

# 低损耗表面等离子体波导慢光传输的研究

陈佳佳 盛朋驰 杨骏风 陈明 陈辉

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

**摘要** 采用介质层加载的方法使表面等离子体激元(SPPs)在传输过程中获得较低的传输损耗。通过比较介质-金属-介质(IMI)和介质加载的波导,证明了此介质加载的方法可以有效地减小表面等离子体的损耗,获得更低的传播速度。然后,在硅介质和金属银中间加载一层二氧化硅来提高介质光栅中表面等离子体慢波传输的性能。通过时域有限差分法证明所提出的结构使得不同频率的入射波产生的SPPs停留在不同高度的介质中,获得很小的传播速度,并且有很小的传输损耗和强的亚波长限制。此结构在光存贮和光通信方面有着很好的应用。

**关键词** 集成光学;表面等离子体激元;时域有限差分法;色散;慢光;低损耗

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.112401

## Study on Slow Light of Surface Plasmon Waveguide with Low Loss

Chen Jiajia Sheng Pengchi Yang Junfeng Chen Ming Chen Hui

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

**Abstract** The method of the dielectric loaded is presented to obtain low loss in propagation of the surface plasmon polaritons (SPPs). Comparing the conventional insulator-metal-insulator (IMI) waveguide and the waveguide with dielectric loaded, it is demonstrated that the method of dielectric loaded can reduce the loss in propagation and achieve smaller group velocity. A silica layer between a silver film and silicon layer is employed to improve the propagation performance of SPPs in the "trapped rainbow" system based on graded grating structure. Time domain finite difference simulation demonstrates that the improved structure is able to localize light of different frequencies at different positions and offers the advantage of supporting slow SPPs with a much lower propagation loss and deeper sub-wavelength confinement. The proposed structure has a wide range of applications in optical processing and optical communication.

**Key words** integrated optics; surface plasmon polarizations; time domain finite difference; dispersion; slow light; low loss

**OCIS codes** 240.6680; 240.6690; 240.6695

## 1 引言

表面等离子体激元(SPPs)是在介电常数小于零的金属和介电常数大于零的介质界面上与金属中的自由电子形成的一种非辐射局域电磁波,沿着导体表面传播,在垂直导体表面上呈指数衰减,因此,它是被束缚在金属表面上传输的一种表面波<sup>[1]</sup>。由于SPPs能克服衍射极限,在纳米光子集成回路中具有潜在的应用。而SPPs波导作为传输表面等离子体的重要器件,在理论和实验中被大量研究,例如:波长分束器、反射器、滤波器、传感器、表面等离子体透镜、全光转换器<sup>[2-6]</sup>。

SPPs慢光被认为是在纳米集成回路中最具有潜在应用的技术之一,可应用在光学记忆、信息存储、光存储器等,SPPs不仅能够以亚波长尺寸下传输光信息,还能够以相当小的传播速度进行传输,增加了传播时

收稿日期: 2015-05-12; 收到修改稿日期: 2015-06-03; 网络出版日期: 2015-09-09

基金项目: 广西自然科学基金(2014GXNSFAA118283)、2014年主任基金(GXKL0614104)

作者简介: 陈佳佳(1989—),男,硕士研究生,主要从事光通信技术及光电器件方面的研究。

E-mail: 1302202013@mails.guet.edu.cn

导师简介: 陈辉(1976—),男,博士,副教授,主要从事电磁波和光波的目标散射特性、复杂环境下的电波传播预测技术、微波光子学以及太赫兹散射等方面的研究。E-mail: chenhui02@guet.edu.cn(通信联系人)

