

基于表面等离子激元的金属波导全光开关设计

石振东¹ 赵海发^{2*} 刘建龙² 刘树田²

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

²哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 利用金属表面等离子激元(SPP)对光波的束缚和局域增强作用,设计了一种基于金属-电介质-金属波导布拉格光栅的全光开关。根据波导的电介质材料及其结构对有效折射率的调制作用,确定了开关各结构组成部分的材料和尺寸。通过引入金属波导滤波结构对抽运光和信号光进行了有效地分离,防止了抽运光对信号光及后续光路的干扰。使用时域有限差分算法(FDTD)对开关性能进行仿真,结果表明:新设计的全光开关在抽运光的光强为50 MW/cm²时其消光比达到7.32 dB,开关响应时间小于2 ps,结构的横向尺寸约为400 nm。

关键词 集成光学;全光开关;时域有限差分方法;金属波导;布拉格光栅

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0213001

Design of a Metallic Waveguide All-Optical Switch Based on Surface Plasmon Polaritons

Shi Zhendong¹ Zhao Haifa^{2*} Liu Jianlong² Liu Shutian²

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract A novel metallic waveguide Bragg grating all-optical switch based on surface plasmon polaritons (SPP) is proposed using the enhancement and constraint to light by metal-dielectric-metal waveguide Bragg grating. The material and structure size of this switch are decided according to their modulation affection to the effective refractive index. By adding a metal waveguide filter structure in the switch, the pump and signal light are separated, preventing the disturbance of the pump light to signal light and subsequent light path. The simulation of finite-difference time-domain method results show that the extinction ratio reaches 7.2 dB when the intensity of the pump is 50 MW/cm², response time is less than 2 ps, and the transverse dimension of this structure is about 400 nm.

Key words integrated optics; optical switch; finite-difference time-domain method; metal-dielectric-metal waveguide; Bragg grating

OCIS codes 130.3120; 130.4815; 240.6680

1 引言

因为具有克服光学衍射极限的能力,金属表面等离子激元(SPP)被认为是集成光路领域最有潜力的研究方向之一^[1]。由于光波与金属自由电子的相互作用,光在金属与电介质的界面传播时在垂直界面方向迅速衰减,导致光被紧紧束缚在金属与电介质的界面,它为人们在亚波长甚至更小的尺度内控制光提供了新的方法。光子晶体是一种由不同电介质周期性排列构成的人工结构,它可以通过合理的结构设计实现光子禁带从而控制光的传输^[2]。结合二者的优势,近年来人们设计了各种基于SPP和光子晶体的器件,如滤光片^[3]、光

收稿日期: 2014-07-21; 收到修改稿日期: 2014-09-23

作者简介: 石振东(1988—),男,实习研究员,主要从事金属表面等离子体、光学检测方面的研究。

E-mail: szd_caep@qq.com

*通信联系人。hfzhao@hit.edu.cn

吸收器^[4]和全光开关^[5]等。

全光开关是数字光信息处理和全光通信网络的核心器件之一^[6]。为提高全光开关的性能、早日做出实用器件,近年来人们提出了各种基于SPP和光子晶体的全光开关结构。其中一类是利用特殊材料的热光效应实现对光的开关控制,如刘毅等^[7]提出的基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关、Krasavin等^[5]提出的金属镓相变型SPP全光开关。这类开关由于结构和材料的热调节时间较长,因此开关的响应时间在纳秒甚至微秒量级,它不能满足光信息处理和光通信对光开关快速响应的要求。因此有人提出利用某些非线性光学材料响应速度快的优势设计全光开关,如黎磊等^[8]设计的光子晶体异质结耦合波导光开关和Min等^[9]提出的纳米金属光栅非线性双稳全光开关;特别是后者利用SPP对光的局域增强和三阶非线性材料折射率随光强变化的特性实现了亚皮秒量级的开关响应。但以上方法共同的问题在于其横向尺寸较大,不利于器件的集成。

