

一种硅基二氧化硅结构的超快全光开关

吴永宇, 张小平, 单欣岩, 郭立鹏

清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084

摘要 作为全光计算的基本逻辑单元的重要结构, 全光开关的研究进展影响着整个全光计算甚至集成光学领域的发展。设计了一种硅基二氧化硅结构的超快全光开关, 并通过双色抽运探测实验对光控光开关的消光比以及开关响应时间进行了测试, 实现了开关强度比为 7:1、开关时间约为 500 fs 的超快全光开关的设计。

关键词 集成光学; 硅基二氧化硅; 全光开关; 响应时间; 超快光学

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041303

An Ultrafast All-Optical Switch with Silicon-Based Silica Structure

Wu Yongyu, Zhang Xiaoping, Shan Xinyan, Guo Lipeng

Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract As the basic structure of all-optical computing basic logic unit, the research progress of all-optical switch affects the development of all-optical computing and even the development of integrated optical field. An ultrafast all-optical switch with silicon-based silica structure is designed. The extinction ratio and the switch response time of the optically controlled optical switch are measured through two-color pump-probe experiment. The design of ultrafast all-optical switch with the switch intensity ratio of 7:1 and the switching time of 500 fs is realized.

Key words integrated optics; silicon-based silica; all-optical switch; response time; ultrafast optics

OCIS codes 130.3750; 130.4815; 130.2790

1 引言

目前计算机依旧处于依赖大规模集成电路进行计算的阶段, 与电子信号处理过程相比, 全光信号处理具有较高的速度。曾有人提出“光-电-光”的基于光电转换的光学计算机, 但是“光-电-光”转换会带来速度损失和能量损耗等问题^[1]。而全光信号的处理, 可以在减小能量损耗的同时, 实现较高的运算比特率^[2]。因此用全光计算机替代电子计算机具有良好的发展前景, 未来计算机具有从对电子信号处理转变为对光信号进行运算的总体趋势。

类似于电子计算机, 光计算的核心问题是光逻辑门问题。全光开关作为全光逻辑门的最基本组成部分, 显得尤为重要。也就是说, 一旦实现了超快速

的光开关, 并合理地应用其实现数字逻辑门, 再形成作为中央处理器(CPU)基本构成部分的算数逻辑单元(ALU), 将为最终实现全光计算机代替电子计算机打下基础。在计算机中若实现了全光元件的计算, 其性能将会得到极大的提升。

伴随着光开关研究的深入, 硅基二氧化硅作为热门材料, 科学界对于光在其上的研究也越来越深入。硅基二氧化硅具有结构简单、传输损耗低、集成性强、性能稳定等特点, 是十分理想的波导材料; 而且其制作工艺可以采用成熟的半导体加工技术, 工艺简单、成本低廉。目前硅基二氧化硅波导已经可以用于实现特定全光信号的处理^[3](如全光逻辑门^[4]), 硅基二氧化硅波导的集成器件在光计算领域的应用会越来越广泛。

收稿日期: 2017-10-22; 收到修改稿日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61472210)

作者简介: 吴永宇(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事集成光学方面的研究。E-mail: wuyy17@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 张小平(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事网络体系结构、集成光学方面的研究。

E-mail: zhxp@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

结合二氧化硅的光透性,利用双光子吸收作用带来的极薄二氧化硅膜折射率的变化,从而实现光开关的效果。本文基于此原理提出了一种基于硅基二氧化硅材料的光控光开关,并通过实验测量得到光控光开关的响应时间能够达到飞秒量级,并在此基础上有良好的消光比。

2 理论模拟

当光照射半导体介质时,会产生光被吸收的现象。吸收一个能量接近或超过禁带宽度的光子会激发处于价带的电子,使其跃迁成为自由电子,同时产生一个自由空穴。大量光子激发产生电子和空穴两种自由载流子,因此自由载流子浓度的变化会导致半导体吸收系数和折射率的变化。而在双光子吸收中,两个光子同时被吸收,产生一个电子空穴对,同时引起电子浓度的变化和空穴浓度的变化。根据Drude模型计算得到^[5]:

$$\Delta n = -\frac{e^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n} \left(\frac{\Delta N_e}{m_{ce}^*} + \frac{\Delta N_h}{m_{ch}^*} \right), \quad (1)$$

