

高速微型 1×2 磁光开关

翁梓华^{1,2} 陈智敏² 朱 贇² 王义进² 杨国光¹ 黄元庆²

(1 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 厦门大学机电工程系, 厦门 361005)

摘 要 设计和分析了一种新型的用于全光通信网络的高速微型 1×2 磁光开关, 包括光学光路和高速控制. 纳秒脉冲发生器的纳秒脉冲电流用于控制传输 1550 nm 光束的磁光晶体的磁化强度. 对纳秒脉冲发生器的电路设计方案和纳秒脉冲磁场设计方案分别进行计算机仿真和实验验证. 结果表明: 纳秒脉冲发生器能够输出上升沿 1.9~3.2 ns、上升幅度 10~90 V 和脉宽 4~100 ns 的脉冲. 在单片机 MCU 的控制下, 可以实现光束的平稳切换, 目前的开关时间小于 1 μ s.

关键词 磁光开关; 法拉第旋转器; 光路; 磁光晶体; 脉冲磁场

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

在全光网络中, 光开关是光交换连接器和光分插复用器的基础器件. 近年来, 高速宽带网络的迅猛发展对光开关的需求有了引人注目的增长. 目前光开关多数采用的是电光效应和声光效应等原理, 很少采用磁光效应. 采用磁光效应的磁光开关在概念上是简单的, 但磁光开关的优势还没有充分被认识到, 其主要原因是磁光晶体的法拉第旋转角低和磁光开关的反应时间慢. 在磁光晶体材料、微细加工技术、纳秒控制装置和纳秒脉冲磁场等方面的新近发展, 使磁光开关展现出开关时间短、法拉第旋转角大和总体尺寸小的优势.

高速微型磁光开关的系统性研究主要包括光学光路理论设计、纳秒级高速控制仪研制、样品试制工艺实验与总体测试等.

光学光路设计是微型磁光开关研究的一个重要组成部分, 它包括磁光晶体中偏振光的光路设计、高速磁场和法拉第旋转器上的磁路设计与分析. 利用晶体的偏振性和法拉第旋光效应的特点, 微型磁光开关可以实现全光通信网络所必需的全光切换功能, 可以将输入的偏振光束根据不同要求以不同的方式输出到不同的输出端口.

本文对磁光开关光路设计方案进行了理论分析, 并在实验室对 1×2 简易试验样品进行制作和分析. 通过研究和实验发现, 设计方案在原理上实现了可行性, 在性能上基本满足了原设计的初步要求.

1 光开关的原理和构造

磁光开关的原理是控制磁光晶体的磁化强度, 进而控制传输光偏振面的旋转. 磁光开关采用的物

理机理是磁光材料的法拉第效应^[1,2]. 一束光通过磁光晶体时产生的偏振面旋转值取决于磁光晶体的磁化强度和光束通过的磁光晶体的长度. 偏振面的旋转是折射光的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的差异所致. 任一线偏振光都能分解为左旋的和右旋的圆偏振光. 当光传输时, 相对相位的累加成如图 1 中的偏振面旋转.

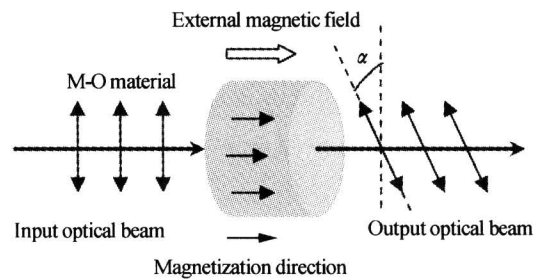


图 1 法拉第磁光效应原理

Fig. 1 The principle of Faraday magneto-optic effect

本文中的 1×2 磁光开关的原理图如图 2. 一束来自聚焦准直透镜的平行光从左边入射偏振分光镜 (PBS). 与光入射面平行的偏振分量定义为 P 光, 与光入射面垂直的偏振分量定义为 S 光. 在 PBS 中, S 光反射, P 光透射, 出现二条偏振面相互垂直的出射光线. 利用直角棱镜 (RAP), 二条相互垂直的光线平行入射偏振光旋转元件 (PRE). 当 PRE 处于“ON”状态时, 二束光的偏振面都旋转了 90° . 二束光在另一个 PBS 中合成一束, 并从输出端 1 输出. 当 PRE 处于“OFF”状态时, 二束光都保持的原有偏振面. 经过另一个 PBS 和一个 RAP 后, 二束光合成一束, 并从输出端 2 输出. 在磁光开关中, 输入光的偏振态与工作状态无关. S 光和 P 光走过的二条光程实际是相同的. 只需要一个 PRE 用于控制二束偏振光的偏振态.