为了在波长甚至亚波长尺度上控制光的传输,人们设计了各种基于SPP的微腔结构,如银纳米线谐振腔^[10]和金纳米盘微腔^[11]。前者用直径约为100 nm的银纳米线作为SPP的法布里-珀罗(FP)腔,后者证明在纳米盘边缘的拐角处同时存在SPP的反射和传输,纳米盘的边缘和拐角可以共同构成谐振腔。2012年,Zhang等^[12]将纳米线和纳米盘结合提出了“纳米旗”的谐振腔结构,并证明腔内同时存在纳米线的FP腔谐振模式和纳米盘的共振模式,两种模式相互“竞争”;当传播光波长同时满足两个模式时谐振腔谱线宽度可以窄至约2 nm,同时光场被极大地局域增强;该结构为纳米光子器件的设计特别是微结构的非线性器件设计提供了很好的参考。在这些腔结构中,由于光都是沿着金属外表面传播,而SPP在电介质中的衰减相比在金属中的要小,因此它们在横向上对光的束缚能力较差。本文采用传统的金属-电介质-金属结构构成分步反馈式FP腔,能将SPP紧紧束缚在金属夹层中。利用SPP对光的束缚和金属光栅的带隙特性,实现了以抽运光控制信号光的全光开关,且其横向尺寸只有约400 nm,响应时间只有约2 ps。通过引入金属滤波器结构实现了抽运光和信号光的分离,避免了抽运光对信号光以及后续光路的影响;该开关同时具有响应速度快和集成能力强的优势。

2 全光开关设计

图1为金属-电介质-金属波导布拉格光栅全光开关的结构示意图,它由金属布拉格光栅(虚线框外部分)和金属波导滤波器(虚线框内部分)组合而成。用金属做成狭缝构成微结构的波导,波导的电介质层用不同折射率的两种材料周期性交替填充形成布拉格光栅,同时用非线性材料引入缺陷。类似于一维光子晶体,缺陷的引入导致布拉格光栅禁带中出现相应的缺陷态,而缺陷态的中心波长随缺陷的结构和缺陷材料的折射率增大而红移^[13-14];因此可以利用缺陷的这两个参数实现对光的控制。基于这种光栅结构的全光开关,可以实现以550 nm的抽运光控制波长为765 nm的信号光。

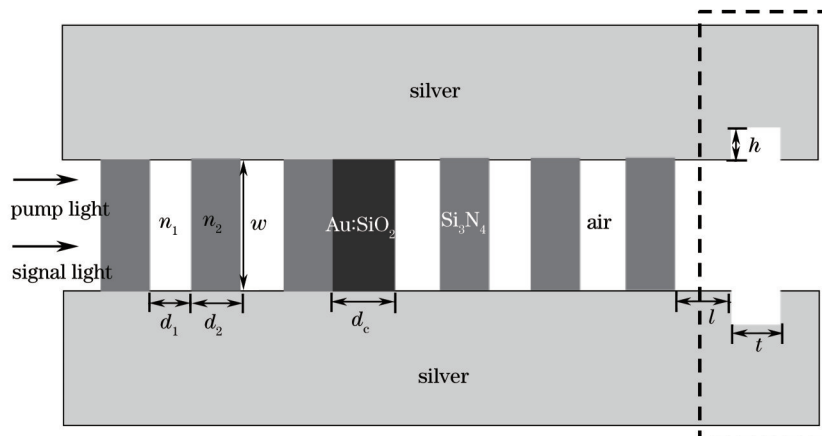


图1 金属波导布拉格光栅全光开关的结构

Fig.1 Schematic diagram of metallic waveguide Bragg grating all-optical switch

2.1 开关各部分材料及结构尺寸

2.1.1 各部分材料的选择

金属的介电常数可以用Drude模型描述^[15]:

$$\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (1)$$

式中 ω 是入射光的角频率, ε_∞ 和 γ 分别是高频光入射时材料的介电常数和电子的碰撞频率, ω_p 为等离子体频率。为了降低整个开关的损耗,选择银作为金属材料,其参数值分别为: $\varepsilon_\infty = 3.7$, $\gamma = 0.018 \text{ eV}$, $\omega_p = 9.1 \text{ eV}$ 。另外,为便于加工选用空气和 Si_3N_4 作为两种电介质材料,其介电常数分别为1和4.12。

