

基于表面等离子体效应的光开关研究现状和进展*

陈 聪 王 沛[†] 苑光辉 王小蕾 闵长俊 邓 燕 鲁拥华 明 海

(中国科学技术大学物理系 安徽省光电子科学与技术重点实验室 合肥 230026)

摘 要 目前表面等离子体(surface plasmons, SPs)效应在光传感、光存储及生物光子学等领域的应用前景受到了广泛关注,通过计算模拟或实验基于 SPs 效应的光开关也层出不穷.文章较为系统地介绍了各种基于 SPs 效应的光开关原理和优缺点,对 SPs 全光开关做了重点介绍.

关键词 表面等离子体亚波长光学,光开关,光双稳,综述

Optical switches based on surface plasmons

CHEN Cong WANG Pei[†] YUAN Guang-Hui WANG Xiao-Lei MIN Chang-Jun

DENG Yan LU Yong-Hua MING Hai

(Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology, Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract Great attention is being paid to surface plasmons (SPs) because of their potential applications in sensors, data storage and bio-photonics. Recently, more and more optical switches based on surface plasmon effects have been demonstrated either by simulation or experimentally. This article describes the principles, advantages and disadvantages of various types of optical switches based on SPs, in particular the all-optical switches.

Keywords surface plasmons, subwavelength optics, optical switch, optical bistability, overview

1 引言

表面等离子体是局域在金属表面、沿表面传播的一种电磁波,通过构造金属表面的结构,可以在纳米尺度下控制表面等离子体的激发和传播——特别是它与光的相互耦合^[1].这种可控性在新型光子学,尤其是亚波长光子器件的设计应用方面极具潜力,目前如何有效进行表面等离子体的动态调控是重要的研究方向,最主要的就是实现基于表面等离子体效应的光开关(下面简称 SPs 光开关). SPs 光开关是在开关结构中激发 SPs,通过改变外部条件影响 SPs 的激发或传输特性,进而达到开关效果的一种新型光开关.随着制作工艺的不断成熟, SPs 光开关利用新的物理机理和物理结构,可在小于衍射极限尺度内实现光的控制,在纳米尺度上实现光子器件的集成^[2],因此 SPs 光开关在速度和尺寸及驱

动功率方面具有独特优势.目前报道的 SPs 光开关类型主要有热光开关、电光开关及全光开关等.

2 SPs 热光开关

一般而言,热光开关的速度相对较慢,主要有以下两种 SPs 热光开关.

2.1 MZ 型

这种光开关将金膜夹在 BCB(苯并环丁烯)介质层中^[3],通过电极加热,调控 SPs - M - Z 结构中一臂的介电常数,影响在两路传播的 SPs 在节点处

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2006CB302905)、国家自然科学基金重点项目(批准号 60736037)、安徽省优秀青年科技基金(批准号 08040106805)资助项目

2008-04-16 收到

[†] 通讯联系人. Email: zccc@mail.ustc.edu.cn, wangpei@ustc.edu.cn

的耦合条件,最终控制信号输出情况,如图1所示.该开关消光比可达35dB,插入损耗11dB,适用于1.51—1.62 μm 波段,由于是利用热光效应,开关速度较慢,为0.7ms.根据以上特点,该光开关可用作数字光开关,作为宽带光子网络中的空间可分离开关^[4].虽然这种MZ型SPs光开关并没有在设计思路上有重大突破,但它在传统开关的结构中引入SPs,利用SPs的相干相消、相干相长达到开关目的,这种开关有利于开关体积的小型化.