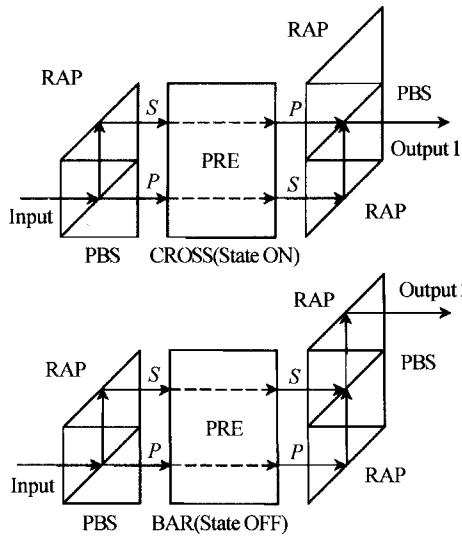


图2 1×2 偏振无关性磁光开关原理图
Fig. 2 The principle diagram of 1×2 polarization-independent magneto-optic switch

2 纳秒脉冲发生器

用于全光通信的高速微型磁光开关的关键之一是响应时间短和电路响应时间保持在纳秒级. 因此要求纳秒脉冲发生器的稳定性好、纳秒级上升沿时间和幅值大^[3]. 实验中的纳秒脉冲发生器利用普通高频小功率三极管 2N5551 的短暂良性雪崩效应产生纳秒级脉冲, 用于驱动纳秒脉冲磁场, 其电子线路如图 3. 需输入上升时间约 1 ns TTL 或正脉冲进行触发.

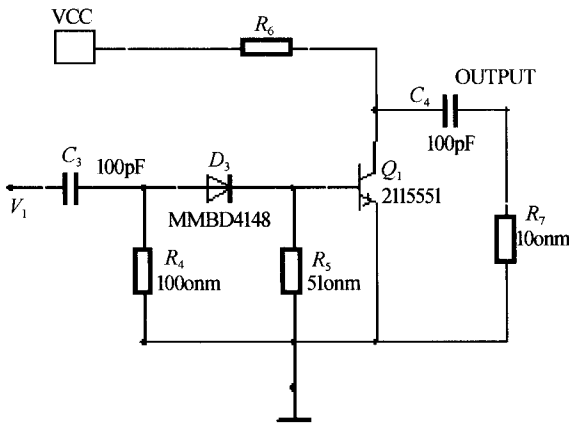


图3 纳秒脉冲发生器电子线路
Fig. 3 The circuit of nanosecond pulse generator

当无触发信号输入时, 电路处于雪崩临界状态, 三极管 Q_1 处于截止状态. 外接直流电压 V_{CC} 对电容 C_4 进行充电. 当触发信号由 V_1 输入并经过电容 C_3 和电阻 R_4 组成的微分电路时, 其正的尖脉冲通过开关二极管 D_3 到三极管的基极, 对三极管进行触发. 当触发脉冲足够大时, 晶体管的工作点将移动到不稳定的雪崩负阻区, 产生快速增大的雪崩电流. 雪崩时, 三极管迅速导通, 处于低阻状态. 电容

C_4 上存储的电荷通过三极管和电阻 R_7 放电.

由于电流的流向为地 $\rightarrow R_7 \rightarrow C_4 \rightarrow Q_1$, 因此在 OUTPUT 处可以得到纳秒负脉冲. 雪崩结束后, 三极管截止, 电源 V_{CC} 再次向电容 C_4 充电. 如此周而复始. 三极管的导通时间决定电容 C_4 的放电程度, 即决定输出端的脉冲幅度. 如果触发信号幅度足够大且持续时间足够长, 基极注入不断提高, 电容 C_4 将得到充分放电. 触发信号幅值的大小也影响输出脉冲幅值大小^[4].

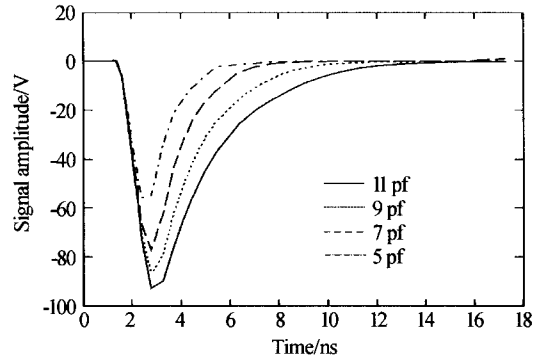


图4 雪崩电容对输出脉冲的影响
Fig. 4 The influence of avalanching capacitor on pulse

本文运用专门用于电子线路仿真和设计的软件 Multisim2001 对电路进行仿真. 仿真结果与理论分析结果一致. 实验中采用的高频小功率硅平面管 2N5551 的 $BV_{CEO} = 160\text{ V}$, $BV_{CBO} = 180\text{ V}$, 在仿真实验时选用电路的 V_{CC} 为 165 V.