间,有利于光信息的处理。由于SPPs是被束缚在金属表面上传输的局域电磁波,那么在较低的传播速度下,增加了SPPs与金属的接触时间,金属的欧姆损耗增加,因此,传播速度和欧姆损耗在SPPs传播中存在内在矛盾<sup>[7]</sup>。因此,设计一种同时具有较低传播速度和较低传播损耗的SPPs波导格外重要<sup>[8-10]</sup>。之前的SPPs慢光波导,例如金属光栅,在太赫兹频率下获得了相当低的传播速度,但是由于金属光栅中SPPs与金属的接触面积大,接触时间长,SPPs的损耗明显较大,因此,虽然理论上能够得到较低的传播速度,但是由于较大的损耗以致于SPPs不能够长距离传输,那么理论上金属光栅中所得到的传播速度也就失去了本身的价值。近年来SPPs介质光栅波导引起广泛的关注,相继提出了各种不同的介质光栅波导,使得SPPs慢光又一次得到飞跃式发展,可以实现在较长的传播距离下实现慢光传输<sup>[11-12]</sup>。接着,为了进一步降低SPPs的传播速度,实现更低速度的传播,提出了一种介质层加载介质光栅波导,使得传播损耗又大大减小,更低传播速度的SPPs实现其应用价值<sup>[13-15]</sup>。本课题组对慢光波导研究的重点不是如何能够获得更低的传播速度,而是如何降低SPPs的传播损耗,只有实现低的传播损耗,低的传播速度才能得以应用<sup>[16-17]</sup>。

本文以介质-金属-介质(IMI)波导为基本单元设计了一种介质光栅,此结构采用了给IMI波导中的金属两侧分别加载一层薄的二氧化硅介质层,使得电磁波的传输主要集中在硅介质中,与金属的接触相对减小,得到更小的传播损耗,实现低损耗低速度传播。通过时域有限差分法(FDTD)证明所提出的结构使得不同频率的入射波所产生的SPPs停留在不同高度的介质中,而不是向前超快地传输,获得很小的群速度,并且有很小的传输损耗和强的亚波长限制<sup>[18-20]</sup>。此结构在光存贮和光通信方面有着很好的应用前景<sup>[21-22]</sup>。

## 2 结构和理论

图1(a)为普通的IMI波导示意图,宽度为500 nm,上下硅的厚度均为220 nm;(b)结构在普通的IMI结构中的金属两侧分别增加了一层厚度为20 nm的二氧化硅介质层,即为介质层加载的IMI波导,宽度为500 nm,二氧化硅的厚度为20 nm,硅的厚度为200 nm。(c)和(d)是以(b)为基本结构单元设计的一种介质光栅慢光结构。(c)为介质加载光栅结构,金属银的厚度为20 nm,硅为200 nm,二氧化硅为20 nm,二氧化硅和硅的宽度为100 nm,中间的空气层为200 nm;(d)为介质加载递增光栅,硅介质高度为40 nm,以10 nm递增,中间的介质宽度为100 nm,介质之间的空气宽度为200 nm,二氧化硅厚度为20 nm。

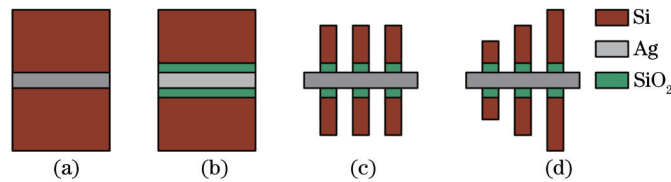


图1 (a) 普通的IMI波导、(b) 介质层加载的IMI波导、(c) 介质加载光栅结构、(d) 介质加载递增光栅示意图

Fig.1 Schematic diagrams of (a) a conventional IMI waveguide, (b) IMI waveguide with the dielectric layers loaded, (c) grating structure with the dielectric layers loaded and (d) graded grating structure with the dielectric layers loaded

SPPs是金属表面的自由电子在入射光的照射下所形成的电子疏密波,这里的金属为贵金属材料。文中所提出的结构中金属为银,相对介电常数具体见(1)式:

