

# 基于表面等离激元解复用器结构的双通道全光开关

林蓉, 钱文超, 商云鹏, 王绶琦, 刘诚, 钱维莹, 孔艳

江南大学理学院, 江苏 无锡 214122

**摘要** 为了实现紧凑结构下光的主动调控,设计了一种基于表面等离激元解复用器结构的双通道全光开关。该器件由金属-克尔非线性材料-金属的波导结构和谐振腔组成,具有主动光控功能。通过对该开关结构进行优化,实现了735 nm抽运光调控1310 nm信号光。该信号光在左右两个端口可实现输出与截止,消光比可达到29.4 dB,开关响应时间可达到50 fs。该双通道开关具有结构简单紧凑、易于集成、响应速度快等优点,将在纳米集成光学中具有重要的应用价值。

**关键词** 表面光学; 全光开关; 表面等离激元; 解复用器; 时域有限差分方法; 非线性材料

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.022401

## Dual-Channel All-Optical Switch Based on Plasmonic Demultiplexer Structure

Lin Rong, Qian Wenchao, Shang Yunpeng, Wang Shouyu,

Liu Cheng, Qian Weiyong, Kong Yan

School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

**Abstract** To realize the active light control with compact structure, we design an optical switch based on plasmonic demultiplexer. The device is composed of metal-Kerr nonlinear material-metal waveguide and resonant cavities, providing the function of active optical regulation. With the multiple parameter optimization, the signal with wavelength of 1310 nm can be controlled by pump light with wavelength of 735 nm. The signal can realize output and cut off at two output. The directional extinction ratio can reach to 29.4 dB and the response time is only 50 fs. The dual-channel all-optical switch has the advantages of simple and compact structure, easy integration, fast response, and so on, it will has importance application in naono-integrated optics.

**Key words** optics at surfaces; all-optical switch; surface plasmon polariton (SPP); demultiplexer; finite difference time domain (FDTD); nonlinear material

**OCIS codes** 240.6680; 130.3120; 130.4815

## 1 引言

随着光子晶体、超材料、超表面、硅光子学等技术的发展,器件小型化正成为光学技术革新的新方向。金属与电介质表面受激产生的表面等离激元(SPP)是光学器件小型化不可或缺的技术手段,它所具有的特殊性质使亚波长光学摆脱了衍射极限的限制<sup>[1]</sup>,具有极大的场增强效应<sup>[2]</sup>,这使得其在纳米

集成光子器件中具有重要的应用价值和潜力。很多研究小组展开了基于SPP的一系列光学器件的研究,如传感器<sup>[3-4]</sup>、光吸收器<sup>[5]</sup>、滤波器<sup>[6-7]</sup>、超透镜<sup>[8-10]</sup>、光栅<sup>[11-12]</sup>等。虽然这些基于SPP的光学器件在微纳光学系统中可以实现耦合、光传输与分选等功能,但是其功能相对单一,更重要的是这类装置皆为“被动器件”,无法实现光的主动调控,这不仅限制了这类“被动器件”的应用领域,还限制了微纳光

收稿日期: 2017-07-08; 收到修改稿日期: 2017-08-16

基金项目: 江南大学校级大学生创新训练计划资助项目(2016338Y)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20130162)

作者简介: 林蓉(1996—),女,本科生,主要从事微纳光学方面的研究。E-mail: 545136268@qq.com

导师简介: 孔艳(1979—),女,博士,副教授,主要从事微纳光学、非线性光学等方面的研究。

E-mail: ykong80@163.com(通信联系人)