根据仿真结果可以发现: 1) 根据 Multisim2001 对该电路的仿真可以得到脉冲幅值和宽度随雪崩电容 C_4 变化的曲线(图 4). 随着雪崩电容 C_4 的增大, 输出脉冲的幅值和宽度也将随之增大. 要适当的选 择雪崩电容 C_4 的大小以得到脉冲宽度和脉冲幅值都符合要求的纳秒脉冲; 2) 触发信号幅值的增大使输出脉冲幅值和宽度都随之增大. 从图 5 可以发现输出脉冲幅值和宽度都随着触发信号的升高而增大. 输出脉冲幅值和宽度的增大分别趋向于某一极值. 这可以从雪崩工作点的移动过程加以解释.

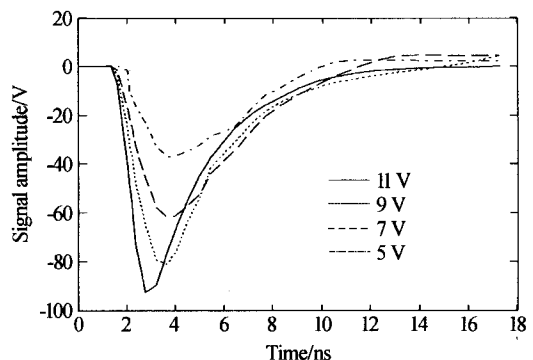


图5 触发信号对输出脉冲幅值的影响
Fig. 5 The influence of triggering signal on pulse amplitude

选择适当的触发信号幅值可以获得满意的输出脉冲的幅值和宽度。

用 Tektronix TDS3054B 500MHz 示波器对纳秒脉冲发生器的输出信号进行了测试。图 6 中, 横轴为时间, 纵轴为幅值。实验结果表明, 纳秒脉冲发生器可以从输出端输出上升沿时间短于 1.9~3.2 ns、上升幅度为 10~90 V 和宽度为 4~100 ns 连续可调的负脉冲, 用作为瞬态电流脉冲。纳秒脉冲发生器具有良好的稳定性和较好的负载能力。

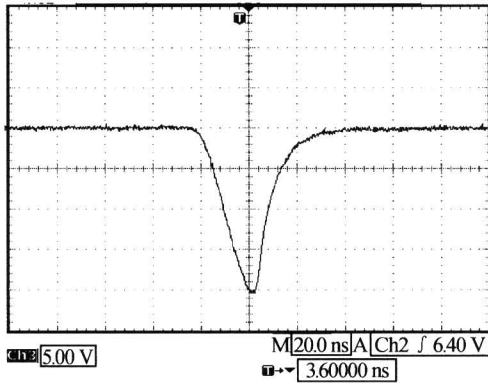


图 6 纳秒脉冲发生器输出一个电流脉冲, 其 10%~90% 上升沿时间为 12.6 ns

Fig. 6 Driving current pulse with a 10%~90% rising edge time of 12.6 ns from nanosecond impulser

3 纳秒脉冲磁场

光通信用高速微型磁光开关的关键之处是要求光开关的光路切换时间为纳秒数量级, 特别要求纳秒脉冲电流驱动的纳秒脉冲磁场的开闭时间为纳秒数量级。这就要求纳秒脉冲发生器驱动的纳秒脉冲磁场具有速度快、磁滞小、磁感应强度大、稳定性好和纳秒级上升沿等特性。为此, 研制出了结构简单、成本低、性能好的纳秒脉冲驱动的纳秒脉冲磁场器件。在实验过程中, 纳秒脉冲电流驱动的纳秒脉冲磁场的性能稳定可靠, 符合设计要求。