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

式中  $\varepsilon_\infty = 3.8$  为在无限的角频率下的介电常数,  $\omega_p$  是等离子体频率,大小为9.1 eV,代表自由导体电子共振的自然频率,  $\gamma = 0.018$  eV 代表电子共振的损耗频率,  $\omega$  为真空中入射波的角频率。根据(1)式可计算出波长为1550 nm时,金的相对介电常数  $\varepsilon_{Au} = -115 + 11.3i$ , 银的相对介电常数  $\varepsilon_{Ag} = -129 + 3.3i$ , 可知银的相对介电常数虚部较小,再加上纳米器件的制作成本,因此最终选择的金属为银。

首先研究了在不同频率下的模场分布,求出其有效系数  $n_{\text{eff}}$ , 然后根据<sup>[23]</sup>:

$$\beta_{\text{SPP}} = n_{\text{eff}} \cdot k_0 = n_{\text{eff}} \cdot 2\pi/\lambda, \quad (2)$$

式中  $\beta_{\text{SPP}}$  和  $n_{\text{eff}}$  分别为SPPs在波导中的传播常数和有效折射率。通过(2)式结合  $c = f\lambda$ ,  $\omega = 2\pi f$ , 可以得出角频率和传播常数之间的关系,即色散关系,再根据  $v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$ , 因此,可以求出传播速度。

$$L = \lambda / 4\pi \operatorname{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (3)$$

式中  $L$  为电磁波的传播长度,  $\operatorname{Im}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率的虚部。令  $\alpha$  为损耗因子, 根据

$$L = \frac{1}{2\alpha}, \quad (4)$$

可求出损耗因子。

### 3 数值仿真结果分析

首先, 对 IMI 波导和介质加载波导的传播性能进行数值分析。选取波长为 1550 nm 的入射波激励, 所产生的 SPPs 的电场分布如图 2 所示, 2 种波导在相同的条件下进行计算, 只是在图 2(b) 中将与金属上下相邻的厚度为 20 nm 的硅变为二氧化硅, 其他条件均相同。从图 2 中可以明显看出, 普通的 IMI 波导中所产生的 SPPs 与金属的接触面积相对较大, 那么损耗相对较大; 加载介质层的波导中, 紧贴着金属两边的二氧化硅将所产生的场与金属隔离, 使得场主要集中在远离金属的介质硅中, 因此金属损耗减小。另外, 从图 2 中可以看出, 加载介质层的波导中的最大电场强度是普通 IMI 结构电场的 7 倍左右, 因为高频电磁波会趋向于相对介电常数大的介质中传播, 硅的相对介电常数大于二氧化硅的相对介电常数, 因此场会集中在介质硅中传输而不是在二氧化硅中传输, 由于图 2(b) 中硅的面积相对较小, 因此所产生场的面积也相对小, 场比较集中, 因此, 最大场强的值相对较大, 场的约束性强。