对于缺陷材料,选择 $\text{Au}:\text{SiO}_2$,因为其具有较大的三阶非线性效应和较快的响应时间^[16]。与其他克尔材料类似, $\text{Au}:\text{SiO}_2$ 的介电常数与入射光强有如下关系:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + \chi^{(3)}|E|^2, \quad (2)$$

式中 ε_0 和 $\chi^{(3)}$ 分别是线性介电常数和三阶非线性响应因子: $\varepsilon_0 = 2.25$, $\chi^{(3)} = 2.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{V}^2$,非线性响应时间为亚皮秒量级。因为 $\text{Au}:\text{SiO}_2$ 对波长为550 nm左右的光有最大的非线性响应,因此选择抽运光的波长为550 nm。

2.1.2 电介质层的宽度选择

为了控制开关的横向尺寸,将电介质层宽度 w 限制在250 nm以内,这样SPP的对称模式将无法在波导中传播,因此只需要考虑SPP的反对称模式^[17]。用TM波入射,色散关系为^[18]

$$\begin{cases} \tanh \frac{wk_d}{2} = -\frac{\varepsilon_d k_m}{\varepsilon_m k_d}, \\ k_{d,m} = \sqrt{\beta^2 - \varepsilon_{d,m} k_0^2}, \\ n_{\text{eff}} = \beta_{\text{spp}}/k_0, \end{cases} \quad (3)$$

式中 w 为波导的电介质宽度, ε_m 和 ε_d 分别为金属和电介质的介电常数, k_m 和 k_d 分别为光波在金属和电介质中的传播常数, β_{spp} 和 n_{eff} 为SPP在波导中的传播常数和有效折射率; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 表示光在真空中的传播常数, λ_0 代表入射光的波长。

(3)式的数值求解结果如图2所示,(a)和(b)是入射波长为550 nm(抽运光)时方程的求解结果;(c)和(d)是入射波长为765 nm(信号光)时方程的求解结果。从图中可知SPP在金属波导中的有效折射率随着电介

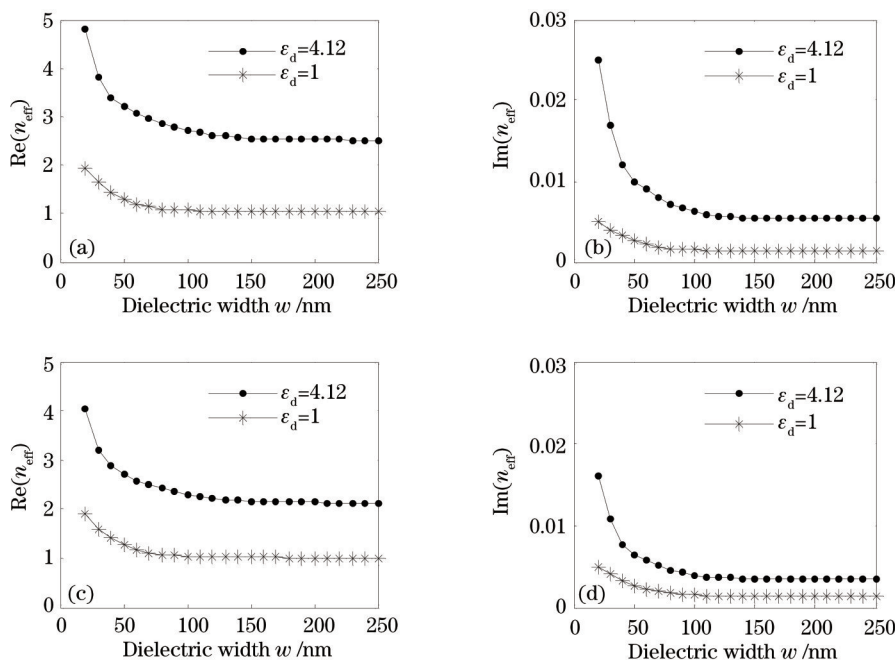


图2 有效折射率实部和虚部随波导电介质层宽度的变化。(a),(b)波长为550 nm;(c),(d)波长为765 nm

Fig.2 Effective refractive index versus width of dielectric. (a),(b) Wavelength is 550 nm;(c),(d) wavelength is 765 nm