学系统的功能。

在进一步丰富微纳器件及微纳光学系统的功能方面,已有一系列基于不同主动光学调控方法的微纳结构与器件的研究成果发表。作为一种经典的主动调控方案,波长调控已广泛应用于各类微纳器件中。Liu等<sup>[13]</sup>通过在金属-介质-金属(MIM)波导中合理设计共振腔,实现了两种不同波长信号光的双通道输出。基于表面光栅结构,Xu等<sup>[14]</sup>实现了两种不同波长信号在相对方向的耦合。Tanemura等<sup>[15]</sup>通过表面材料结构设计,使多个波长的信号光聚焦于不同位置。这些基于波长调控的器件不仅可以实现波长分选、多通道耦合等传统功能,还可以通过不同光信号的输入控制光的输出通道或方向,从而实现对光信号的逻辑控制。然而波长调控依赖于多个光源,这无疑增加了系统的复杂度。随着Lee等<sup>[16-18]</sup>先后提出的非对称耦合结构,偏振调控逐渐成为光学主动调控中的重要思路。虽然偏振调控只需要单一光源,且生成相对容易,但是光场轨道角动量具有更广的选择范围,因而也具有更为广阔的应用前景。通过在激发光中附加具有不同拓扑核的涡旋相位,Mei等<sup>[19]</sup>设计了半圆环结构,实现了不同位置的光场聚焦。Liu等<sup>[20-21]</sup>设计了狭缝结构,在具有特定拓扑核和相反涡旋方向的光场激发下,该表面结构可以分别实现两相对方向的耦合。此外,Liu等<sup>[22-23]</sup>还基于光场自旋与轨道角动量的主动调控技术实现了四通道信号的控制。虽然通过外加涡旋光可以更加灵活地实现光场的主动调控,但是涡旋光的生成更为复杂。相对于波长调控、偏振调控与涡旋光调控,强度调控结构简单,更实现容易,并且具有更好的系统集成潜力。该调控方式主要通过在外加抽运光源作用下改变非线性材料的介电常数,最后通过微纳器件设计实现主动调控。其中,Lu等<sup>[24-26]</sup>设计的波导结构可以实现光控信号的输出与截止,但是这类器件仅有一个通道,限制了其在逻辑光路等应用中的潜力。

为了实现基于强度调控的多通道光学器件,本文提出了一种基于MIM波导与谐振腔结构的双通道全光开关。通过在波导和谐振腔中填充非线性材料,可以实现735 nm抽运光控制1310 nm信号光在左右双向通道的输出与截止,而且消光比可达29.4 dB。为了分析所设计的光开关的性能,采用时域有限差分(FDTD)方法对其进行数值模拟。结果表明,该结构简单的全光开关不仅能够实现双通道的光开关功能,而且具有响应速度快和集成能力强

的优势,其横向尺寸约为2000 nm,响应时间只有50 fs。

## 2 双通道全光开关结构与原理

图1为基于表面等离子激元解复用器结构的双通道全光开关,该全光开关由一个T型的波导和两个方形谐振腔组成。图1(a)给出了该光开关的结构细节,抽运光和信号光从端口0输入,通过宽度为 $w$ 的波导后,分别从端口1和2输出。宽度分别为 $H_1$ 和 $H_2$ 的方形谐振腔对称地放置在T型波导两边,并通过两条宽度为 $d$ 、高度为 $l$ 的窄波导与主波导相连接,两谐振腔之间的距离为 $L$ 。基于有限时域差分方法的FDTD solution仿真软件用于研究该光开关的特性。进行数值模拟时,横向 $x$ 的空间步长 $\Delta x$ 和纵向 $y$ 的空间步长 $\Delta y$ 均为1 nm,时间步长取 $\Delta t = \Delta x / (2c)$ , $c$ 为真空中的光速; $x$ 、 $y$ 方向均采用完全匹配吸收层(PML)消除边界反射的能量。用透射率 $T$ 描述端口1、2的输出光特性,透射率 $T$ 定义为通过波导出射端口的出射功率 $P_{\text{out}}$ 与入射端口的入射功率 $P_{\text{in}}$ 之比,即 $T = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$ 。由于波导的宽度远小于入射波长,因此只有基模 $\text{TM}_0$ 存在于此结构中,其传播常数 $\beta$ 可由以下方程给出<sup>[27]</sup>:

$$k_d \epsilon_m \tanh(k_d w / 2) + \epsilon_d k_m = 0, \quad (1)$$

式中 $\epsilon_d$ 和 $\epsilon_m$ 分别为金属和电解质的介电常数, $k_d = (\beta^2 - \epsilon_d k_0^2)^{1/2}$ 和 $k_m = (\beta^2 - \epsilon_m k_0^2)^{1/2}$ 分别为介电材料和金属区域传播的电磁波波数, $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ 为电磁波在真空中的波数。事实上,方形谐振腔相当于一个Fabry-Perot腔,稳定驻波的波长 $\lambda$ 由满足共振条件的方形谐振腔确定<sup>[28]</sup>:

