

一种高速多通道光纤阵列光开关

侯丽峰¹,任兆玉¹,田进寿²,温文龙²,王俊锋²,刘虎林²,徐向晏²,
曹希斌²,宋凤军³,杨建伦³,党利宏⁴

(1 西北大学 光子学与光子技术研究所,西安 710069)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710119)

(3 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所,四川 绵阳 621900)

(4 解放军西安通信学院,西安 710106)

摘要:为了对短时间大视场一维光强信息进行采集,采用编码转换技术和自聚焦透镜矩形阵列设计了光开关,用小口径电光晶体实现了大视场的测量.采用 MOS 管级联的高压同步电路,使得系统具有结构紧凑、性价比高、寿命长等优点.实验结果表明:开关选通时间 100 ± 5 ns,前后沿小于 25 ns,消光比 1 100 : 1.

关键词:光纤阵列光开关;磷酸二氘钾(DKDP)电光晶体;自聚焦透镜矩形阵列;MOS 场效应管

中图分类号:TN27

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2009)12-3092-5

0 引言

高速光开关被广泛地应用中子探测实验中,为了提高探测的空间分辨率,往往采用大面积闪烁体,这样就需要有较大通光孔径的电光晶体和稳定性好的高压选通脉冲电路.然而,大口径电光晶体的选用和生长都很困难,且造价昂贵.为了提高入射光的透过率,电光晶体往往采用环状电极,大口径电光晶体加半波电压时,在晶体轴心处将产生最大的相位调制误差,其它的半径处产生的调制误差将随半径的增大而逐渐减小.影响电光晶体相位调制的精确性和开关的消光比;电场的不均匀性在反压电效应的作用下将导致晶体中各个部分产生的应变不一致,晶体中产生的残余应力导致应力折射率畸变和双折射,相应地引起光学波前畸变和光束退偏^[1],降低了开关效率.晶体越大,上述缺点就越明显.自聚焦透镜具有很好的聚光、准直和成像特性,是改善光学系统性能的重要元件^[2-3].本文设计的光开关,采用了自聚焦透镜阵列—在自聚焦透镜的基础上发展起来并广泛应用于光学成像系统的新型透镜^[4],使得用较小截面的 DKDP 晶体($\Phi 20$),克服上述缺点,实现了对较大面积闪烁体($\Phi 42$)辐射光的接收和选通.

高压脉冲同步驱动电路目前多采用雪崩管级联实现,虽雪崩管的开关速度快,但单个雪崩管所承受的击穿电压较低,一般在 300 V 左右,电路中需要的

雪崩管个数偏多,同时要求选用击穿电压和漏电流尽可能一致的雪崩管^[5].选取特性一致的管子较为困难,电路会由此而不稳定.本开关选用绝缘栅型场效应管(即 MOSFET)级联作为高压选通电路,克服了以上缺点.实验结果测得:光开关的选通门宽为 100 ± 5 ns,前后沿小于 25 ns,消光比为 1 100 : 1.可广泛应用于激光约束核聚变(ICF)、激光技术、核物理、高速摄影等领域.

1 光开关的原理和构造

高速多通道光纤阵列光开关(以下简称光开关)的原理如图 1,主要由三部分组成:主光路单元、延时同步单元和高压选通脉冲发生电路.主光路单元由输入光纤阵列变换器(输入端由多根光纤排成一行,末端耦合有自聚焦透镜矩形阵列,自聚焦透镜呈 7×6 矩形排列)、起偏器(格兰-泰勒棱镜)、DKDP 晶体、检偏器(格兰-泰勒棱镜)、输出光纤阵列(输入端呈矩形排列、输出端各配接有一个光电倍增管以实现微弱信号的放大)等组成;高压选通电路由脉冲触发电路、高压源、延时电路等组成;延时同步单元主要实现高压选通脉冲和闪烁体出射光之间的同步功能,主要由激光光束(和驱动核聚变的激励光同源)、光延迟和光电二极管(PIN)以及触发开关组成.中子轰击闪烁体发出波长在 600 ± 20 nm 范围的可见光,经光纤阵列变换器输入端接收,并经自聚焦透镜准直后,入射到起偏器上,改造成线偏振光后再入射到 DKDP 电光晶体上,当 DKDP 晶体上未加选通电压时,由于检偏器的偏振方向和起偏器的偏振方向相互垂直,输入光无法通过,光开关处于关断