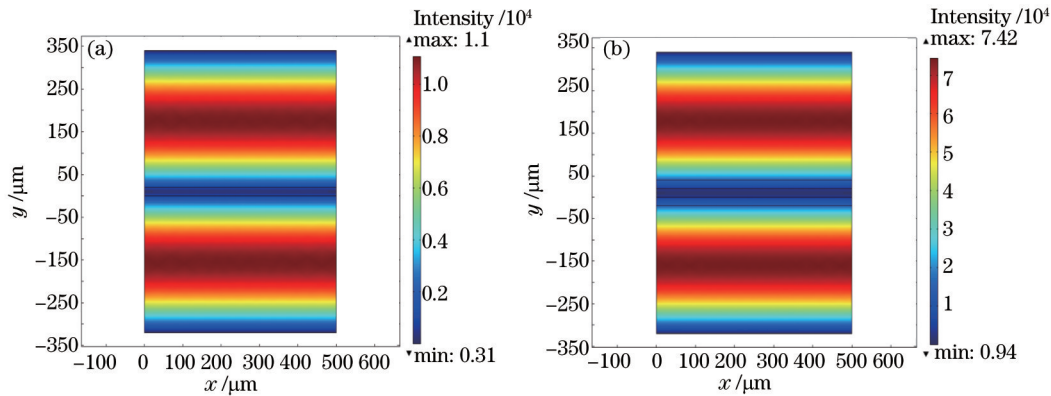


图 2 2 种波导在入射波为 1550 nm 时的模场分布图。(a) 普通 IMI 结构的电场分布; (b) 介质加载波导的电场分布图

Fig.2 Electric field distributions of the two structures at the wavelength of 1550 nm. (a) Electric field distribution of IMI; (b) electric field distribution of the structure with the dielectric layers loaded

这里的 IMI 波导金属上下两侧的介质相同, 并且中间的金属厚度很小, 因此, 理论上支持长程表面等离子体(LRSPs)的传播, 表 1 为 2 种波导在入射波长 1550 nm 下所得到的传播性能, 介质层加载波导的有效折射率的实部和虚部均小于普通的 IMI 波导, 而实部代表电磁波的波导色散, 虚部代表电磁波的损耗, 并且通过计算得出加载介质层的波导传播距离更长, 衰减系数更小, 模式面积稍小, 因此, 加载介质层的方法可以有效地提高 SPPs 的传播性能。

表 1 2 种波导的传播性能

Table 1 Propagation performance of two waveguides

Waveguide type	$\operatorname{Re}(N_{\text{eff}})$	$\operatorname{Im}(N_{\text{eff}}) / 10^{-4}$	Transmission distance $L / \mu\text{m}$	Attenuation coefficient $\alpha / (10^2 / \text{m})$	Model area $A_m / (10^{-13} \mu\text{m}^2)$
IMI	2.522	1.014	1216.9	4.1	2.13
Dielectric layers loaded	2.514	0.9156	1347.8	3.7	2.12

基于介质层加载的 LRSPs 波导设计一种介质光栅结构, 如图 1(c) 所示, 此结构所产生的 SPPs 会被束缚在介质硅的栅条中而向前传播, 空气和硅为不同材料的介质, 特性阻抗不匹配, SPPs 会经过多次反射后向前传播, 因此, 传播速度会大大降低。

图 3 为等高介质光栅中的 SPPs 的电场密度分布图, 图为 2 个周期, 在  $x$  方向上设置为周期边界条件。整个 SPPs 的传播都被二氧化硅加载层与金属隔开, 能实现低损耗低速度的传播。

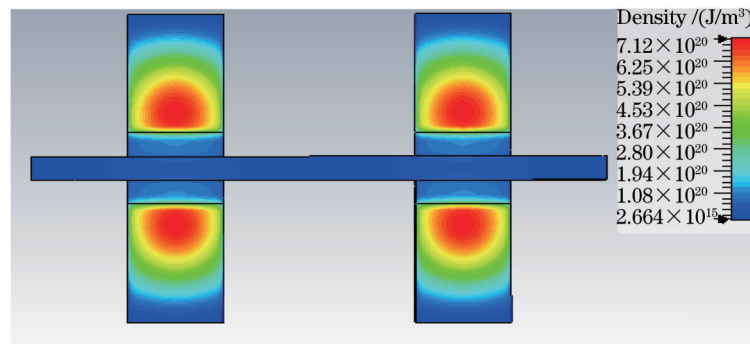
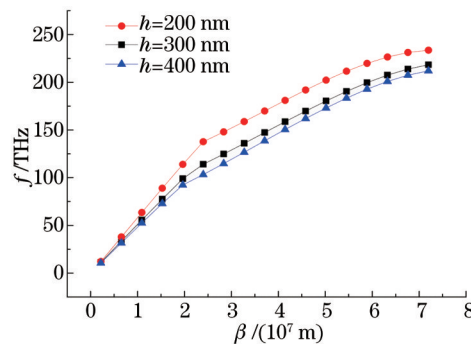