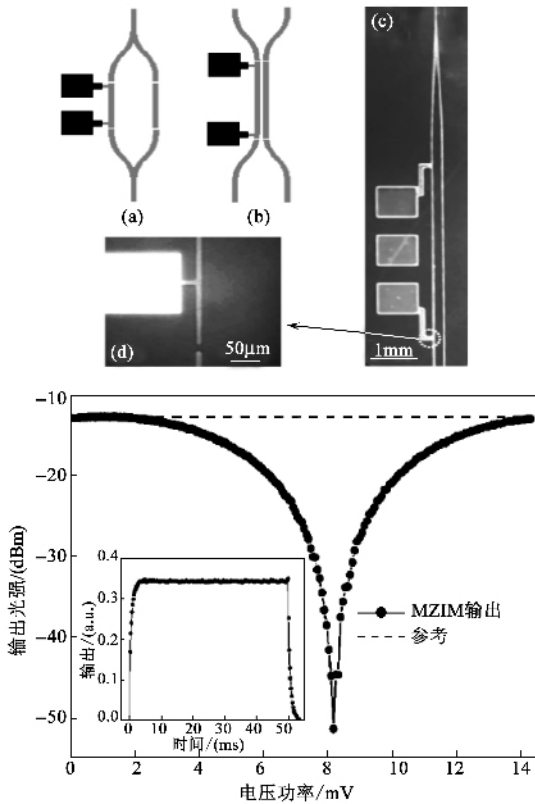


图1 上图(a)为马赫-曾德干涉调制(MZIM)结构(b)为定向耦合开关(DCS)结构(c)为光学显微镜下的结构(d)为电极接触点的放大图像;下图为输出强度随所加电压大小的变化曲线^[3]

2.2 半导体孔阵列型

该开关的主要结构为二维亚波长Si光栅^[5],厚度100 μm ,正方形小孔边长70 μm ,周期300 μm ,适用于THz波段.如图2上图所示,由于入射波长大于小孔边长,故入射波在Si光栅表面激发SPs,SPs隧穿到光栅另一表面,然后褪耦合出射.当改变Si光栅的温度,调节半导体内的自由载流子浓度,进而改变Si的介电常数,影响SPs激发程度,最终控制透射量.下图为相同尺寸的Si光栅和Au光栅从室温到12K变化时,在THz波段(250 μm —750 μm)的透射率变化情况.由于金属Au的自由载流子浓度

随温度变化不大,因而其透过率基本不变,而对于Si光栅,同一波长,不同温度,其透过率变化十分明显,尤其在THz波段.

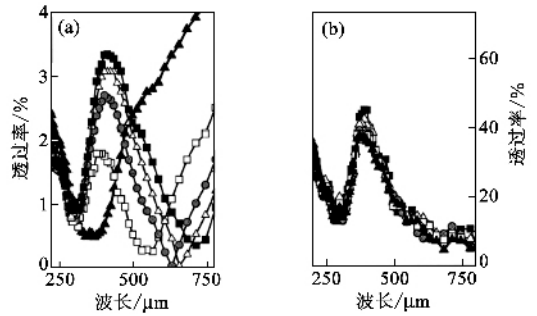
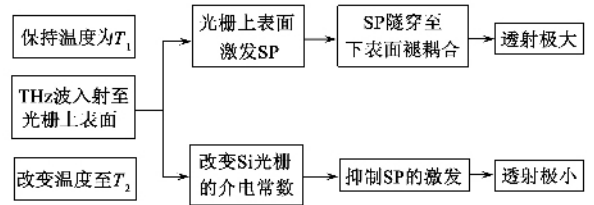


图2 上图为半导体孔阵列开关工作原理示意图;下图(a)为Si光栅(b)为Au光栅在不同温度下THz波段的透射率变化^[5]

这种半导体材料做成的SPs热光开关必须要求适用波段的波长大于光栅小孔尺寸,且基于热激发载流子,开关时间取决于半导体材料对温度的响应和温度变化的快慢,速度受到很大限制,因此该开关可用于温度传感装置,在一定范围内实现对温度的精确探测.同时,可以预见如果该开关是基于光生载流子,其速度将大大提高,这对制作类似的全光开关有很好的指导意义.

3 SPs 电光开关

目前报道的SPs电光开关主要是MZ型,具体结构如图3所示^[6].金属层上下表面覆盖E-O介质(BST),金属厚度 $d = 0.8\lambda$,E-O介质厚度 $d_1 = d_3 = 8\lambda/15$,开关长度 $L = 2000\lambda$.在金属层上下表面存在以金属层为中心的对称和反对称两个传播模式,当不加偏压时,这两个模式在金属层上表面相干相长,而下表面相干相消,故SPs从上通道输出;当加上偏压($V = 59\text{kV/cm}$)时,由于电场对对称和反对称SPs模式的传播常数影响不同,使之在上表面相消,而下表面相长,从而将SPs切换到下表面输出.这种开关具有很高的消光比27dB,开关速度主要取决于E-O介质对电场的响应时间,缺点是开关长度受SPs横向传播距离限制,且高消光比和低驱动功率不能同时满足.根据其开关速度和结构特