状态,当在 DKDP 晶体上加上脉冲电压幅值等于 DKDP 半波电压幅值时,经起偏器改造成的线偏振光从 DKDP 出射时,偏振方向旋转 90° ,与检偏器的偏振方向相同,光开关处于打开状态,输入光迅速通过 DKDP 和检偏器到达后端光纤阵列变换器,经光

电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)倍增,记录下闪烁体径向某一条线上的中子强度随时间和位置的变化情况.其中的光延迟和延时电路 1 用于光脉冲和选通门脉冲的同步调整,延时电路 2 用于调整门脉冲的宽度.

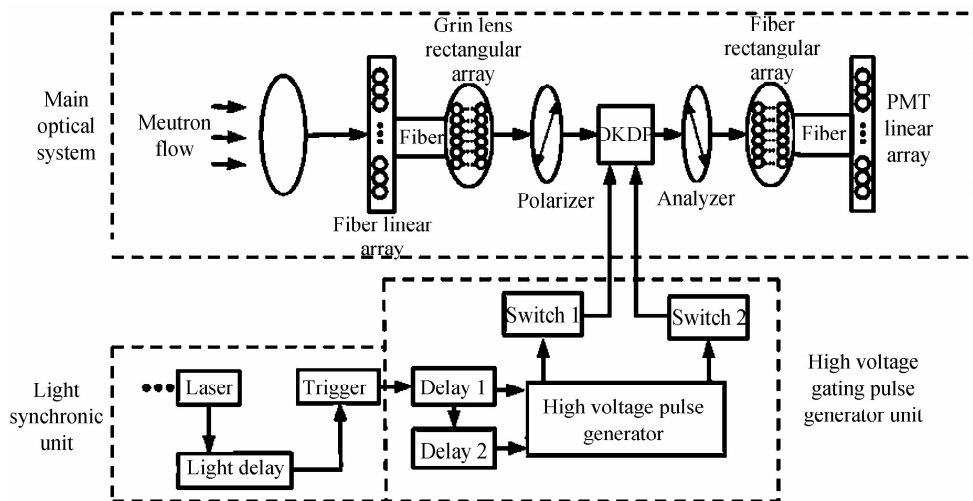


图 1 高速多通道光纤阵列光开关原理

Fig. 1 Illustrative diagram of High-speed multi-channel optical switch of fiber array

1.1 光路系统

在辐射成像试验中,产生的中子由于不带电它不能直接引起物质电离而被探测.闪烁体(国产 1432 红光闪烁体)被中子轰击后产生 $600 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ 的可见光,采集其光强随时间的变化,也就实现了对辐射成像过程中中子辐射区域变化过程的记录.根据实验需要:在 100 ns 范围内采集闪烁体径向 40 mm 的一维发光信息,闪烁体径向对应于中子辐射区域半径,测量闪烁体径向发光信息就可得出中子辐射区域的时空变换过程,不仅可以测量中子辐射区域不同位置的辐射强度,还可以测量辐射强度与随时间的变化过程.