质宽度的增大有效折射率迅速减小,在宽度大于 150 nm 后趋于平稳;同时 SPP 的有效折射率也随电介质材料的折射率增大而增大。另外,由于金属材料的色散效应,不同波长的光在波导中激发出的 SPP 的有效折射率不同;且代表损耗的有效折射率虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 的变化趋势与实部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 接近,因此,设计时尽量减少波导对 SPP 的损耗,以减小开关的阈值强度和器件的发热。兼顾器件的损耗和横向尺寸,将波导的宽度 w 选取为 100 nm。

2.1.3 电介质和缺陷层的长度选择

本文的设计目的是用波长为 550 nm 的抽运光来实现对波长为 765 nm 的信号光的开关控制,需要让抽运光处在光子通带以便于其能顺利通过波导照射到缺陷材料上;同时让信号光波长处在缺陷模中心。

两种电介质层的光学长度分别为 $\text{Re}(n_1)d_1$ 和 $\text{Re}(n_2)d_2$,其中, n_1, n_2 分别为两种介质层的折射率, d_1, d_2 为两种介质的几何长度。根据布拉格条件,光栅的一阶禁带的中心波长与介质层光学长度之间的关系为

$$\lambda_b = \frac{\text{Re}(n_1)d_1 + \text{Re}(n_2)d_2}{2} \quad (4)$$

文献[19]给出了两电介质层光学长度 $\text{Re}(n_1)d_1$ 和 $\text{Re}(n_2)d_2$ 与光栅的禁带宽度的简单关系,考虑到抽运光和信号光的波长差,禁带宽度应小于 400 nm;因此选择两介质层光学长度比为 1:3,对应的禁带宽度约为 350 nm。综合禁带中心波长和禁带宽度两个条件,根据图 2 求得的有效折射率结果选择 $d_1=d_2=100$ nm。

另外,根据布拉格定律,缺陷模式的中心波长近似为

$$\lambda_c = \frac{4\pi \text{Re}(n_{\text{eff}})d_c}{2m\pi - (\phi_{\text{refl1}} + \phi_{\text{refl2}})} \quad (5)$$

式中 ϕ_{refl1} 和 ϕ_{refl2} 分别是 SPP 在缺陷前后表面反射时产生的相位突变, m 为正整数, d_c 为缺陷层的长度。缺陷模中心波长随缺陷层长度的增加而红移,不同波长下的透射率 T 曲线如图 3 所示;利用这一特点可以通过改变缺陷层的长度使 740~820 nm 之内的任一波长处在缺陷模的中心,从而对该波长进行开关控制。

要现实对波长 $\lambda_c=765$ nm 的信号光进行控制,即要求缺陷模中心处在 765 nm,根据图 3 选择缺陷层的长度 $d_c=150$ nm,从而得到了整个金属波导布拉格光栅的各项结构参数;其透射率随波长的变化曲线如图 4 所示。

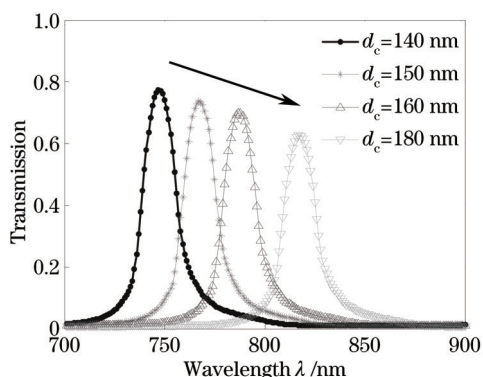


图 3 不同缺陷层长度下金属布拉格光栅的透射率曲线

Fig.3 Transmission spectra of metallic Bragg grating with different defect lengths