点,该开关不仅可以作为一个多通道开关,而且能方便地集成在基于 SPs 效应的光子回路中,同时能实现光隧穿、光开关和光调制等功能。

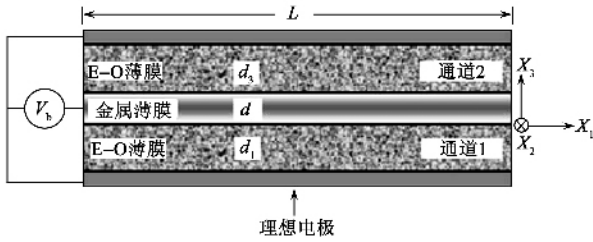


图3 MZ型SPs电光开关结构示意图^[6]

4 SPs 全光开关

全光开关在开关速度、信息处理等方面具有较大的优势,在 SPs 纳米光子器件及其集成回路中,如何做出响应快、损耗小、结构简单的全光开关也日益重要。

4.1 光栅耦合型

2004年,A. V. Krasavin 等人提出了利用光栅激发和褪耦合结构的 SPs 全光开关^[7]。开关结构如图4所示,信号光入射至左边的耦合光栅处,激发形成 SPs,SPs 沿 Au/Si 介面传输,在这段传输路径中加入一段 $L = 2.5\mu\text{m}$ 的 Ga 薄膜,当没有控制光照射时,Ga 为固态 $\alpha\text{-Ga}$,表现为非金属性质,SPs 不能有效传输而被中断;当有入射光照射时,Ga 的上表层熔化为液态 $m\text{-Ga}$,SPs 能有效传输至右端褪耦合光栅,转化为信号光输出;需要指出的是,这个仅仅是理论上的模型,数值计算表明,该开关调制深度为 80%,驱动功率约为 10pJ ,开关开启时间由界面处厚度为 d 的 Ga 的熔化时间决定,大概 ps 量级,关闭时间由液态 Ga 的凝固时间决定,约为 ns 至 μs 量级。虽然该开关相对热光开关速度较快,但由于需制作光栅,成本较高,实验上也尚未实现,实际应用受到很大限制。

4.2 棱镜激发型

Araz Yacoubian 于 1993 年从理论上提出了棱镜结构的 SPs 调制结构^[8],在 SF1 棱镜底部分别镀 $1\mu\text{m}$ 的 PMMA、20nm 的 Ag 膜和半无限厚的 PMMA-DR1,信号光以一定角度入射时,可形成长程表面等离子体共振,此时反射极弱;当用抽运光入射到 PMMA-DR1,改变 PMMA-DR1 的折射率 -0.0012 ,则可

移动该共振角约 0.05 度,使反射率从 0 左右跃至 0.7 左右。该结构在实际制作上有两个难点:长程表面 SPs 波的激发对第一层 PMMA 的厚度很敏感,很难精确控制在 $1\mu\text{m}$;其次多层膜结构中膜表面的粗糙度对 SPs 共振影响很大^[9]。

2004年,A. V. Krasavin 在实验上实现了这种基于棱镜结构的 Ga 调制 SPs 光开关^[10]。如图5所示,在棱镜底部镀一层厚度为 185nm 的 MgF_2 ,再镀一层 Ga。在上述光栅耦合型开关中,Ga 作用于 SPs 的传输过程,而这个棱镜激发型 SPs 开关中 Ga 作用于 SPs 的激发环节。如图5(b),当没有控制光照射,Ga 处于固态 $\alpha\text{-Ga}$, 780nm 信号光在 MgF_2/Ga 界面上形成 SPs,因此反射减弱;如图5(c),当 1064nm 的控制光入射时,在 MgF_2/Ga 界面处有厚度为 d 的 Ga 处于液态 $m\text{-Ga}$,信号光不能有效形成 SPs,反射增强。该开关的开启时间为 4ps ,关闭时间为 20ns 。这种类型的开关能在可见和近红外波段有效调制 SPs 信号,带宽可达几十兆赫兹,但由于结构中涉及棱镜,开关大小受限,难以集成。

