

文章编号: 1001-1455(2009)01-0045-04

# 用于冲击波和爆轰物理实验中的声光开关\*

刘 乔, 李泽仁, 刘 俊

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 针对冲击波和爆轰物理实验中对光开关的使用要求, 提出了一种基于布拉格衍射效应的行波式声光开关, 得到了声光开关的开关波形、消光比、抗激光损伤特性及能量利用率等。结果表明, 与传统的普克尔电光开关相比, 声光开关有效地消除了开关光信号顶部的“振铃”现象, 消光比达到 5000 : 1, 同时减小了开关体积、提高了开关工作稳定性。声光晶体抗激光损伤阈值大于  $2.26 \text{ kW/cm}^2$ , 开关能量利用率达 70%。开关触发固有延迟和上升沿时间分别为 900 和 440 ns, 满足测试系统对开关同步性的要求。另外开关光信号宽度可由触发信号任意调节, 能满足不同测试情况的需要。

**关键词:** 爆炸力学; 声光开关; 声光调制; 开关波形; 消光比; 激光干涉测速

**中图分类号:** O384 **国标学科代码:** 130 · 35 **文献标志码:** A

激光干涉测速技术, 特别是其中的 VISAR (velocity interferometer system for any reflector) 和法布里-珀罗干涉仪, 是近 30 年发展起来的冲击波和爆轰物理领域重要的波剖面测试手段, 主要测量冲击波作用下各种材料样品的自由面速度或内部粒子速度随时间的变化过程。它在原理上利用了光学多普勒效应, 通过对从样品表面反射回的带有多普勒频移信息的信号光进行频率追踪来获得样品速度变化历程。在 VISAR 测试实验中, 为避免获取信号前样品和探测器的光电阴极长时间暴露在强光照下, 同时又保证记录时所需的信噪比, 通常需要在激光光路中设置一个光开关。样品未启动时使开关关闭, 这样样品和探测器可免受强光照射; 在临近样品启动的某一时刻打开开关, 让激光通过, 等信号记录完毕后再将开关关闭, 从而完成一次记录。

根据激光测速系统的上述特点, 与其配合的光开关应满足下列要求<sup>[1]</sup>: (1) 开关应为常闭型, 预定开始记录干涉信号前用触发信号打开让光通过, 记录完成后再关闭; (2) 开关基质材料的抗光损伤阈值应大于所用激光的光强; (3) 开关的触发固有延迟和上升前沿时间应为微秒量级, 全开时间应有几十微秒, 以保证实验过程取全信号, 且开关时间能按实验要求进行变动; (4) 开关效率(消光比)应大于 100 : 1; (5) 开关应放置在激光器和实验样品之间, 使之既能保护探测器, 又能保护样品。

目前, 在激光干涉测速系统中广泛采用的是普克尔型 DKDP 晶体电光开关<sup>[2]</sup>。其性能指标虽基本满足上述要求, 但经过几年来在测试实验中的应用, 发现该开关在使用中存在以下几个缺点: (1) 开关光信号波形顶部有明显周期性“振铃”现象, 虽经反复调试仍难以消除, 这使得对某些实验的数据采集和处理带来一定影响; (2) 开关调节困难, 且消光比稳定性较差; (3) 开关由电光晶体、偏振棱镜及高压电源等组成, 体积较大, 携带不便; (4) 由于使用时电光晶体需加几千伏高压, 操作具有一定的潜在危险性; (5) 开关研制成本较为昂贵。

声光开关作为另一种常用的光开关技术, 具有输入电压低、驱动功率小、温度稳定性好、光学系统简单以及响应时间快、控制方便等优点<sup>[3]</sup>, 目前在激光技术领域被广泛用作低功率激光腔内的调 Q 或锁模开关<sup>[4-5]</sup>。本文中针对电光开关存在的缺点, 考虑到激光干涉测速系统对光开关的要求, 提出一种基于布拉格衍射效应的行波式声光开关。初步实验中, 在不显著降低光能利用率的前提下, 该开关可克服电光开关难以消除的“振铃”现象、大幅度提高消光比及其稳定性, 同时减小器件体积、降低研制成本。

