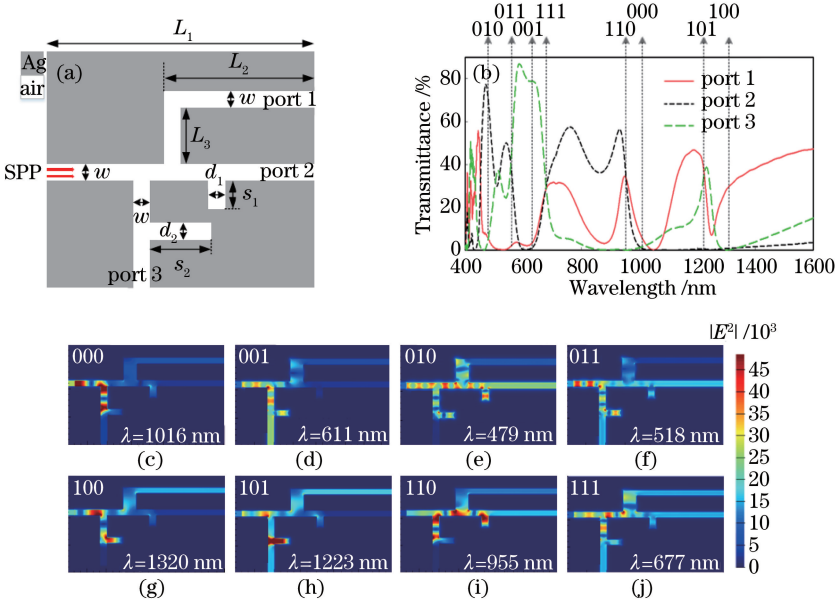


图 5 三端口逻辑门输出光源。(a)二维结构示意图;(b)三通道逻辑门输出光源透射光谱图;(c)~(j)在不同的逻辑门信号输出波长条件下的电场强度

Fig. 5 Three-port logic-gate output source. (a) Schematic of two-dimensional structure; (b) transmission spectra of three-channel logic gate output source; (c)-(j) electric field intensities at different output wavelengths of logic-gate signal

4 结 论

提出一种锯齿共振腔耦合金属波导结构。利用该结构中共振腔的等离子体局域特性可以实现多端口滤波,并通过多路复用可以实现多通道逻辑门信号(00,01,10,11)输出。采用 FDTD 方法从理论上

探讨了 s 、 d 等几何参数对共振腔耦合金属波导结构系统的影响,并研究了基于该现象设计的多通道逻辑门输出信号源的分频特性。主要研究结果如下:1) 该锯齿共振腔耦合金属波导结构具有较好的分频特性,通过调整 s ,可以改变输出信号源的输出频率,增加 s ,其输出频率线性增强;2) 通过调整 d ,

可以改变共振腔的共振波长,增加 d ,其共振波长发生蓝移;3) 基于以上特性设计的多端口逻辑门输出光源,可以实现双通道及三通道的逻辑门信号输出功能。各端口输出共振波长及输出频率可通过金属波导结构内的共振腔参数来修正,其信号 1 的传输效率可达到 60%,信号 0 的传输效率可达 5%,工作范围为 1200 nm,该结构具有较好的逻辑信号输出功能。这些研究成果为设计高性能的等离子体逻辑门输出信号源提供了理论基础。