$$2\pi \bar{n}_{\text{eff}}(l + H) / \lambda = (m + 1/2)\pi, \quad (2)$$

式中 $\bar{n}_{\text{eff}}$ 为方形腔内的平均折射率; $l$ 为连接波导的长度[如图1(a)所示]; $H$ 为方形谐振腔的宽度; $m$ 为Fabry-Perot腔的共振阶数, $m$ 为正整数。因此,共振波长 $\lambda_m$ 为

$$\lambda_m = 2\bar{n}_{\text{eff}}(l + H) / (m + 1/2). \quad (3)$$

值得注意的是,本研究采用Fabry-Perot腔的一阶共振来分析这个解复用器,即 $m = 1$ 。

图1(b)给出了只有信号光输入情况下端口1、2的透射光谱,图1(c)和图1(d)给出了磁场 $|H_z|$ 的分布图。从图1(c)和图1(d)中可以看到,双谐振腔结构引发了透射谱中波峰和波谷的成对出现。根据这个光谱的外形可知此结构可以用于实现光开关。当信号光的透射率在端口1达到最低时,在端口2的透过率就会达到最大值。当波导和谐振腔中介质

的介电常数增大后,端口 1、2 的透射光谱均向右漂移,从而使得端口 1、2 的透射率发生反转,可以实现工作波长在端口 1、2 的导通与截止。虽然解复用器本身可以通过外加抽运光改变非线性材料的介电常数,进而实现信号光的传输与调控,但是如图 1(b)

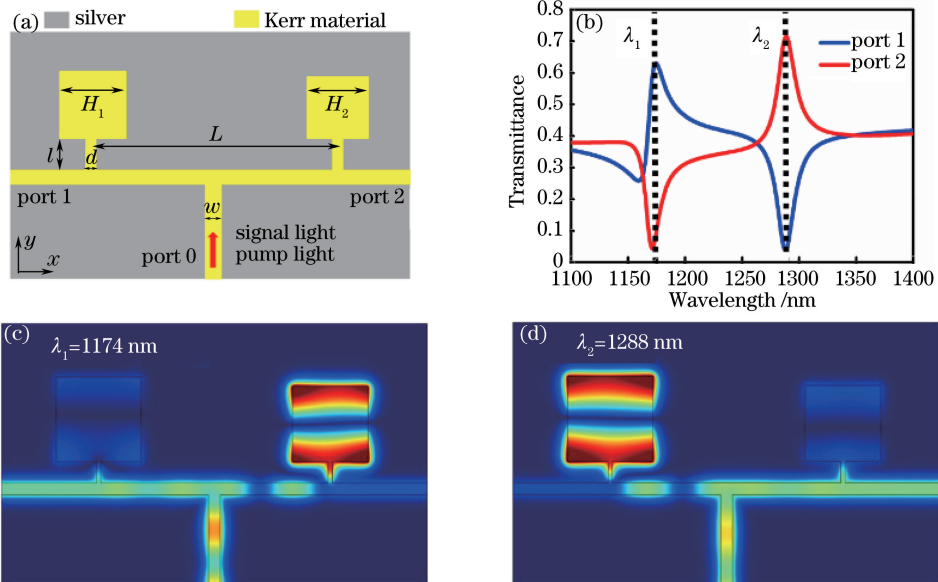


图 1 (a)基于表面等离子激元解复用器的全光开关结构;(b)无抽运光时输出端口的透射光谱;  
(c)  $\lambda_1=1174$  nm 时的磁场分布图;(d)  $\lambda_2=1288$  nm 时的磁场分布图

Fig. 1 (a) Schematic of all-optical switch based on surface plasmonic demultiplexer; (b) transmittance spectra of output port under the condition of without pump light; (c) magnetic field distribution at  $\lambda_1=1174$  nm; (D) magnetic field distribution at  $\lambda_2=1288$  nm