如图 2,起偏器前端光纤阵列变换器的基本结构是:输入端将 42 根单模光纤编码并均匀排成长为 42 mm 的一列,端面固定、抛光,镀 $600 \pm 20 \text{ nm}$ 的增透膜,以提高对波长 $600 \pm 20 \text{ nm}$ 的光的接收效率,然后对光纤进行编码、排丝,转换成 7×6 光纤矩形阵列. 7×6 光纤矩形阵列后端连接 $\Phi 0.9 \text{ mm}$ 自聚焦透镜形成 7×6 自聚焦透镜矩形阵列,各自聚焦透镜中心间距为 1 mm .自聚焦透镜矩形阵列使得 42 束出射光得到准直,平行入射于起偏器、DKDP 和检偏器,最后进入检偏器后面的光纤阵列变换器中(接收光纤阵列),接收光纤阵列的输入端是由 7×6 光纤矩阵构成,输出各耦合一个光电倍增管,由于在光开关中采用了自聚焦透镜矩形阵列,使得从前一个光纤阵列变换器中输出的光能够一致平行地垂直入射于起偏器、DKDP 等,大大减少了光无源器

件的插入损耗,然后并高效地耦合到接收光纤变换器中,接收光纤阵列输入端相邻光纤之间的光串扰也非常小,测得串扰仅为 0.062 dB ,可以忽略.

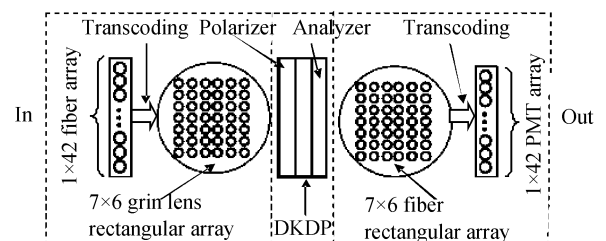


图 2 光开关阵列转换

Fig. 2 Transcoding figure of optical switch arrays

为了提高光开关的消光比,除了选用高纯度的单晶 DKDP 晶体外,还需要保持通光口径内电场尽可能均匀分布,这就要求 DKDP 横向尺寸与纵向尺寸之比应小于 $1:2$ ^[6],兼顾成本以及性能等方面的综合因素,选用口径为 $\Phi 20 \text{ mm}$,长度为 44 mm 的 DKDP,用两块偏振方向正交放置格兰-泰勒棱镜作为起偏器和检偏器,测得它们在波长 658 nm 的消光比达到 $10^6 : 1$.

计算 DKDP 晶体的纵向半波压.

将波长 $\lambda = 0.658 \mu\text{m}$,代入折射率公式^[7]

$$n_0^2 = 1.661145 + \frac{0.586015\lambda^2}{\lambda^2 - 0.06017} + \frac{0.691194\lambda^2}{\lambda^2 - 30} \quad (1)$$

得 DKDP 的折射率为

$$n_0 = 1.526965288 \quad (2)$$

式中, λ 表示波长, n_0 表示 DKDP 的折射率.

当电光系数^[5] $\gamma_{63} = 26.4 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 时,

DKDP 纵向半波压 $U_{\lambda/2}$ 为

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma_{63}} = \frac{0.658}{2 \times 1.526965288^3 \times 26.4 \times 10^{-12}} = 3500 \text{ V} \quad (3)$$

1.2 高压选通电路

将 MOS 管级联实现高压选通电路. MOS 管的优点有:寿命长;多子工作,开关速度快;输入阻抗高;电压控制开关,需要驱动电流小^[8]. 图 3 为本系统中的超快高压脉冲电路. $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$ 是阻值相同的高阻值均压电阻,其阻值远大于功率 MOS 管导通时的源漏端等效电阻和 R_{bias} 的阻值,但远小于 MOS 管未导通时源漏端等效电阻. MOS 管未导通时, n 个 MOS 管的漏源极将电源电压 V_{dd} 均分,每个功率 MOS 管源漏端电压为 V_{dd}/n ,此时输出端的电压约为 V_{dd} .