4.3 二维孔阵列型

半导体孔阵列结构:该开关与上述半导体 SPs 热光开关极为相似^[11],是 C. Janke 和 J. Gómez Rivas 等人在半导体 SPs 热光开关^[2]基础上,利用 InSb 材料的光生载流子效应,以周期性方孔阵列的 InSb 二维光栅为结构实现的。光栅厚度 $h = 130\mu\text{m}$,小孔边长 $d = 65\mu\text{m}$,小孔周期 $D = 300\mu\text{m}$ 。抽运光是中心波长为 780nm 的 Ti 宝石激光,脉冲宽度为 100fs ,信号光为 $300\text{—}700\mu\text{m}$ 的 THz 波。当抽运光照射到 InSb 二维光栅上时,通过光生载流子效应调节半导体材料的介电常数,调控其光栅结构的 THz - SPs 透射增强效应。开关速度主要取决于载流子浓度对抽运光的响应,约 50ns ,利用载流子寿命更短的材料有望进一步提高开关速度。该类 SPs 光开关结构相对简单,速度较快,容易集成,有望实现基于 SPs 效应的各种超快调制器件。

金膜孔阵列结构:如图6所示,这种开关是在纳米金属小孔阵列中复合非线性聚合物光学材料 3BCMU^[12],在抽运光的作用下产生光致非线性折射率变化,影响信号光能否在二维金属孔阵列中产生 SPs 现象,进而决定信号光的透射强度。该开关抽运光为 488nm 的 Ar 离子激光,斩波频率 1.2kHz ,信号光为 633nm 的 He - Ne 激光。图7为小孔半径分别为 20nm 和 100nm 的两个不同阵列结构的开关时间

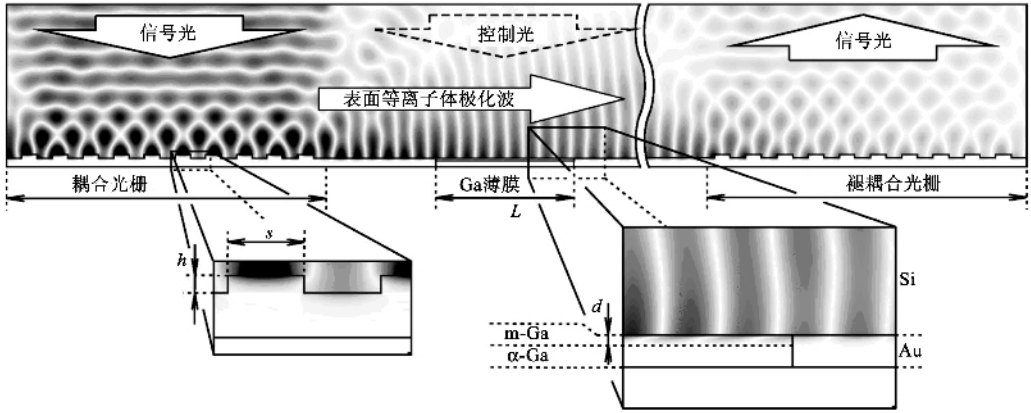


图4 光栅型 Ga 调制 SPs 全光开关^[7]

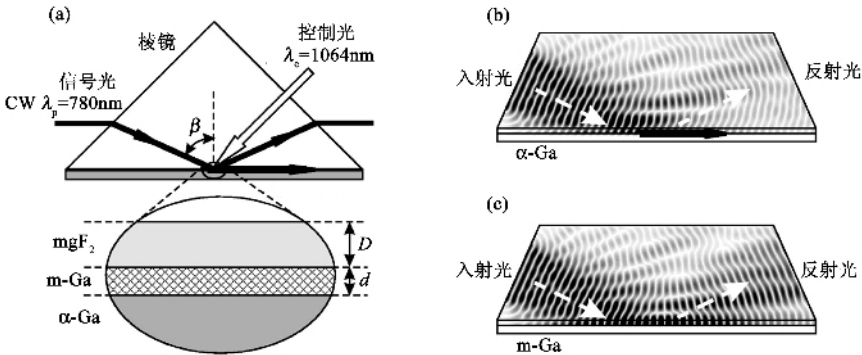


图5 棱镜型 Ga 调制 SPs 全光开关^[10]

响应图. 该文献中没有明确报道开关时间, 非线性材料的响应速度是决定开关快慢的主要因素. 构造一系列这种门控 SPs 开关, 有可能在量子通信及计算中对光信号和图像实现多通道并行处理.