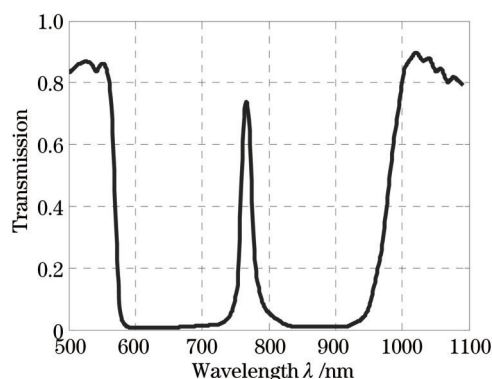


图 4 金属波导布拉格光栅的透射率曲线

Fig. 4 Transmission spectrum of metallic waveguide Bragg grating

2.1.4 金属波导滤波器结构设计

2.1.1~2.1.3 节给出了带缺陷的金属波导布拉格光栅的结构参数,利用该结构可以实现抽运光对信号光的开关控制。但是由于抽运光处在光栅的光子带隙之外,可以顺利透过光栅,同时抽运光的强度又远大于信号光,这样在结构的出射端信号光将被抽运光湮没。所以需要在光栅之后引入一个滤波结构,将抽运光过滤掉。

根据图 2 所示结果, SPP 在波导中传播时,有效折射率会随缝宽的变化而变化,因此波导的缝宽突变会导致 SPP 在波导中的传播常数突变, SPP 在传播过程中如同遇到了一个反射镜;同时由于色散原因,其对不同的波长反射效果不同,这样就能够实现对特定波长进行反射,起到滤波的作用^[20](如图 5 所示)。选定金属

波导滤波器结构参数 $h=25$ nm, $t=10$ nm, 从而在对波长为 550 nm 抽运光进行过滤的同时可以保证波长为 765 nm 信号光的顺利传输。为防止光在光栅和滤波器之间发生耦合, 金属波导布拉格光栅与滤波器结构之间的距离 l 选择为 100 nm。

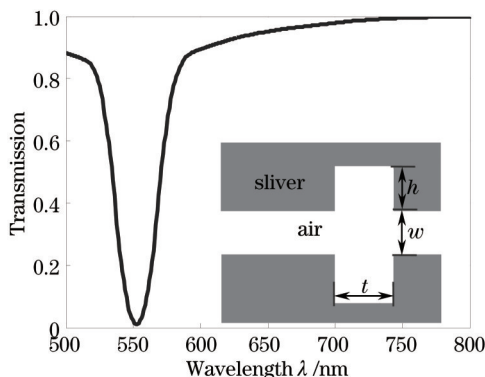


图5 波导滤波器的结构示意图及透射率曲线

Fig.5 Configuration and transmission spectrum of waveguide filter

综合前文讨论的结果, 得到了图 1 所示的金属波导布拉格光栅全光开关的所有结构参数和材料选择。图中电介质层宽度 $w=200$ nm, 空气层长度 d_1 、氮化硅层长度 d_2 、缺陷层长度 d_c 分别为: 100、100、150 nm, 金属波导滤波器参数 $h=25$ nm, $t=10$ nm。交替的两种电介质分别为空气和氮化硅; 缺陷材料选用 Au:SiO₂。

3 数值模拟结果

采用仿真软件 MEEP(MIT Electromagnetic Equation Propagation)对设计结构进行时域有限差分法(FDTD)进行数值模拟^[21]。横、纵向空间步长为 $\Delta x=\Delta y=1$ nm, 时间步长取 $\Delta t=\Delta x/2c$, c 为真空中的光速, 抽运光脉宽为 2 ps。以不同的抽运光光强照射, 仿真结果如图 6 所示。从图 6(a)可以看出, 随着抽运光强度 I_p 的增加缺陷模的中心波长发生红移, 这是因为 Au:SiO₂ 的折射率随抽运光的增大而增加, 根据(5)式, 缺陷模的中心波长随 Au:SiO₂ 的折射率增加而红移。对于波长 λ_s 为 765 nm 的信号光, 当抽运光强为 0 时, 它处于缺陷模的中心, 其透射率为 0.74; 此时信号光处于“开”态; 但随着抽运光强的增大, 信号光的透射率随着缺陷模中心的红移而减小[如图 6(b)所示], 当抽运光强达到 50 MW/cm² 时, 信号光的透射率只有 0.14 左右。这时信号光处于“关”态。在此抽运光强下光开关的消光比为 7.23 dB, 能够满足一般情况下对开关消光比的要求。从图 6(b)可以看出, 可以通过提高抽运光强来实现更高的消光比, 这会对光源的整个结构的损耗提出更高的要求, 因此需要折中考虑开关消光比和抽运光强。