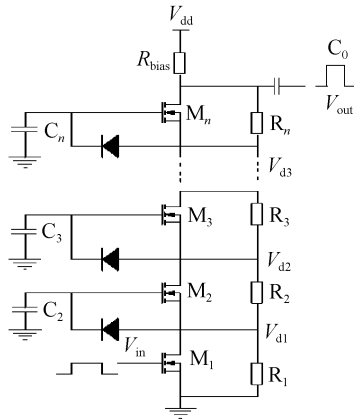


图 3 N 沟道 MOSFETs 串联结构

Fig. 3 Cascaded structure of N-channel MOSFETs

单个功率 MOS 管的开启电压为 $V_{\text{gs(on)}}$, M_1 在幅度为 $V_{\text{gs(on)}}$ 的触发信号上升沿到达时迅速开启,使得 M_1 的源漏瞬间导通,使其源漏之间电阻迅速变小, $V_{\text{d1}} \approx 0 \text{ V}$, 这样电压在除 R_1 以外的均压电阻间会重新分配. 在 M_1 导通后, 由于 V_{d1} 减小, C_2 里的电荷在 C_2 和 M_2 的漏源端等效电容 C_{gs2} 间重新分配, 使得在 M_2 的栅极和源极间存在电压变化 ΔV_{gs2} . 当 ΔV_{gs2} 的幅度大于开启电压 $V_{\text{gs(on)}}$ 时, ΔV_{gs2} 可以瞬间使 M_2 导通, 且使得 M_2 漏端电压接近 0 V . 依此类推, 在 M_1 的触发下, $M_2, M_3 \dots M_n$ 迅速依次导通, 直到 M_n 导通时, M_n 漏端的电压近似为 0 V , 从而使得耦合电容 C_0 输出瞬时高压负脉冲.

在触发信号由 $V_{\text{gs(on)}}$ 变为低电平之后, M_1 立刻截止, 随后 $M_1, M_2 \dots M_n$ 从饱和区退入截止区, MOS 管也依次关闭. 然后, 整个超快高压脉冲获取电路将等待下一次触发脉冲的上升沿到来.

图 3 中各个等效输入电容的计算^[9]. 将 V_{dd} 设为 6000 V , 以 STP3N150 型号的场效应管为例计算出

所需要的参量值. 依照 STP3N150 场效应管参量表, $C_{\text{iss}} \cong C_{\text{gs}} = 939 \text{ pF}$, $C_{\text{rss}} \cong C_{\text{gd}} = 13.2 \text{ pF}$, 栅源变化电压为 30 V . 计算得到它的输入等效电容为

$$C_2 = \frac{30 \times (939 + \frac{1500}{30} \times 13.2)}{1500 - 30} = 32.6 \text{ pF} \quad (4)$$

根据公式

$$C_n = C_2 / (n - 1) \quad (5)$$

可得 $C_3 = C_2 / 2$, 依次可得到 MOS 管串联结构中的等效输入电容.

高压选通脉冲发生单元的工作方式是: 从驱动光源分出的一束光(跟激励产生中子的光同源, 因而具有时间相关性)经光延迟器和传输线电延迟器 1 共同延迟后(如图 1), 使闪烁体产生的光脉冲与电脉冲同步, 然后驱动开关 1, 在电光晶体前端产生一个前沿为纳秒量级的高压脉冲, 使普克盒迅速打开; 从延迟器 1 出来的触发脉冲再经过延迟器 2 驱动开关 2, 同样产生高压脉冲, 使 DKDP 迅速关断, 开关 1 和开关 2 之间的导通时间差, 即为电光开关的选通时间, 如图 4 为 DKDP 高压脉冲触发时序图. 通过手动调节延迟器, 可以实现选通时间在 60 ns 、 80 ns 、 100 ns 、 120 ns 四档可调.