图3 介质光栅电场密度分布图

Fig.3 Electric field density distribution of the dielectric grating

由图4可知,截止频率随着硅的高度 $h$ 的增加而减小,而3条色散曲线的平滑程度近似相等,也就是说有着近似相等的传播速度,只是速度所对应的频率不相等,这是由于不同结构下同样的传播常数得到不同的本征频率。由公式 $v_g = d\omega/d\beta$ ,获得群速度随频率的变化曲线,如图5所示,硅的高度 $h$ 为400 nm,在220 THz左右,群速度的最小值为0.01倍的光速,但是在最小速度对应的频率的损耗也相当大,因此,在实际中能够获取的最小速度一般大于理论上的最小速度,超过了截止频率220 THz, SPPs不再向前传播。

图4 等介质光栅的色散曲线,硅的高度 $h$ 分别取200、300、400 nmFig.4 Dispersion curves of dielectric grating when the heights  $h$  of silicon are 200, 300, 400 nm

想要获得更低的传播速度,就必须得克服 SPPs 传播损耗的问题,只有降低 SPPs 的传播损耗,更低的传播速度才能实现,否则获得的低的传播速度会由于损耗大的缘故而失去现实意义,因此,在设计 SPPs 慢光波导的关键不是如何降低 SPPs 的传播速度,而是减小 SPPs 的传播损耗。本文基于介质加载的 LRSPs 而设计的介质光栅有较低的传输损耗,能够使得更低的传播速度得以实现。在之前的金属光栅中,虽然获得了相当的传播速度,但是由于金属光栅中的 SPPs 与金属接触面积相当大,金属的欧姆损耗大,因此,在获得低的传播速度的同时增加了 SPPs 的传播损耗,使得低速度的 SPPs 不能够长距离的传输,那么也就失去了 SPPs 在光通信中应用中的实际意义。因此,本文所设计结构的思想是以降低 SPPs 的传播损耗为重点而设计 SPPs 慢光波导,真正意义上实现了 SPPs 的慢光传输。图6为 SPPs 的损耗因子随频率的变化曲线,当频

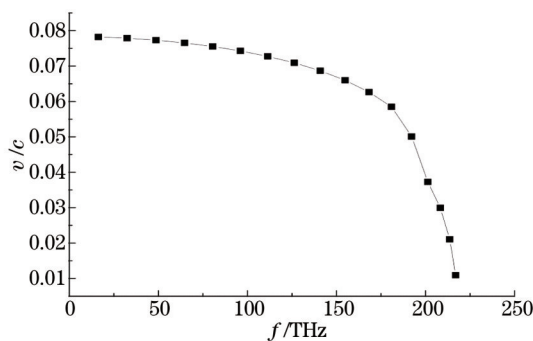


图5 群速度随着频率的变化

Fig.5 Dependence of group speed on frequency

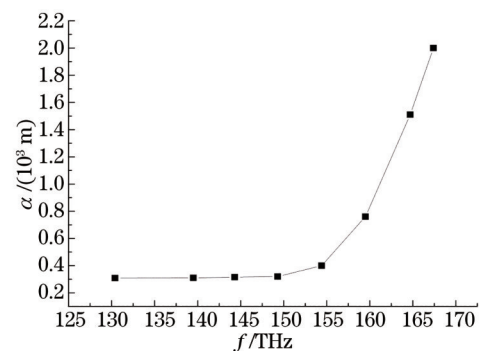


图6 损耗因子随着频率的变化

Fig.6 Dependence of loss factor on frequency

率大于 170 THz 时, 损耗急剧增加, 这里仅为 130~170 THz 范围内损耗因子的变化趋势。低的群速度和低的损耗因子为 SPPs 传播中的一对矛盾, 根据需求可以对两者进行取舍。由于群速度和损耗因子会随着介质光栅的栅条高度和频率的变化而变化, 因此, 在实际的应用中, 可根据需求选择合适的栅条高度和相应的频点来对传播速度和损耗因子进行取舍。