纳秒脉冲驱动的纳秒脉冲磁场的结构组成如图 7,

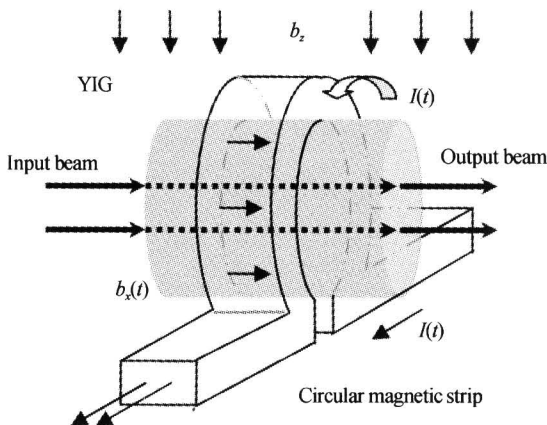


图 7 法拉第转子

Fig. 7 Schematic diagram of the Faraday rotator

其由不闭合环型行金属片及其引线组成。纳秒脉冲磁场的响应速度、磁滞程度、铁磁共振(FMR)频率和饱和点是设计过程中重点考虑的关键问题。在实验中发现, 采用与光传输方向垂直的外加偏置静磁场较大程度地加强了脉冲信号。静磁场确保光经过之处的磁化强度很好的恢复到 0 值, 在 YIG 晶体内部提供很高程度的磁化均匀性。

在通电情况下, 纳秒脉冲电流沿着圆周方向通过不闭合环型金属导体, 产生一个沿着轴向的瞬态磁场。该瞬态磁场对不闭合环型金属片中间的磁光晶体进行磁化, 进而对通过磁光晶体的偏振光产生旋转作用。在图 7 中, 电流脉冲分量沿着光传输方向产生一个时变的磁场分量 $b_x(t)$ 。这磁场分量沿着光传输方向在磁光晶体中产生磁化强度 M 。在垂直光传输方向上施加静磁场 b_z , 可以确保在电流脉冲通过之后 M 恢复到其 0 值。借助沿着 x 方向的磁化强度 M_x , 法拉第效应使偏振面产生旋转^[5]。

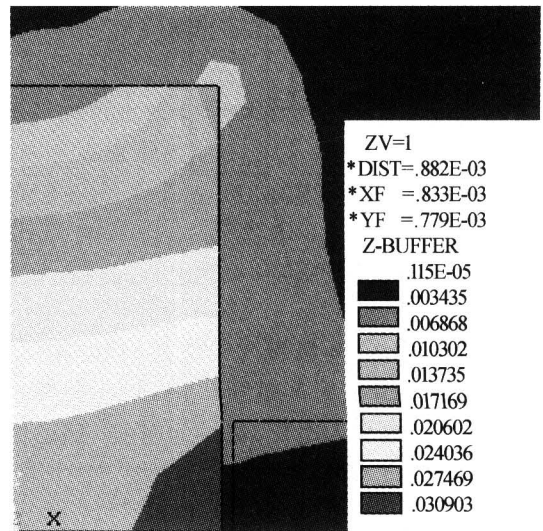


图 8 法拉第转子磁场分析图

Fig. 8 Result diagram of magnetic field in the Faraday rotator

本文运用美国 ANSYS 公司推出的 CAE 工具软件 ANSYS 8.0 对纳秒脉冲驱动的纳秒脉冲磁场进行了瞬态磁场和热分布的仿真。应用 FEA 仿真的结果与理论分析结果一致。实验中采用的软磁铁氧体的相对磁导率为 1.7×10^3 。

在实验过程中, 纳秒脉冲发生器 VCC 电压为 165 V, 输出脉冲电流约为 1 A, 电压幅值为 10 V, 脉冲宽度为 10 ns。这些电信号在法拉第转子中产生的磁感应强度, $b_x(t)$, 为 31 mT。外加静磁场 b_z 为 100 mT。纳秒脉冲驱动的纳秒脉冲磁场具有良好的瞬态磁场和热分布特性。

4 实验与测试

在磁光开关的光路布局中, 偏振光旋转元件

(PRE)是一种核心器件。在图9中,光路的PRE由二个法拉第旋转器(磁光晶体)构成。当磁光晶体M-O(A)和M-O(B)的通电方向相反时,一个磁光晶体对偏振光旋转 45° ,另一个磁光晶体对偏振光旋转 -45° ,PRE在整体上对偏振光不起偏振作用,光路处于直通状态。当磁光晶体M-O(A)和M-O(B)的通电方向相同时,二个磁光晶体都对偏振光旋转 45° ,PRE在整体上对偏振光旋转 90° ,光路处于交叉状态。