\* 收稿日期: 2007-08-15; 修回日期: 2008-01-11

作者简介: 刘 乔(1973—), 男, 硕士。

## 1 声光开关工作原理

当超声波在声光介质中传播时,介质将产生弹性形变,密度呈现疏密的交替变化,介质折射率也随之发生相应的周期性改变。这样,可以把超声场作用下的介质等效为一块“相位光栅”,光栅间距(光栅常数)等于声波波长。当光波通过该介质时,就会产生光的衍射。衍射光的强度、频率、方向等都随着超声场的变化而变化<sup>[6]</sup>。一个完整的基于布拉格衍射效应的行波式声光调制器由声光介质、电-声换能器、吸声(或反射)装置及驱动电源等几部分组成,如图 1 所示。

当外调制信号作用于驱动电源时,驱动源产生幅度调制的高频电信号施加于电-声换能器上。由于反压电效应,电-声换能器将在外电场作用下产生机械振动而形成振幅调制的超声波,该超声场以行波方式在声光晶体中传播,使晶体成为“体光栅”。当激光以与声波波阵面呈布拉格角的方向入射时,各高级次衍射光将因相互干涉而抵消,光能量只集中在 0 级(未衍射)和 +1 级(或 -1 级)衍射光上。在声功率较小的情况下,衍射效率  $\eta_s$  随声强度  $I_s$  呈线性单调增加关系为  $\eta_s = I_1 / I_i \approx (\pi^2 L^2) / (2\lambda^2 \cos^2 \theta_B) \cdot M_2 I_s$ 。其中,  $I_1$  为一级衍射光强,  $I_i$  为入射光强,  $L$  为声光介质长度,  $\lambda$  为入射激光波长,  $M_2$  为声光材料的品质因数,  $\theta_B$  为布拉格角。这样,在入射光强  $I_i$  一定的情况下,通过控制声强度  $I_s$  (即控制加在电声换能器上的电功率)就可达到控制衍射光强的目的,实现声光调制。当声光调制器用作光开关时,若使加在电声换能器上的电功率为零,则晶体内不形成超声场,从而衍射光强也为零,相当于开关关闭;若在电声换能器上加一个方波电信号,则在方波持续时间内在晶体中将形成体光栅,从而使 +1 级衍射光强也以相应的方波信号形式变化,相当于开关打开。由于工作方式不同,声光开关的消光比可以远高于电光开关。

## 2 实验

### 2.1 实验布局

采用图 2 所示实验布局对声光开关的主要工作性能进行研究。实验光源采用二极管泵浦连续固体激光器,其输出激光波长为 532 nm,输出功率最高可达 10 W。在声光开关的应用中,声光材料的选择主要取决于其是否具有高的衍射效率( $M_2$  因子要高)和抗激光损伤阈值,经综合比较,选用了基于  $\text{TeO}_2$  晶体的声光调制器进行声光开关的搭建。晶体中超声波频率为 129 MHz,声速为 4.2 km/s。由于相对激光器输出光束直径(约 2.25 mm)而言,晶体内声光相互作用区尺寸有限(晶体尺寸为 18 mm × 10 mm × 5 mm,其中轴向尺寸为 18 mm),为保证衍射效率,在激光器与声光晶体间加了一个缩束比为 3 : 1 的透镜组。另外,由于利用的是 +1 级衍射光,故在声光晶体后适当位置加了一个  $\varnothing 3$  mm 的小孔板,以挡掉未衍射的 0 级光和其他高级次衍射光。触发声光调制器驱动电源的开关电信号由一个脉冲信号发生器提供,为与普克尔电光开关做对照,实验中该信号被设置为持续时间 100  $\mu\text{s}$  的方波。光电探测器部分采用了光电倍增管,由于光电倍增管为弱信号探测器,为避免强光照造成仪器损坏,利用一根多模光纤进行导光,这样通过调节光纤前的耦合透镜,便可将输入光电倍增管的光强控制在其动态范围内。光电倍增管的输出由一台数字示波器进行记录,整个测试系统的同步由一台 VST 同步机进行协调。

在实际激光干涉测速实验的前期调试阶段,常需要使光开关工作在漏光状态,以进行开关的调节以及对靶和干涉仪调试等工作。对声光开关而言,这可通过将其驱动源外触发端悬空来实现,此时驱动源