考虑到解复用器的潜在应用,选择光纤通信波段的 1310 nm 光作为信号光。在进行数值模拟计算时,金属材料为银,银材料的介电常数选用 Johnson-Christy 的实验结果<sup>[29]</sup>,波导与方形谐振腔内填充非线性有机聚合物材料,其介电常数  $\epsilon_k$  与入射光强  $E$  有如下关系:

$$\epsilon_k = \epsilon_0 + \chi^{(3)} |E|^2, \quad (4)$$

式中  $\epsilon_0=2.31$  和  $\chi^{(3)}=1.4 \times 10^{-7}$  esu 分别为线性介电常数和三阶非线性响应因子,非线性响应时间为百飞秒量级<sup>[30]</sup>。在数值计算中,相应的参数设置为  $w=50$  nm,  $L=980$  nm,  $l=90$  nm。值得注意的是,信号光的波长主要由方形谐振腔的大小决定,图 2(a)和图 2(b)给出了无抽运光情况下,端口 1 和端口 2 的透射光谱与左侧谐振腔尺寸之间的关系。维持右侧谐振腔的宽度不变,增大左侧谐振腔的宽度  $H_1$ ,端口 1(端口 2)透射光谱的波谷(波峰)发生红移,透射光谱波峰和波谷之间的距离增大,这意味着需要更大的抽运光进行模式调节。尽管较大程度的谱线偏移在有效降低串扰的同时可以提高带宽,但

所示,光谱中峰谷对之间的距离依旧很宽,这就需要采用高强度的抽运光对其进行调控。另外,应该根据现有光学器件的兼容性选择工作波长。因此,本课题组对设计参数,例如抽运光强度阈值、工作波长等进行了优化。

是它需要更高的抽运光强度,也就意味着需要更复杂的抽运源。图 2(c)、(d)给出了无抽运光情况下,端口 1 和端口 2 的透射光谱与右侧谐振腔尺寸之间的关系。随着右侧谐振腔的尺寸增大,透射光谱的波峰(端口 1)或波谷(端口 2)发生红移。因此,为了平衡抽运光和解复用器的性能,透射谱线向右偏移量设置为 30 nm,所需抽运光强大约为 21 MW/cm<sup>2</sup>。根据信号波长及谱线偏移量的要求选择左侧谐振腔的宽度  $H_1=368$  nm,右侧谐振腔的宽度  $H_2=358$  nm。除了谐振腔的尺寸外,连接谐振腔与主波导的细波导的宽度也会对透射光谱谱峰产生细微影响,图 2(e)给出了细波导与透射光谱峰之间的关系。为了维持 1310 nm 工作波长的波峰与波谷之间的距离为 30 nm,选择连接波导的宽度  $d=20$  nm。图 2(f)给出了有和无抽运光情况下端口 2 的透射光谱,可知 735 nm 附近端口 2 的透射率极低,端口 1 亦然。可见,即使输出端口没有带通滤波器,也能够满足高消光比的要求。通过多次参数分析与调试得到了图 1 所示的基于表面等离子激元