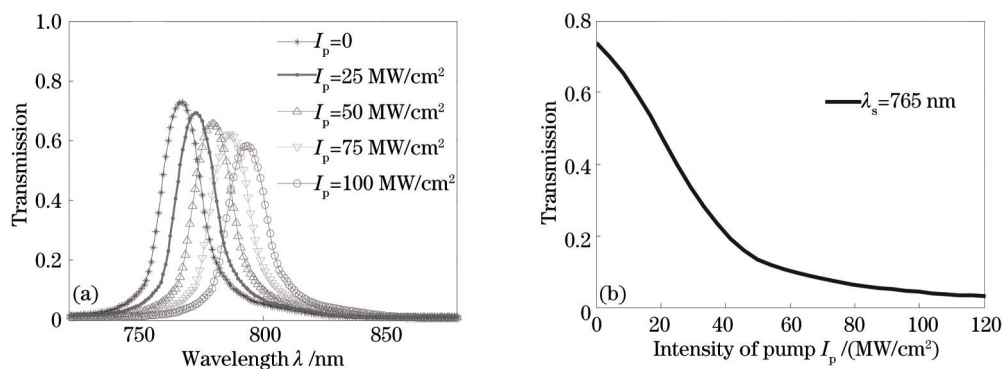
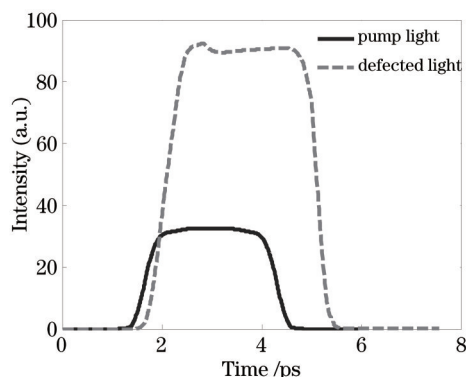


图6 开关透射谱与抽运光强的关系。(a)不同抽运光强下透射率随波长变化曲线; (b)信号光透射率随抽运光强的变化

Fig.6 Transmission spectra with different pump intensities. (a) Transmission spectra versus wavelength with different pump intensities; (b) transmission of signal with different pump intensities

图 7 显示了 Au:SiO₂ 上的光强对抽运光的时间响应。从图中可知, 缺陷上的光强对抽运光强的上升和下降的响应时间分别为 0.6 ps 和 1.2 ps 左右; 数值模拟没有考虑非线性材料的响应时间, 文献[22]给出了 Au:SiO₂

图7 Au:SiO₂上的光强对抽运光的时间响应Fig.7 Time respond of Au:SiO₂ optical intensity to pump light

的三阶非线性响应时间约为0.2 ps,因此可以得出结论:光开关的响应时间只有约2 ps,它远小于Min等^[9]提出的金属-电介质-金属纳米波导全光开关40 ns的响应时间,能够满足光通信和全光信息处理对开关时间的要求。