式中 e 是电子电荷; λ 是波长; ϵ_0 是自由空间介电常数; n 是材料的线性折射率; c 是光速; m_{ce}^* 是电子传导性有效质量; m_{ch}^* 是空穴传导性有效质量; ΔN_e 是每立方厘米的电子浓度变化; ΔN_h 是每立方厘米的空穴浓度变化。实验中采用的是脉冲激光光源,假定入射激光脉冲的光强是高斯型的时间函数:

$$I(t) = I_0 \exp\left(\frac{-2t^2}{T^2}\right), \quad (2)$$

则单脉冲引起的自由载流子浓度变化为

$$\Delta N = \frac{\beta}{2h\nu} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{P}{S}\right)^2 \exp\left(\frac{-4t^2}{T^2}\right) dt = \frac{\sqrt{\pi}\beta TP^2}{4h\nu S^2}, \quad (3)$$

式中 t 为时间; β 为双光子吸收系数; $h\nu$ 为光子能量, h 为普朗克常量, ν 为光子频率; P 为抽运光峰值功率; T 为脉冲的半峰值宽度; S 为光波导的有效截面。对于高斯脉冲,峰值功率 P 与平均功率 P_{avg} 的关系为

$$\frac{P}{P_{\text{avg}}} = \frac{\sqrt{2}t_p}{\sqrt{\pi}T}, \quad (4)$$

式中 t_p 为平均功率的宽度。则由(1)、(3)、(4)式可知,在飞秒激光作用的双光子吸收情况下,介质的折射率变化与激光光强的关系等价表示为介质折射率变化与脉冲平均功率的平方近似成正比的关系^[6]。这一特性使基于硅材料的全光开关的实现成为可能。

由于在硅表面生成二氧化硅的技术已经日益成熟,2003年吴远大等^[7]便提出了硅基二氧化硅材料的快速制作方法。因硅与二氧化硅在常态下处于稳定的状态,可在硅片上生成厚度为 $1 \mu\text{m}$ 的二氧化硅作为材料,制作成脊形的开关器件。图1(b)图展示了光控光开关的造型。

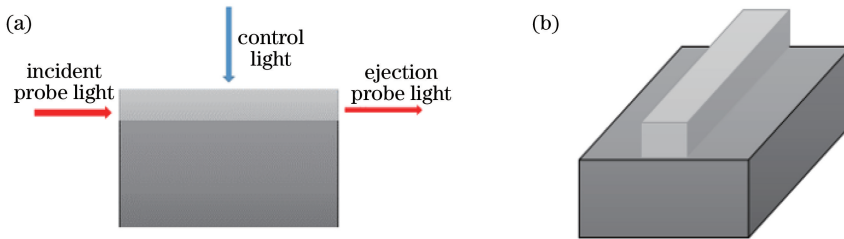


图1 光控光开关设计示意图。(a)二维图;(b)三维图

Fig. 1 Design schematic of optically controlled optical switch. (a) Two-dimensional diagram; (b) three-dimensional diagram

开关会接受两种光束,一种用于信息传递,一种用于开关的通断。图1左图展示了开关的工作机制。由于硅在光的照射下会产生双光子吸收效应,因此硅与二氧化硅的交界处会发生电磁分布变化,双光子吸收效应会影响硅基二氧化硅折射率的改变。由于折射率的改变导致同一器件的光透射率发生变化,从而实现光开关的作用。

对于两个矩形组成的开关,二氧化硅厚度参数($1 \mu\text{m}$)已经确定,而二氧化硅的长与宽没有确定,这是因为控制光对于二氧化硅的作用是一个区域性

反应。当控制光照射到二氧化硅表面时,折射率变化的区域与变化时间都是未确定的数,并且为了验证控制光对探测光的作用,也需要设定合适的长和宽使设计能够有明显的效果。使用Lumerical公司的FDTD Solutions软件进行了仿真实验,以确定所选器件的长和宽。通过仿真实验发现,当宽度为 800 nm 时,器件的透射度最好,而长度对于透射效果影响不明显。图2展示了长为 $1 \mu\text{m}$ 、宽为 800 nm 时,器件仿真实验的电场强度分布。