参 考 文 献

- [1] Wen J, Chen J N, Wang K, *et al.* Broadband plasmonic logic input sources constructed with dual square ring resonators and dual waveguides[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1-9.
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [3] Wang X L, Wang P, Chen C C, *et al.* Active modulation of plasmonic signal with a subwavelength metal/nonlinear dielectric material/metal structure [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(6): 584-587.
- [4] Li X W, Tan Q F, Bai B F, *et al.* Tunable directional beaming assisted by asymmetrical SPP excitation in a subwavelength metallic double slit[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(5): 052401.
- [5] Lal S, Link S, Halas N J. Nano-optics from sensing to waveguiding[J]. Nature Photonics, 2007, 1(11): 641-648.
- [6] Maier S A, Kik P G, Atwater H A, *et al.* Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides[J]. Nature Materials, 2003, 2(4): 229-232.
- [7] Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. Science, 2006, 311(5758): 189-193.
- [8] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit [J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 83-91.
- [9] Zhao H W, Huang X G, Huang J T. Surface plasmon polaritons based optical directional coupler [J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 2008, 51(12): 1877.
- [10] Chen Y L, Xu J, Shi N N, *et al.* Mode properties of metal-insulator-metal waveguide Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1123002.
- 陈奕霖, 许吉, 时楠楠, 等. 金属-介质-金属波导布拉格光栅的模式特性 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1123002.
- [11] Wang T B, Wen X W, Yin C P, *et al.* The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator [J]. Optics Express, 2009, 17(26): 24096-24101.
- [12] 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.
- [13] Lin X S, Huang X G. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes [J]. Optics Letters, 2008, 33(23): 2874-2876.
- [14] Lin X S, Huang X G. Numerical modeling of a teeth-shaped nanoplasmonic waveguide filter [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(7): 1263-1268.
- [15] Tao J, Huang X G, Lin X S, *et al.* A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetrical multiple-teeth-shaped structure [J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13989-13994.
- [16] Tao J, Huang X G, Lin X S, *et al.* Systematical research on characteristics of double-sided teeth-shaped nanoplasmonic waveguide filters [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(2): 323-327.
- [17] Yu N F, Blanchard R, Fan J, *et al.* Quantum cascade lasers with integrated plasmonic antenna-array collimators [J]. Optics Express, 2008, 16(24): 19447-19461.
- [18] Wu D Q, Huang C, Yang W F. Improvement on pH sensing properties based on surface treatment of graphene plasma [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 012401.
- 吴冬芹, 黄翀, 杨玮枫. 基于石墨烯等离子体表面处理改善 pH 传感特性的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 012401.
- [19] Yu N F, Kats M A, Pflügl C, *et al.* Multi-beam multi-wavelength semiconductor lasers [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(16): 161108.
- [20] Yu N F, Wang Q J, Kats M A, *et al.* Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams [J]. Nature Materials, 2010, 9(9): 730-735.
- [21] Huang C, Sun W Z, Fan Y B, *et al.* Formation of lead halide perovskite based plasmonic nanolasers and nanolaser arrays by tailoring the substrate [J]. ACS

- Nano, 2018, 12(4): 3865-3874.
- [22] Shapoval O V, Kobayashi K, Nosich A I. Electromagnetic engineering of a single-mode nanolaser on a metal plasmonic strip placed into a circular quantum wire[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1-9.
- [23] Xiao G L, Liu L, Yang H Y, *et al.* Light transmission characteristics of metal curved waveguide based on microcavity coupling structures [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1213001.
肖功利, 刘利, 杨宏艳, 等. 基于微腔耦合结构金属弯曲波导的光透射特性 [J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1213001.
- [24] Dolatabady A, Granpayeh N. All-optical logic gates in plasmonic metal-insulator-metal nanowaveguide with slot cavity resonator [J]. Journal of Nanophotonics, 2017, 11(2):026001.
- [25] Ferreira A C, Sobrinho C S, Guimarães G F, *et al.* All-optical logic gates based on XPM effect under the PAM-ASK modulation in a symmetric dual NLDC [J]. Microsystem Technologies, 2018:447-459.
- [26] Han Z H, Forsberg E, He S L. Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(2): 91-93.
- [27] Zhai X, Wang L, Wang L L, *et al.* Tuning bandgap of a double-tooth-shaped MIM waveguide filter by control widths of the teeth [J]. Journal of Optics, 2013, 15(5): 055008.
- [28] Kaminow I P, Mammel W L, Weber H P. Metal-clad optical waveguides: analytical and experimental study[J]. Applied Optics, 1974, 13(2): 396-405.