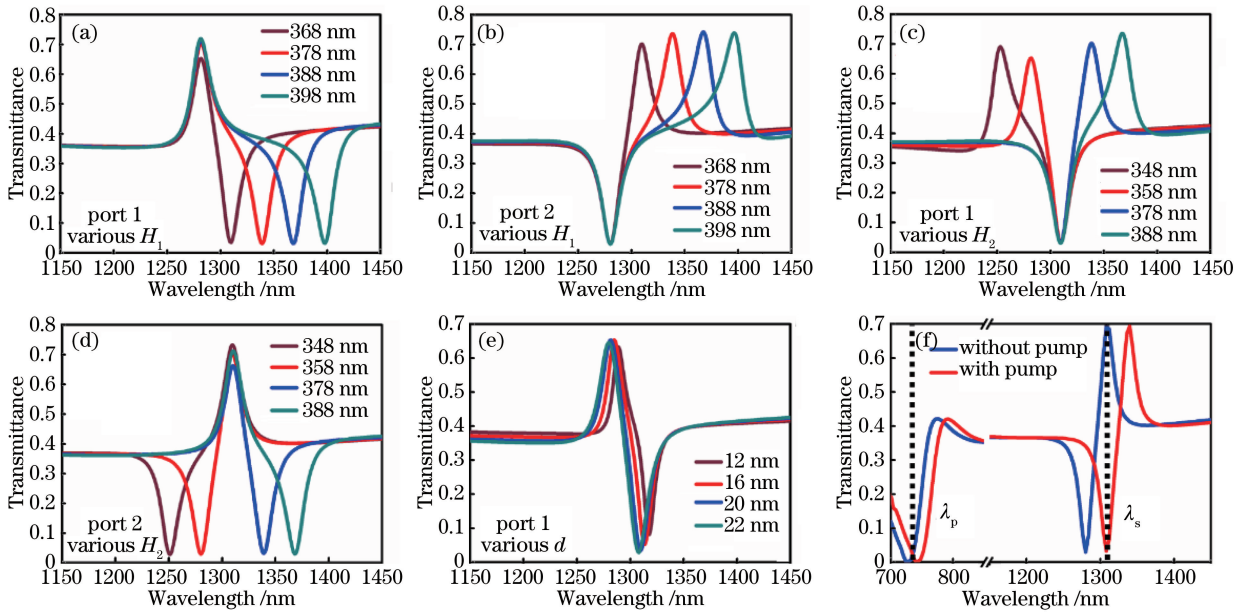


图 2 (a)~(e) 无外加抽运光时不同结构参数对应的端口 1、2 的透射光谱; (f) 有和无外加抽运光情况下端口 2 的透射光谱

Fig. 2 (a)-(e) Transmittance spectra of port 1 and port 2 with different structure parameters under the condition of without pump light; (f) transmittance spectra of port 2 under the conditions of with and without pump light

解复用器结构的双通道全光开关的所有结构参数:  $w = 50$  nm,  $L = 980$  nm,  $l = 90$  nm,  $d = 20$  nm,  $H_1 = 368$  nm,  $H_2 = 358$  nm, 信号光的波长设置为 1310 nm, 抽运光波长设置为 735 nm. 当抽运光强度为  $21$  MW/cm<sup>2</sup> 时, 光谱峰谷之间的宽度维持在 30 nm 左右.

### 3 数值模拟结果

全光开关结构参数经优化后, 其光开关性能再通过数值模拟进行定量认证. 图 3(a) 为当入射光仅有信号光时, 端口 1 和端口 2 的透射光谱. 模拟结果显示, 当波长为 1310 nm 时, 端口 2 的透射率达到了最大值, 与此同时端口 1 的透射率非常低. 当有抽运光入射时, 整体透射光谱会发生红移, 信号光在端口 1 和端口 2 的透射率也发生反转, 即端口 1 的透射率从 3.5% 提高到 64.9%, 端口 2 的透射率从 70.1% 降低到 3.7%. 图 3(b)、(d) 给出了无和有外加抽运光情况下信号光的磁场分布, 可清晰地显示光开关的效果. 图 3(b) 为没有外加抽运光只有信号光情况下解复用器内的磁场分布, 此时信号光从右侧端口 2 输出. 这时端口 1 信号光处于“关”态, 端口 2 信号光处于“开”态. 当有抽运光从端口 0 处入射后, 信号光从左侧端口 1 输出, 如图 3(d) 所示. 这时端口 1 信号光处于“开”态, 端口 2 信号光处于“关”态. 因为透射光谱的峰与谷之间只有 30 nm, 所以抽运光的强度大约只需要  $21$  MW/cm<sup>2</sup>

就可以实现谱峰到谱谷 (或谱谷到谱峰) 的转变, 其强度小于文献 [24-26] 中所述的强度, 且非常容易得到. 此光开关的消光比  $R_{ex}$  的表达式为<sup>[31]</sup>

$$R_{ex} = 10 \lg (P_{out}^{ON} / P_{out}^{OFF}), \quad (5)$$

式中  $P_{out}^{ON}$  和  $P_{out}^{OFF}$  分别为同一端口有和无外加抽运光情况下的输出光强. 根据 (5) 式以及模拟结果可以得到在  $21$  MW/cm<sup>2</sup> 抽运光强度下端口 1 的光开关消光比为 29.2 dB, 端口 2 的消光比为 29.4 dB. 但在微纳结构加工时, 会不可避免地产生加工误差. 根据本研究提出的结构, 波导对光开关功能的影响有限, 两个微腔的尺寸起主要作用. 但是通过数值计算发现, 当微腔尺寸误差在 5 nm 左右 (相对误差约为 2%) 时, 由加工误差导致的谱线在 1310 nm 处的偏移很小, 基本不会影响该结构的光控功能.