图3展示了在同一条件下的硅基二氧化硅透射

率随波长的分布。根据此分布,在进行光开关的设计中可以选择特定波长作为探测光波长。从图 3 可

以清晰地看出,在 410 nm 附近有良好的透射度,因此实验时选择输入光源的波长为 410 nm。

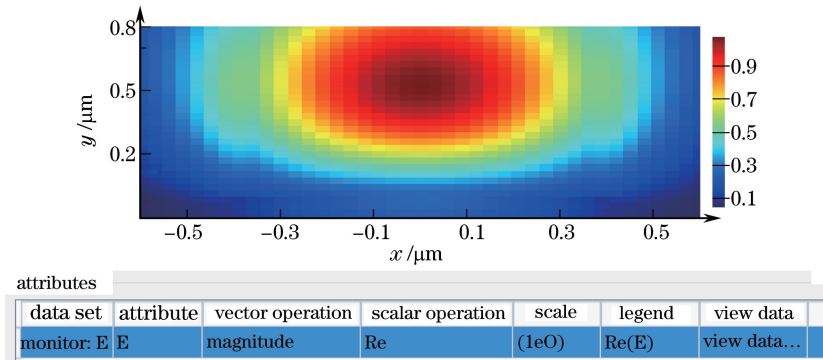


图 2 电场强度分布

Fig. 2 Electric field intensity distribution

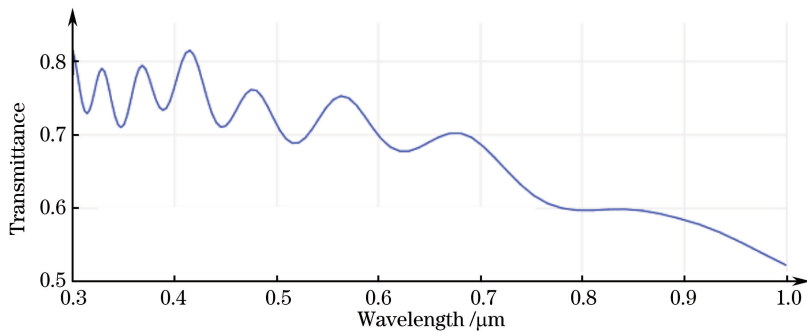


图 3 透射率曲线

Fig. 3 Transmittance curve

3 结构制备

设计的光控光开关用硅基二氧化硅材料制作。硅基二氧化硅是在硅衬底上选择厚度为 $1 \mu\text{m}$ 的二氧化硅硅片,对其进行微加工制作得到。

图 4 展示了器件的加工工艺。整个工艺可以分为 4 部分:匀胶、光刻、刻蚀、清洗。匀胶即在二氧化硅表面附着正性光刻胶。光刻即在光刻胶上方加一层带有开关形状的掩模,在紫外光下曝光,未被掩模

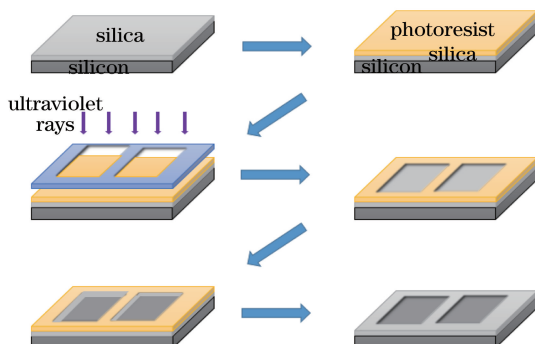


图 4 加工工艺

Fig. 4 Processing technology

覆盖的部分会溶于显影液。刻蚀是用反应等离子刻蚀系统对暴露的厚度 1000 nm 的二氧化硅进行轰击,轰击过后被光刻胶保护的部分即开关部分。清洗即将轰击后的残留二氧化硅以及覆盖在器件上的光刻胶洗掉,剩余即为加工成型的器件。

图 5 为显微镜下光控光开关样品。为了进行对比测试,开关的长度均匀分布在 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 范围内。

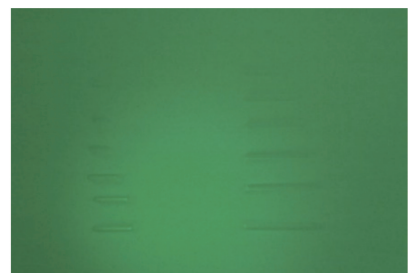


图 5 光开关实物图

Fig. 5 Physical photo of optical switch

4 实验装置

光控光开关的测试实验在中科院物理所表面物理实验室完成。实验平台由飞秒激光器、激光扫描

共聚焦显微成像系统和一些光路元件组成。飞秒激光器的激光参数为频率 $f = 80 \text{ MHz}$, 脉冲时间 $t = 150 \text{ fs}$, 波长 λ 在 $680 \sim 1080 \text{ nm}$ 范围内可调谐。为了测量光控光开关的响应时间与开关消光效果, 在上述平台上采用的是双色抽运探测方法, 其中探测光与控制光为同源光, 波长为 810 nm , 脉冲时间为 150 fs ; 为了区别两种光源, 对探测光进行了倍频操作, 并通过一个位移延时模块将探测光与控制光抵达光开关的时间区分开, 由此来测量开关对控制光的响应时间。