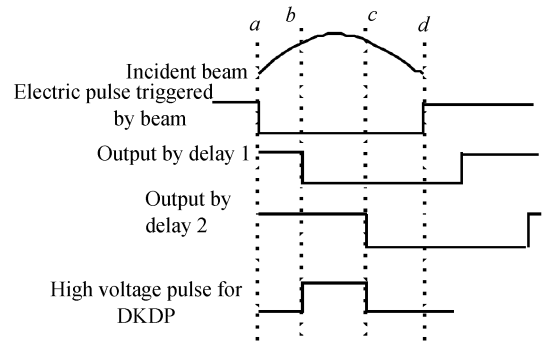


图 4 DKDP 高压脉冲触发时序

Fig. 4 Trigger timing sequence of DKDP's high voltage pulse circuit

2 结果与讨论

静态实验选用波长为 658 nm 的半导体连续激光器作光源, 加直流高压 3978 V (本开关 DKDP 的实际半波压, 比计算所得理论值高 478 V) 于 DKDP 上, 测得静态消光比为 $1:100$, 输出平均损耗为 4 dB .

图 5 是选用波长为 658 nm 的半导体连续激光器作光源(因为在 $600 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ 间的高功率激光很难产生), 将脉宽 100 ns , 幅值 3978 V 脉冲电压加在 DKDP 上得到选通光脉冲, 其选通时间也是 100 ns , 前沿小于 20 ns , 后沿小于 25 ns . 光脉冲初始有尖峰, 主要是 DKDP 的容抗所致; 图 6 为光开

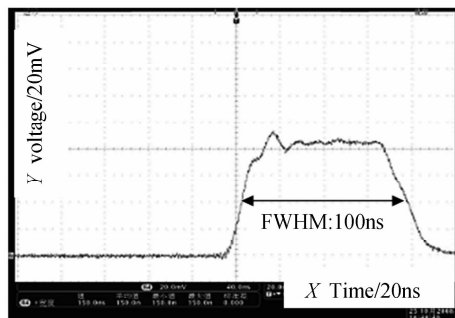


图5 光开关选通光脉冲

Fig. 5 The gating light pulse of optical switch

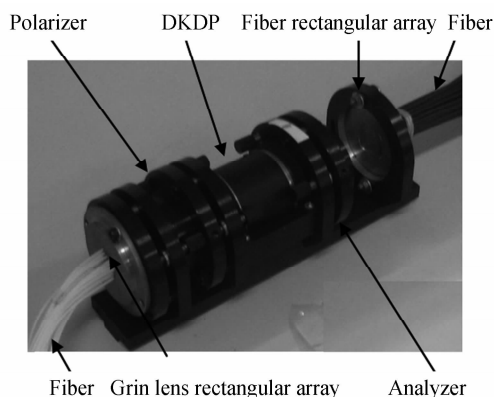


图6 光开关内部结构图

Fig. 6 The inner structure of optical switch

关的内部主要结构的实物图。

下一步,改用脉冲激光光源触发电脉冲,实现动态光选通。另外,在电路方面,改善驱动电路输出容抗,提高与 DKDP 晶体的匹配性,消除尖峰;减小前后沿时间;同时也需要对光信息采集后设计一个低通滤波器来消除纹波。在光路方面,选取光纤时,使得每根光纤的传输损耗和插入损耗应与其它光纤的一致性,这样也可以减小纹波;增加光纤数和自聚焦透镜数,使自聚焦透镜阵列由矩形变为圆形,并自聚焦透镜呈紧密六角形排列,可提高光开关的空间分辨率。

3 结论

系统将光纤矩形阵列应用到电光开关中,很好地解决了小口径电光晶体实现大视场一维信息的采集;基于 MOSFET 级联的高压选通电路,采用两路高压脉冲延时叠加,且脉冲幅度 $0\sim 6\ 000\text{ V}$ 可调,最后通过光电倍增管放大后实时采集处理,可以实现光选通在 60 ns 、 80 ns 、 100 ns 、 120 ns 可调,开关