为了更好地显示所设计的全光开关的性能, 对其双稳态行为和时间响应进行定量分析. 图 4 (a) 与 4 (b) 分别为端口 1 和端口 2 处信号光透射率随抽运光增强和减弱的变化规律, 从中可以清晰地观察到因三阶非线性效应而形成的双稳态环. 若调节抽运光的强度, 谐振腔中的空间场强将改变非线性材料的介电常数, 进而影响信号光的透射率. 当抽运光的强度增大时, 初期信号光在端口 1 和端口 2 的透射率变化不大, 但当抽运光的强度增大到  $21$  MW/cm<sup>2</sup> 左右时, 信号光在端口 1 处的透射率迅速增大, 在端口 2 处的透射率迅速减小. 当抽运光强度减小时, 信号光在端口 1 和端口 2 处的透射率

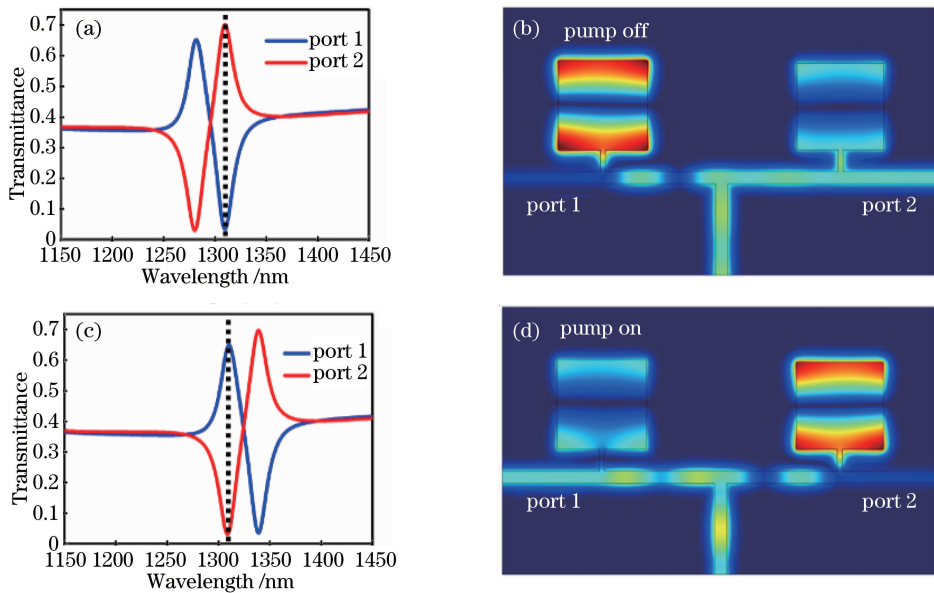


图 3 (a)无外加抽运光情况下的透射光谱;(b)无外加抽运光情况下的磁场分布;  
(c)有外加抽运光情况下的透射光谱;(d)有外加抽运光情况下的磁场分布

Fig. 3 (a) Transmittance spectra without pump light; (b) magnetic field distribution without pump light;  
(c) transmittance spectra with pump light; (d) magnetic field distribution with pump light

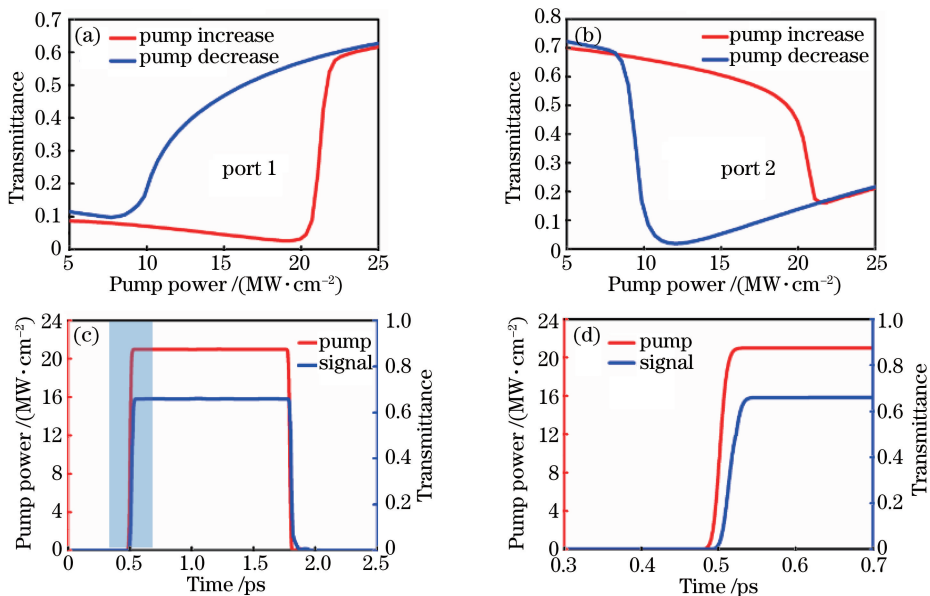


图 4 (a)增大和减小抽运光强度时端口 1 处信号光的透射率;(b)增大和减小抽运光强度时端口 2 处信号光的透射率;  
(c)信号光开关响应时间;(d) 0.3~0.7 ps 的细节放大图