位移延迟模块使用 Thorlabs 公司的 LTS150 产品, 量程为 150 mm , 精确度为 100 nm , 通过简单运算可以得到在时间上的延迟量程约为 1 ns , 时间分辨率为 0.7 fs 。

当控制光抵达光芯片时, 硅基二氧化硅开关开始发生变化, 变化会持续一定时间, 该时间即为开关的响应时间。通过控制位移, 可以控制控制光与探

测光的到达时间差, 而不同时间差的探测光的不同透射率就可反映出开关的响应时间。

抽运探测实验装置如图 6 所示(省略所有透镜和小孔)。激光器发出一束光后, 由分光镜分成两束, 一束光经过倍频晶体(BBO)直接到达样品, 另一束光由分光镜反射后进入抽运延迟台, 经过抽运延迟台的光再经过光路引导回到第一束光的光路中, 然后两束光共同到达样品, 并通过 100 倍的显微镜观看光路效果。将波长为 810 nm 的光(红色光)作为激光源, 则通过倍频晶体后的 405 nm 的光(蓝色光)为探测光, 经过抽运延迟台的光为控制光。

通过抽运延迟台可以调节第二束光的光程, 进而实现相位的控制, 通过对于抽运镜相位的扫描, 可以实现两者光程差的扫描控制, 经相机(CCD)观看通过通带滤光片($310 \sim 630 \text{ nm}$)的探测光便可观察到光开关的效果, 并用高速光电二极管(1 ns)测量通过通带滤光片的输出点的光强。

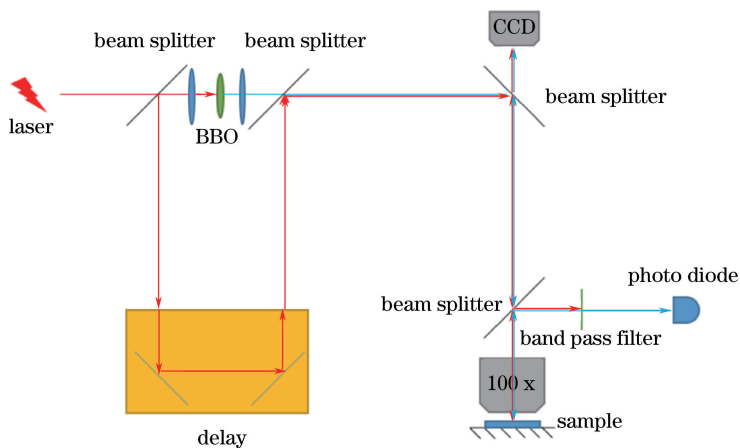


图 6 双色抽运探测实验原理图

Fig. 6 Principle of two-color pump-probe experiment

光开关的实际消光效果如图 7 所示, 图 7 (a)、(b)中较强光斑为输入光, 图 7 (a)中橙色箭头所指的光斑表示开关逻辑输出“1”, 即“开”状态; 图 7 (b)中红色箭头所指的光斑表示开关逻辑输出“0”, 即“关”状态。类比电开关中高电平与低电位的电位差, “1”与“0”状态之间的光输出功率差可作为开关的逻辑区分。

通过改变抽运延迟台的距离来改变控制光与探测光的光程差; 通过光电二极管测试输出点的光强, 绘制得到延迟时间和输出点光强之间的曲线图, 如图 8 所示。从图 8 可以清晰地看出, 在 798 ps 之后, 探测光的输出功率开始明显上升, 经历大约

500 fs 之后达到最大值, 之后开始回落。

图 8 展示了探测光的输出功率变化。从延迟时间方面来看, 随着探测光与通过抽运延迟台的控制光的光程差的变化, 探测光输出功率也发生变化。当两束光光程差为 798 ps 时, 探测光的输出功率开始上升, 在约 500 fs 后, 探测光的输出功率达到最大值, 即开关达到“开”的状态, 之后探测光的输出功率开始降低, 最终回到完全“关”的状态。因此, 开关的响应时间为 500 fs 。从输出功率方面看, 开关处于“开”状态的输出功率与上升前和回落“关”状态的输出功率比约为 $7:1$, 光开关的信号输出已经有了明显的“0”与“1”的区分。因此, 开关功能得以实现。