图 7 为递增的介质光栅, 结构如图 1(d) 所示, 在不同频率的入射波下所产生 SPPs 的电场密度分布图, 可见不同频率的入射波所产生的 SPPs 被束缚在不同高度的栅条中, 而不是向前传播, 因此有效地降低了宽频带下 SPPs 的传播速度, 并且由于二氧化硅加载层的作用以及 LRSPs 产生的缘故, 可以降低 SPPs 的传播损耗, 使得更低的传播速度得以实现。

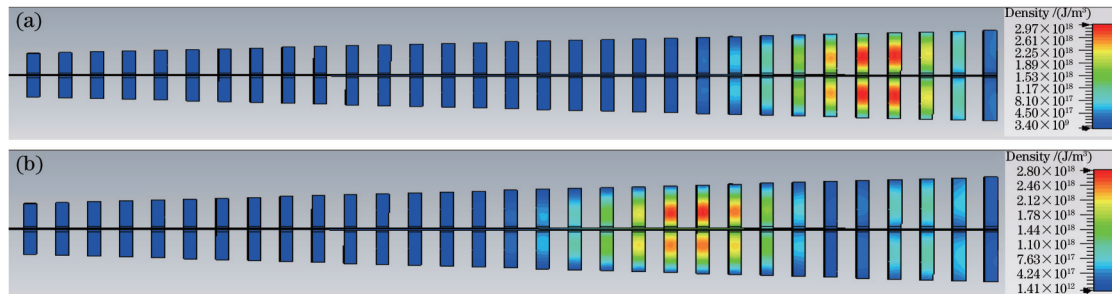


图 7 分别为递增介质光栅在 (a) 129 THz 和 (b) 123 THz 时的电场密度分布图

Fig.7 Electric field density distributions of grating at (a) 129 THz and (b) 123 THz

## 4 结 论

SPPs 的慢光传输作为最有前景的技术之一, 可以在纳米集成回路中突破衍射极限以超低速度传播, 使得光信息能够被更好地处理。从降低 SPPs 传播损耗的角度来有效降低传播速度, 在 LRSPs 波导的基础上采用了介质层加载的方法设计了一种 SPPs 介质光栅结构, 此结构有较小的传播损耗, 所产生的 SPPs 被约束在远离金属的硅介质中, 同时具有低损耗和低传播速度 2 个优势, 接着设计了递增介质光栅, 不同频率的入射波所产生的 SPPs 被约束在不同高度的硅介质栅条中, 而不是快速地向后传播, 因此, 降低了传播速度。又由于介质层加载的缘故, 使得损耗因子降低, 故而使得更小的传播速度实现应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 William L Barnes, Alain Dereux, Thomas W Ebbesen. Surface plasmon sub-wavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- 2 Wang Jicheng, Liu Hongjiao, Cai Zengyan, *et al.*. Design of surface plasmon dichroic splitter with two metallic slits[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 102301.  
王继成, 刘红娇, 蔡增艳, 等. 双缝波导结构表面等离子体可见光分束器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 102301.
- 3 Wang Guoxi, Lu Hua, Liu Xueming, *et al.*. Tunable multi-channel wavelength demultiplexer based on MIM plasmonic nanodisk resonators at telecommunication regime[J]. Opt Express, 2011, 19(4): 3513-3518.
- 4 Yun Bin, Hu Guohua, Cui Yiping. Resonant mode analysis of the nanoscale surface plasmon polariton waveguide filter with rectangle cavity[J]. Plasmonics, 2013, 8(2): 267-275.
- 5 Luo Xin, Zou Xihua, Wen Kunhua, *et al.*. Narrow-band filter of surface plasmon based on dual-section metal-insulator-metal structure[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123003.  
罗 昕, 邹喜华, 温坤华, 等. 双节 MIM 结构表面等离子体窄带光学滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123003.
- 6 Chen Xiaolong, Luo Yunhan, Xu Mengyun, *et al.*. Refractive index and temperature sensing based on surface plasmon resonance fabricated on a side-polished fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206005.  
陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 等. 基于侧边抛磨光纤表面等离子体共振的折射率和温度传感研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206005.
- 7 L Chen, G P Wang, X Li, *et al.*. Broadband slow-light in graded-grating-loaded plasmonic waveguides at telecom frequencies[J]. Appl Phys B, 2011, 104(3): 653-657.
- 8 Gan Qiaoqiang, Fu Zhan, Ding Yujie, *et al.*. Ultrawide-bandwidth slow-light system based on THz plasmonic graded metallic grating structures[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(25-27): 256803.