Fig. 4 (a) Transmittance of signal light at port 1 with increasing and decreasing intensity of pump light;  
(b) transmittance of signal light at port 2 with increasing and decreasing intensity of pump light;  
(c) time response of signal light switching; (d) time response from 0.3 ps to 0.7 ps

缓慢减小,当光强减小到  $10 \text{ MW/cm}^2$  左右时,信号光在端口 2 处的透射率迅速增大,同时信号光在端口 1 处的透射率也迅速减小。从双稳态环可以看出,光学双稳态的实现所需的抽运光强度低于  $22 \text{ MW/cm}^2$ 。除此之外,分析了所设计的全光开关

的响应时间。为了确定开关的响应时间,设定抽运光强度为  $22 \text{ MW/cm}^2$ ,持续时间为  $1.3 \text{ ps}$  的方形抽运光与信号光一同输入端口 0。信号光透射率和抽运光强度随时间的变化如图 4(c)所示,图 4(d)为图 4(c)的局部放大图。从图 4(d)中可以看出,信号光

上下转化的响应时间约为 50 fs。这一现象证明了在低强度抽运光与高速时间响应的基础上,基于表面等离激元的解复用器结构可以实现对 SPP 高效的全光控制。此处的光开关响应时间并没有考虑非线性材料的延迟时间。也就是说,上述计算出的响应时间主要来源于结构的反馈时间。然而在实际应用中,非线性材料的响应时间也会影响该全光开关的最终响应时间。在所设计的结构中填充的是非线性有机聚合物,该材料也具有超快的非线性响应时间,其响应时间为百飞秒量级。由于非线性材料的响应时间大于结构的反馈时间,故最终的响应时间是由非线性材料决定的。本课题组设计的结构的开关时间也是在百飞秒量级,并可通过选择更好的非线性材料进一步缩减开关时间。

## 4 结 论

利用 Fabry-Perot 腔效应来增强光与物质的相互作用,设计了一种 T 型双通道解复用器结构的全光开关,并对其进行了数值模拟。模拟结果表明,在不需要引入额外滤波器的情况下就可以实现波长为 735 nm 的抽运光控制 1310 nm 信号光从双向任一端输出,消光比可达 29.4 dB。工作波长可以通过非对称的方形谐振腔的尺寸控制实现任一波长的光开关。通过对该全光开关的性能分析可以得到端口 1 和端口 2 的双稳态效果。在不考虑非线性材料延迟的情况下,该全光开关的响应时间在 50 fs 左右,其开光的阈值小于 22 MW/cm<sup>2</sup>。基于结构紧凑、响应快速以及卓越的光控能力,该 T 型双通道全光开关在未来的逻辑光路中将会有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmons subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [2] Ozbay E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. *Science*, 2006, 311(5758): 189-193.
- [3] Wu T S, Liu Y M, Yu Z Y, *et al.* The sensing characteristics of plasmonic waveguide with a ring resonator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7669-7677.
- [4] Lu Q J, Wu G Z, Chen D R, *et al.* Optimal design and application of surface plasmon polaritons microdis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0714002.
- 卢启景, 吴根柱, 陈达如, 等. 表面等离激元微盘的优化设计及应用 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0714002.
- [5] Hao J M, Wang J, Liu X L, *et al.* High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(25): 251104.
- [6] Lin X S, Huang X G. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(23): 2874-2876.
- [7] Wei L D, Wang H Q, Yang H Y, *et al.* Optical transmission characteristics of embedded metal strip based on metal-insulator-metal waveguide [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 092401.
- 韦力丹, 王宏庆, 杨宏艳, 等. 内嵌金属块的金属-绝缘体-金属波导透射特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 092401.
- [8] Fang N, Lee H, Sun C, *et al.* Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [9] Liu Z W, Lee H, Xiong Y, *et al.* Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects [J]. *Science*, 2007, 315(5819): 1686.
- [10] Xiao X, Zhang Z Y, He M Y, *et al.* Optimized design of silver superlens for the surface plasmon polaritons interference lithography based on backside-exposure technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222007.
- 肖啸, 张志友, 何明阳, 等. 背向曝光表面等离激元干涉光刻系统中银层超透镜的优化设计 [J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1222007.
- [11] Zhao C L, Wang J Y, Wu X F, *et al.* Focusing surface plasmons to multiple focal spots with a launching diffraction grating [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(11): 111105.
- [12] Tan X H, Cai W, Ji Z C, *et al.* Light-induced gold nanoparticle grating and excitation of surface plasmon polaritons [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1201011.
- 谭信辉, 蔡卫, 冀志超, 等. 光诱导金纳米颗粒光栅及表面等离激元的激发 [J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1201011.
- [13] Liu J S, Pala R A, Afshinmanesh F, *et al.* A submicron plasmonic dichroic splitter [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 525.
- [14] Xu A, Liu D, Lu F, *et al.* Compact plasmonic dichroic splitting with high splitting ratio based on a cascaded-grating structure [J]. *Journal of the Optical*