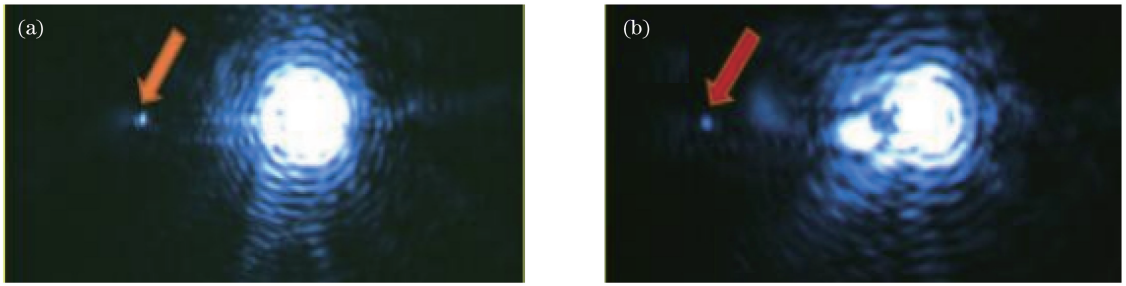


图 7 开关状态输出对比图。(a)“开”状态的输出光强;(b)“关”状态的输出光强

Fig. 7 Comparison of output between switch statuses.

(a) Output light intensity of the "on" state; (b) output light intensity of the "off" state

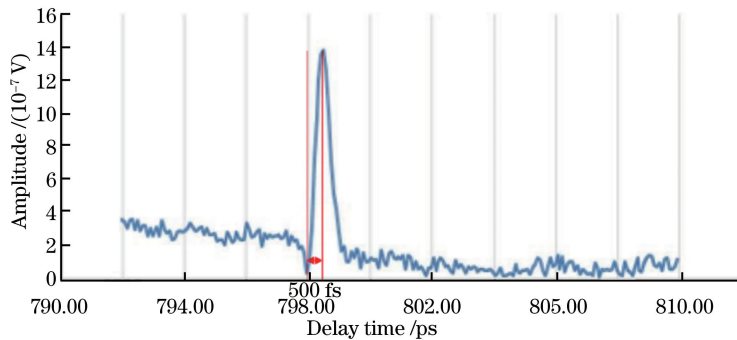


图 8 开关效果曲线图

Fig. 8 Switch effect curve

5 结 论

现有晶体管的特征频率大致与驱动电压成正比,与载流子迁移率成正比,与晶体管沟道长度的平方成反比。在实际工作电路中,晶体管的工作频率一般不超过其特征频率的 $1/10$,最高也很难超过特征频率的 $1/5$ 。随着晶体管特征尺寸的缩小和工作频率的升高,传输线的延时也成为制约其速度和性能的一个重要因素。当信号频率进一步升高达到几十 GHz 量级时,信号波长与传输线长度在一个量级,此时还要考虑阻抗匹配等问题。实际晶体管工作时的开关时间大致在几百皮秒到几纳秒的区间中。另外,这里只考虑了晶体管中的运算速度,在实际的集成电路中,由于引线电阻与电容效应的影响,会存在电阻电容(RC)延迟。所以现有 CPU 的频率被限制在 GHz 的量级。

硅基二氧化硅材料的全光开关可以在常温下使用,拥有微米级的尺寸,同时具有 500 fs 的超快响应时间(对应 THz 量级),并具备 8.45 dB 的消光比,有潜力成为未来全光计算的核心器件。全光开关承担着集成光学领域内的“晶体管”的角色,且比晶体管的速度更快。作为全光计算元件的基础,全光开关的成功研制为集成光学领域中研究并设计实现全

光逻辑器件甚至全光处理器提供了可能。

参 考 文 献

- [1] Dai B, Shimizu S, Wang X, *et al.* Simultaneous all-optical half-adder and half-subtractor based on two semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(1): 91-93.
- [2] Singh K, Kaur G. All-optical half-adder and half-subtractor based on semiconductor optical amplifier [J]. Open Journal of Communications & Software, 2014, 1(1): 42-51.
- [3] Wang K Y, Petrillo K G, Foster M A, *et al.* Ultralow-power all-optical processing of high-speed data signals in deposited silicon waveguides [J]. Optics Express, 2012, 20(22): 24600-24606.
- [4] Valette S. State of the art of integrated optics technology at LETI for achieving passive optical components[J]. Journal of Modern Optics, 1988, 35(6): 993-1005.
- [5] Soref R, Bennett B. Electrooptical effects in silicon [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 123-129.
- [6] Li C F. Nonlinear optics: Principles and applications [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2015.

李淳飞. 非线性光学: 原理和应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015.

[7] Wu Y D, Zhang L T, Xing H, *et al.* The quick deposition of silica thick films on silicon [J]. Acta

Photonica Sinica, 2003, 32(2): 195-198.

吴远大, 张乐天, 邢华, 等. 硅基二氧化硅厚膜材料的快速生长 [J]. 光子学报, 2003, 32(2): 195-198.