比高,稳定性好,在闪烁体辐射成像测量系统中,可以实现测量辐射区直径在极短时间范围内随时间的连续变化过程,输入光纤阵列变换器中的光纤如果采用直径更细的光纤并配接直径为 0.3 mm 甚至 0.18 mm 的自聚焦透镜,则可以进一步提高这种光开关的空间分辨率。

参考文献

- [1] de YOREO J J, WOODS B W. Investigation of strain birefringence and wavefront distortion in 001 plates of KD_2PO_4 [C]. *SPIE*, 1991, **1561**:50-58.
- [2] ZHU Shao-li, XU Qiu-shuang, LIU De-sen. The analysis of GRIN in optical fiber collimator [J]. *Journal of Southwest China Normal University*, 2004, **29**(3):379-382.
朱少丽,徐秋霜,刘德森.自聚焦透镜在光纤准直器中的应用分析[J].西南师范大学学报,2004, **29**(3):379-382.
- [3] LI Yu-lin, Huo Jun-min, HE Zheng-quan. The development and application of GRIN lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(Z1):302-306.
李育林,霍军民,贺正权.梯度折射率透镜的开发及应用[J].光子学报,2000, **29**(Z1):302-306.
- [4] TIAN Wei-jian, YAO Sheng-li, CHEN Rong-li, et al. Multi-Channel imaging system for detecting moving object [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1):47-49.
田维坚,姚胜利,陈荣利,等.用于运动目标探测的多通道成像系统[J].光子学报,2002, **31**(1):47-49.
- [5] GLOTZ M, EICHLER H J. Cavity dumping of a mode-locked pulsed Nd:YAG laser [J]. *Phys E:Sci Instrum*, 1987, **20**(12):1493-1496.
- [6] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Germany: Springer-Verlag, 1976:464-471.
- [7] ZHANG Ke-cong, WANG Xi-min. Nonlinear optical crystal material science [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2005:149-150.
张克从,王希敏.非线性光学晶体材料科学 [M]. 3 版.北京:科学出版社,2005:149-150.
- [8] SPENCER R R, GHAUSI M S. Introduction to electronic circuit design [M]. ZHANG Wei, GUAN Xin, LIU Yan-yan, et al, transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005:95-96.
斯潘塞 R R,高西 M S.电子电路设计基础 [M].张为,关欣,刘艳艳,等,译.北京:电子工业出版社,2005:95-96.
- [9] HESS H, BAKER R J. Transformerless capacitive coupling of gate signals for series operation of power MOS devices [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, **15**(5):923-930.

A High-speed Multi-channel Optical Switch of Fiber Array

HOU Li-feng¹, REN Zhao-yu¹, TIAN Jin-shou², WEN Wen-long², WANG Jun-feng², LIU Hu-lin²,
XU Xiang-yan², CAO Xi-bin², SONG Feng-jun³, YANG Jian-lun³, DANG Li-hong⁴

(1 *Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(2 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(3 *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

(4 *Xi'an Communication Institute of PLA, Xi'an 710119, China*)

Abstract: The scintillator radiation imaging measurement system, which triggering and measuring time spectra are often controlled by optical switch, is used to measure the continuous time-varying process of diameter of the emission region in very short time. For collecting one-dimensional light intensity with large field of view in short time, the transcoding technology and GRIN lens rectangular array are introduced in this optical switch, and measuring the large field of view by using small-caliber electro-optic crystal is achieved. As high-voltage synchronous circuit based on Series of MOSFETs is introduced, the systems have some merits, such as compact structure, high function-price ratio, long life and so on. The results reveal that the gating time is 100 ± 5 ns, rising edge time and falling edge time is within 25 ns and extinction ratio is 100 : 1.

Key words: Optical switch of fiber array; DKDP electro-optical crystal; Grin lens rectangular array; MOS field-effect transistor



HOU Li-feng was born in 1979. He received his B. S. degree from Physical Electronics Department, Xinzhou Teachers University in 2005. Now he is pursuing his M. S. degree at Northwest University, and his research interests focus on optoelectronic technique.