- Society America B, 2014, 31(2): 387-392.
- [15] Tanemura T, Balram K C, Ly-Gagnon D S, *et al.* Multiple-wavelength focusing of surface plasmons with a nonperiodic nanoslit coupler [J]. Nano Letters, 2011, 11(7): 2693-2698.
- [16] Lee S Y, Lee I M, Park J, *et al.* Role of magnetic induction currents in nanoslit excitation of surface plasmon polaritons [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(21): 213907.
- [17] Rodríguez-Fortuno F J, Marino G, Ginzburg P, *et al.* Near-field interference for the unidirectional excitation of electromagnetic guided modes [J]. Science, 2013, 340(6130): 328-330.
- [18] Lin J, Mueller J P, Wang Q, *et al.* Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons [J]. Science, 2013, 340(6130): 331-334.
- [19] Mei S T, Huang K, Liu H, *et al.* On-chip discrimination of orbital angular momentum of light with plasmonic nanoslits [J]. Nanoscale, 2016, 8(4): 2227-2233.
- [20] Liu T, Wang S Y. Orbital angular momentum-controlled tunable directional plasmonic coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 91-94.
- [21] Wang S Y, Liu T. Four-port polarization and topological charge controlled directional plasmonic coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(21): 2391-2394.
- [22] Liu T, Wang S Y. Nanoscale plasmonic coupler with tunable direction and intensity ratio controlled by optical vortex [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 120(12): 123108.
- [23] Min C J, Wang P, Jiao X J, *et al.* Beam manipulating by metallic nano-optic lens containing nonlinear media [J]. Optics Express, 2007, 15(5): 9541-9546.
- [24] Lu H, Liu X M, Wang L R, *et al.* Ultrafast all-optical switching in nanoplasmonic waveguide with Kerr nonlinear resonator [J]. Optics Express, 2011, 19(4): 2910-2915.
- [25] Tian M, Lu P, Chen L, *et al.* All-optical switching in MIM waveguide resonator with an outer portion smooth bend structure containing nonlinear optical materials [J]. Optics Communications, 2012, 285(21/22): 4562-4566.
- [26] Liu H Q, Ren G B, Gao Y X, *et al.* Ultrafast and low-power all-optical switch based on asymmetry electromagnetically induced transparency in MIM waveguide containing Kerr material [J]. Optics Communications, 2015, 353(6): 189-194.
- [27] Economou E N. Surface plasmons in thin films [J]. Physical Review, 1969, 182(2): 539-554.
- [28] Tao J, Wang Q J, Hu B, *et al.* Tunable subwavelength terahertz plasmonic stub waveguide filters [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2013, 12(6): 1191-1197.
- [29] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals [J]. Physical Review B, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [30] Wang X L, Jiang H Q, Chen J X, *et al.* Optical bistability effect in plasmonic racetrack resonator with high extinction ratio [J]. Optics Express, 2011, 19(20): 19415-19421.
- [31] Taheri A N, Kaatuzian H. Numerical investigation of a nano-scale electro-plasmonic switch based on metal-insulator-metal stub filter [J]. Optical & Quantum Electronics, 2015, 47(2): 159-168.