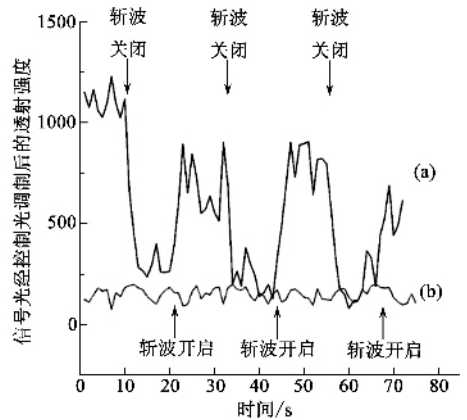


图7 小孔半径为 20nm (a) 和 100nm (b) 的开关时间响应图^[12]

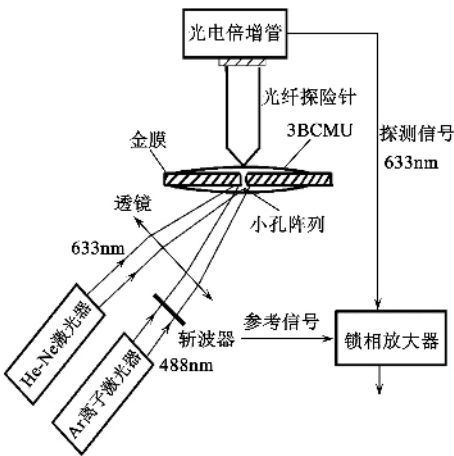


图6 金膜孔阵列开关结构示意图^[12]

4.4 光双稳开关

2004年, J. A. Porto 从理论上分析了在一维金属光栅中填充 Kerr 非线性介质, 利用类 FP 效应和

SPs 透射增强效应, 其透射光出现光双稳现象^[13]. 图8是光栅结构示意图, 光栅周期 $d = 0.75\mu\text{m}$, 狭缝宽度 $a = 0.05\mu\text{m}$, 光栅厚度 $h = 0.45\mu\text{m}$. 图9是波长为 $0.8\mu\text{m}$ 的光入射到光栅上透射强度与入射强度的关系.

2006年, G. A. Wurtz 等人在实验上发现在周期性纳米圆孔阵列的金属薄膜表面涂上 3BCMU 非线性聚合物后^[14], 以 620nm、690nm 和 750nm 作为信

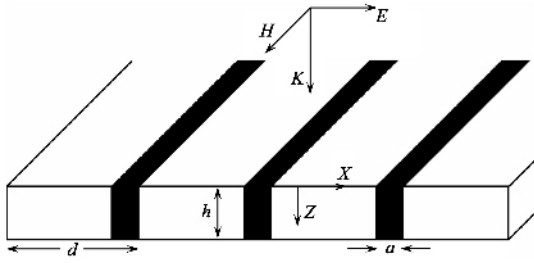


图8 一维金属光栅结构示意图^[13]

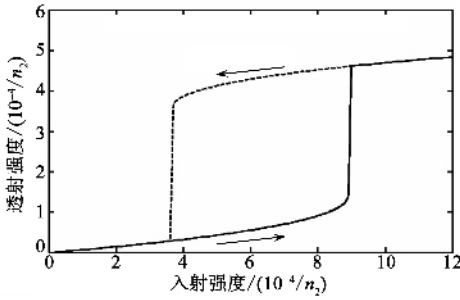


图9 光栅透射强度与入射强度的关系^[13]

号光,分别在 488nm、514nm 抽运光的作用下,其透射光出现光双稳现象,如图 10 所示 (a)(d)信号光波长为 620nm (b)(e)信号光波长为 690nm (c)(f)信号光波长为 750nm (a)–(c)抽运光波长为 488nm (d)–(f)抽运光波长为 514nm。金膜厚度 220nm,圆孔直径 200nm,周期 600nm,金属膜尺寸: $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ 非线性介质层厚度 200–250nm。