- 9 L Wang, L L Wang, Y Zeng, *et al.*. Trapping of surface plasmon polaritons in a multiple-teeth-shaped waveguide at visible wavelengths[J]. *Appl Phys B*, 2011, 103(4): 883–887.
- 10 Gan Qiaoqiang, Filbert J Bartoli. Graded metallic gratings for ultrawideband surface wave trapping at THz frequencies [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2011, 17(1): 102–109.
- 11 Xu Yun, Zhang Jing, Song Guofeng. Slow surface plasmons in plasmonic grating waveguide[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(1): 410–413.
- 12 Zhang Jing, Cai Likang, Bai Wenli, *et al.*. Flat surface plasmon polariton bands in Bragg grating waveguide for slow light [J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(14): 2030–2036.
- 13 Li Chunlei, Qi Dawei, Xin Jiangbo, *et al.*. Metal-insulator-metal plasmonic waveguide for low-distortion slow light at telecom frequencies[J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(8): 627–630.
- 14 Zeng Chao, Cui Yudong. Low-distortion plasmonic slow-light system at telecommunication regime[J]. *Opt Commun*, 2013, 294(5): 372–376.
- 15 Zeng Chao, Cui Yudong. Rainbow trapping of surface plasmon polariton waves in metal-insulator-metal graded grating waveguide[J]. *Opt Commun*, 2013, 290(1): 188–191.
- 16 Li Chunlei, Zhang Xueru, Wang Yuxiao, *et al.*. Precise control of group velocity by pulsewidth in a plasmonic superlattice [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(17): 1243–1245.
- 17 Kang Zhiwen, Lin Weihua, Wang Guoping. Dual-channel broadband slow surface plasmon polaritons in metal gap waveguide superlattices[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(10): 1944–1948.
- 18 Min Seok Jang, Harry Atwater. Plasmonic rainbow trapping structures for light localization and spectrum splitting[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 207401.
- 19 Gan Qiaoqiang, Gao Yongkang, Kyle Wagner, *et al.*. Experimental verification of the rainbow trapping effect in adiabatic plasmonic gratings[J]. *Advanced Materials*, 2011, 108(13): 5169–5173.
- 20 Hua Gao, Claire Gu, Zheng Zhiyuan, *et al.*. Transmission forbiddance and absorption enhancement in a sub-wavelength metallic cross-slit[J]. *Opt Commun*, 2014, 320(6): 49–55.
- 21 Takasumi Tanabe, Masaya Notomi, Eiichi Kuramochi, *et al.*. Large pulse delay and small group velocity achieved using ultrahigh- $Q$  photonic crystal nanocavities[J]. *Opt Express*, 2007, 15(12): 7826–7839.
- 22 Shen Yun, Wang Guoping. Gain-assisted time delay of plasmons in coupled metal ring resonator waveguides[J]. *Opt Express*, 2007, 17(15): 12807–12812.
- 23 Li Chunlei, Zhang Xueru, Wang Yuxiao, *et al.*. Slow surface plasmon polaritons with a large normalized delay bandwidth product in an ultracompact metal gap superlattice[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(7): 1993–1996.

栏目编辑: 王晓球