4 结 论

利用布拉格光栅缺陷模随缺陷折射率和缺陷长度增加而红移的特性,设计了一种基于SPP金属波导光栅的全光开关并对其进行了数值模拟。开关的横向尺寸只有约400 nm,工作波长为765 nm,抽运光波长为550 nm。由于缺陷模中心波长可通过缺陷长度控制,可以很方便地加工出740~820 nm的范围内任意波长的光开关。通过引入金属波导滤波器,实现了抽运光与信号光的分离,排除了抽运光对信号光以及后续光路的影响。运用时域有限差分法模拟计算,得到开关的阈值为50 MW/cm²,消光比达到7.32 dB,响应时间小于2 ps。其快速、紧凑的优势使其在未来的集成光路上会有很大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 W L Barnes, A Dereux, T W Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- 2 S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 He Zhiyu, Jiao Hongfei, Cheng Xinbin, *et al.*. Design of reflective multichannel filter based on characteristics of photonic bands gap [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0231002.
贺芝宇, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0231002.
- 4 Zhao Yang, He Jianfang, Yang Rongcao, *et al.*. Two-dimensional surface plasmonic grating optical absorber with gradually varying structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0223005.
赵 阳, 何建芳, 杨荣草, 等. 结构渐变的二维表面等离子体光栅光吸收器[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0223005.
- 5 A V Krasavin, N I Zheludev. Active plasmonics: Controlling signals in Au/Ga waveguide using nanoscale structural transformations [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(8): 1416-1418 .
- 6 Li Chunfei. All-optical switches based on nanophotonics [J]. *Physics*, 2012, 41(1): 9-19.
李淳飞. 纳米光子学全光开关研究进展[J]. *物理*, 2012, 41(1): 9-19.
- 7 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205006.
刘 毅, 全晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205006.
- 8 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123002.
黎 磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123002.
- 9 C J Min, P Wang, C C Chen, *et al.*. All-optical switching in subwavelength metallic grating structure containing nonlinear optical materials [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(8): 869-871.
- 10 Harald Dittlacher, Andreas Hohenau, Dieter Wagner, *et al.*. Silver nanowires as surface plasmon resonators [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 95(25): 257403.

- 11 Lin Gu, Wilfried Sigle, Christoph T Koch, *et al.*. Resonant wedge-plasmon modes in single-crystal line gold nanoplatelets [J]. *Phys Rev B*, 2011, 83(19): 195433.
- 12 Zhang Xiaoyang, Zhang Tong, A Hu, *et al.*. Controllable plasmonic antennas with ultra narrow bandwidth based on silver nano-flags [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(15): 153118.
- 13 Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao, *et al.*. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6): 728-734.
顾国昌, 李宏强, 陈洪涛, 等. 一维光子晶体材料中的光学传输特性[J]. *光学学报*, 2000, 20(6): 728-734.
- 14 Meng Qingsheng, Ouyang Zhengbiao, Wang Jong C, *et al.*. Mode types and their related properties of one-dimensional photonic crystal resonant cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1290-1294.
孟庆生, 欧阳征标, 王仲淳. 一维光子晶体谐振腔的模式类型及其性质[J]. *光学学报*, 2007, 27(7): 1290-1294.
- 15 H Lu, X M Liu, Y K Gong, *et al.*. Optical bistability in metal-insulator-metal plasmonic Bragg waveguides with Kerr nonlinear defects [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(10): 1307-1311.
- 16 H B Liao, R F Xiao, J S Fu, *et al.*. Origin of third-order optical nonlinearity in Au:SiO₂ composite films on femtosecond and picosecond time scales [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(5): 388-390.
- 17 J Park, H Kim, B Lee. High order plasmonic Bragg reflection in the metal-insulator-metal waveguide Bragg grating [J]. *Opt Express*, 2008, 16(1): 413-425.
- 18 J Park, H Kim, I M Lee, *et al.*. Resonant tunneling of surface plasmon polariton in the plasmonic nano-cavity [J]. *Opt Express*, 2008, 16(21): 16903-16915.
- 19 Liu Qineng. Modulation on widening photonic forbidden band of one-dimensional photonic crystal by optical thickness [J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition*, 2003, 23(3): 285-288.
刘启能. 光学厚度对一维光子晶体禁带宽度的调制[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2003, 23(3): 285-288.
- 20 Y Matsuzaki, T Okamoto, M Haraguchi, *et al.*. Characteristics of gap plasmon waveguide with stub structures [J]. *Opt Express*, 2008, 16(21): 16314-16325.
- 21 A F Oskooi, D Roundy, M Ibanescu, *et al.*. MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method [J]. *Computer Physics Communications*, 2010, 181(2): 687-702.
- 22 H B Liao, R F Xiao, J S Fu, *et al.*. Large third-order optical nonlinearity in Au:SiO₂ composite films near the percolation threshold [J]. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(1): 1-3.

栏目编辑: 王晓琰