光双稳现象是光开关领域的研究热点之一。用光双稳现象研制的光开关具有结构体积小、易集成、开关速度快等特点。如何利用基于 SPs 效应的光双稳现象制作出响应快、阈值低、尺寸小的光开关还有待进一步的研究。

5 总结

本文从原理上介绍了近几年利用 SPs 效应研制的光开关及光调控器件,对各个 SPs 光开关的优缺点及相关应用进行了阐述和分析。这些开关包括热光开关、电光开关、全光开关,无论是从开关速度或者光子回路集成角度而言,全光开关都将扮演重要角色,尤其是尚未完全实现的 SPs 光双稳开关更是具有巨大的应用潜力。总体而言,以上各种 SPs 光开关均未完全成熟,需要在材料、结构等方面加以改进和提高,比如:在使用材料上,对于利用光生载流子效应的,采用载流子寿命更短的材料,可以提高开关速度;对于利用非线性效应的,采用非线性系数高的

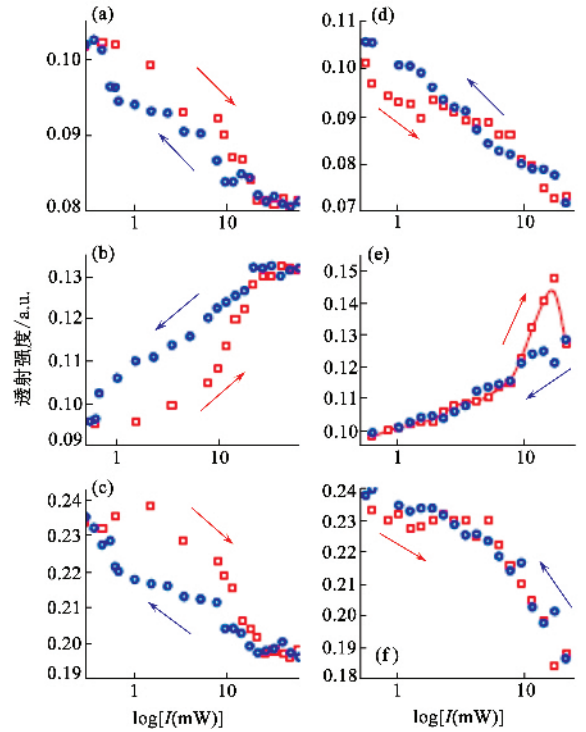


图10 二维金属孔阵列在不同信号光 and 不同抽运光下的光双稳现象^[14]

材料,可以降低抽运功率;在开关结构上,则应尽可能地采用形式简单,容易集成的 SPs 激发或传输方式。未来的信息技术领域,势必以大规模光子集成回路和全光通讯为核心技术,利用基于 SPs 效应,结合更优越的光学材料,设计更合理的光开关结构,实现更简捷的控制方式,在纳米尺度上实现光子器件的有效调控,具有重要意义。

参考文献

- [1] William L. Barnes. Nature 2003 424 824
- [2] Ekmel Ozbay *et al.* Science, 2006 311 189
- [3] Thomas Nikolajsen, Kristjan Leosson, Appl. Phys. Lett., 2004, 85 5833
- [4] Hoffman M, Kopka P, Voges E. J. Lightwave Technol., 1998 16 395
- [5] Gómez Rivas J, Haring Bolivar P, Kurz H. Opt. Lett., 2004, 29 1680
- [6] Liu S W, Xiao M. Appl. Phys. Lett., 2006 88 143512
- [7] Krasavin A V, Zheludev N I. Appl. Phys. Lett., 2004 84 1416
- [8] Yacoubian A, Aye T M. Appl. Opt., 1993 32 3073
- [9] Kovacs G J, Scott G D. Phys. Rev. B, 1977 16 1297
- [10] Krasavin A V, MacDonald K F, Zheludev N I, Appl. Phys. Lett., 2004 85 3369
- [11] Janke C, Gómez Rivas J *et al.* Opt. Lett., 2005, 30 2357
- [12] Smolyaninov I I, Zayats A V *et al.* Phys. Rev. B, 2002 66 205414
- [13] Porto J A, Martín - Moreno L *et al.* Phys. Rev. B, 2004 70 081402
- [14] Wurtz G A, Pollard R, Zayats A V. Phys. Rev. Lett., 2006 97 057402