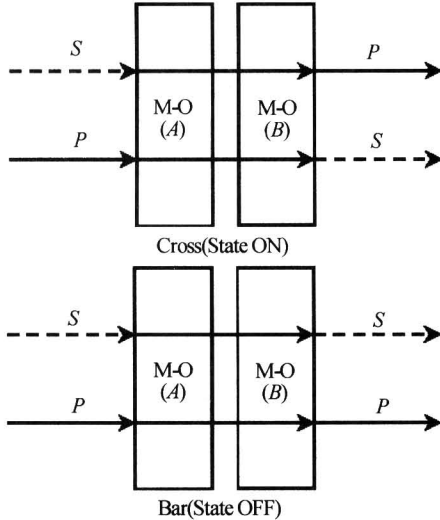


图9 磁光开关中的PRE的分布图

Fig. 9 The schematic diagram of PRE in magneto-optic switch

在实验室测试中,偏振无关性为 -30 dB,信道串扰为 -28 dB,开关时间短于 $1 \mu\text{s}$,插入损耗小于 3 dB. 图10中,横轴为时间,纵轴为幅值. 实验结果

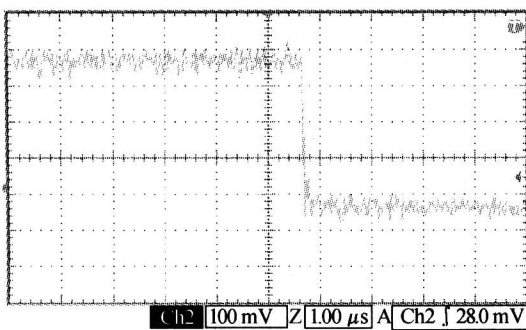


图10 磁光开关的开关响应

Fig. 10 The switching response of magneto-optic switch

表明,采用纳秒脉冲发生器和纳秒脉冲电流驱动的纳秒脉冲磁场大大地提高了磁光开关的性能,缩短了开关时间.

5 结论

在高速磁光开关布局方案中,根据以上的设计思想制作了一个磁光开关的实验样品. 通过纳秒脉冲发生器对法拉第旋转器电压进行控制可以实现光纤光路的切换,顺利实现光束的传输和切换. 总之,实验结果表明上述设计思想是可行的. 这种磁光开关系统的设计较为合理,制作简单,整体结构紧凑,切换控制灵活. 这一切都将为磁光开关的光路设计、纳秒脉冲磁场的高速控制和微细加工技术的进一步研究打下基础.

参考文献

- 1 Pierpaolo B, Davide P, Andrea T, *et al.* Polarization-independent bidirectional optical switch for communication signals. *Proc SPIE*, 2000, **4089**: 297~303
- 2 Irvine S E, Elezzabi A Y. Broadband optical modulation using magneto-optic Bi-YIG thin films. *Proc SPIE*, 2003, **5260**: 580~584
- 3 陈明,李淳飞,徐迈,等. 非线性一维光子晶体光开关与光双稳. 光子学报, 2005, **34**(1): 98~101
Chen M, Li C F, Xu M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 98~101
- 4 晏辉鸣,万鹏,吴兴坤. 光纤直接耦合微加工型 1×2 光开关. 光子学报, 2004, **33**(5): 536~539
Yan H M, Wan P, Wu X K. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 536~539
- 5 刘宏利,王肇圻,张铁南,等. 偏振控制的CeKNSBN类光纤光折变光开关. 光子学报, 2004, **33**(3): 277~280
Liu H L, Wang Z Q, Zhang Y N, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 277~280

A Micro High-Speed 1×2 Magneto-Optic Switch

Weng Zihua^{1,2}, Chen Zhimin², Zhu Yun², Wang Yijin², Yang Guoguang¹, Huang Yuanqing²

¹ State Key Lab. for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027

² Department of Mechanical and Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005

Received date: 2004-12-20

Abstract A novel micro high-speed 1×2 magneto-optic switch, which is used in high-speed all-optical communication network, is designed and analyzed. The study of micro high-speed magneto-optic switch mainly involves the optical route and high-speed control technique design. Nanosecond pulsed current transients from nanosecond impulser are used to switch the magnetization of the magneto-optic crystal, which propagates a 1550nm optical beam. The electronic circuits of nanosecond impulser and the pulsed magnetic field design schemes are both simulated on computer and tested by the experiments respectively. The experiment results state that the nanosecond impulser can output the pulse, with rising edge time 1.3 ~ 3.2 ns, voltage amplitude 10~90 V and pulse width 4~100 ns. Under the control of MCU singlechip, the optical beam can be stably switched and the switching time is less than $1\mu\text{s}$ currently.

Keywords Magneto-optic switch; Faraday rotation; Optical route; Magneto-optic crystal; Pulsed magnetic field



Weng Zihua received his B. S. degree from Nanjing Aeronautics Institute in 1986 and his M. S. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1994, and his Ph. D. degree at State Key Lab. for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University. He is an associate professor of Xiamen University. His research interests include fiber-optic communications devise and optical information processing.