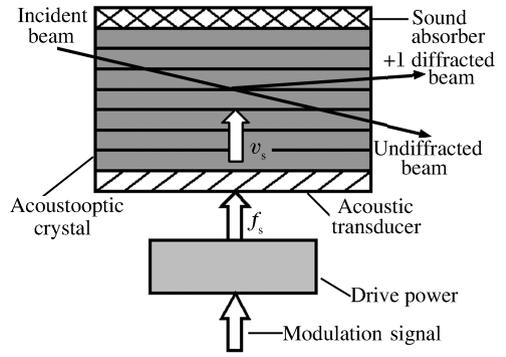


图 1 声光调制器结构示意图

Fig. 1 Sketch of an acoustooptic modulator

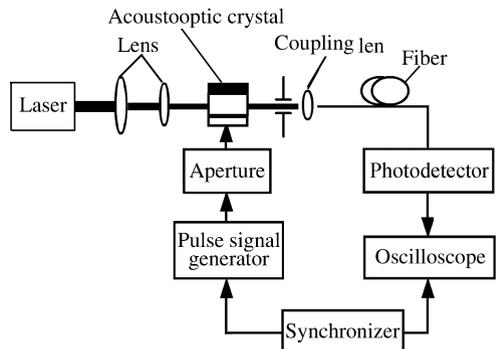


图 2 声光开关性能研究的实验布局图

Fig. 2 Experimental set-up for the performance of the acoustooptic switch

输入给声光晶体电声换能器的将是一个振幅不变的连续高频电信号(频率即为超声波频率),相应的+1级衍射光也将成为一个光强不变的连续波。在正式动态测试开始前,再用同轴电缆将脉冲信号发生器和声光开关驱动电源相连,这时驱动源的输出就取决于外触发信号。若脉冲信号发生器给出一个方波电信号,则光路中也将相应地产生一个方波光信号。

## 2.2 结果与分析

参照激光干涉测速系统对光开关的要求,分别针对声光开关的消光比、光信号波形、晶体抗光损伤阈值以及光能利用率等进行了实验研究。首先利用光功率计对声光开关的消光比进行了测量,结果显示其消光比大于 5000 : 1,远远大于测速实验中要求的 100 : 1,也远大于电光开关的消光比(通常为 500 : 1)。其中开关处于关闭状态时的漏光完全是由于入射光束在晶体内形成的散射光造成的。为减少散射光的影响,测量时在功率计前加了一个 $\varnothing 3\text{ mm}$ 的小孔光阑。

图 3(a)为用示波器记录的声光开关光信号波形,图 3(b)为作为比较的电光开关光信号波形。从图 3(b)中可清楚看到,开关光信号顶部是以  $10\ \mu\text{s}$  为周期的光强振荡,这一现象的产生与电光开关的工作原理及工作状态有关,虽经仔细调节可部分减缓但仍无法消除。而从图 3(a)所显示的开关光信号波形可看出,采用声光开关后完全消除了开关光信号顶部的“振铃”现象;并且开关固有延迟及波形上升沿时间分别达到了 900 与 440 ns,完全满足测速实验对开关同步性的要求。

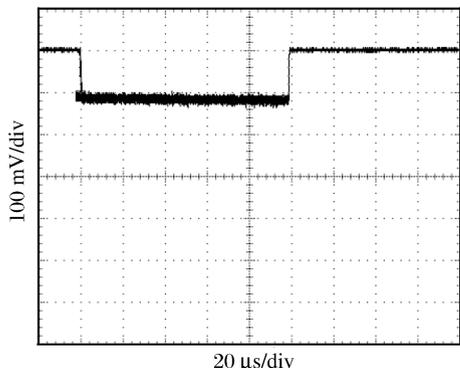


图 3(a) 声光开关光信号波形

Fig. 3(a) Light signal of the acoustooptic switch

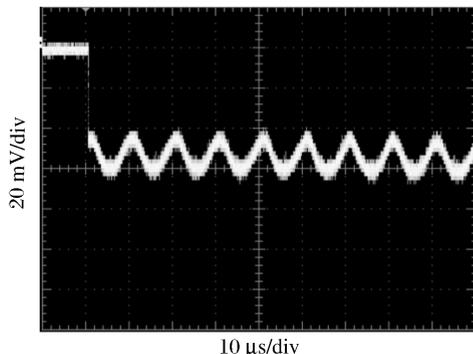


图 3(b) 电光开关光信号波形

Fig. 3(b) Light signal of electrooptic switch

开关介质的抗激光损伤阈值是光开关的重要指标之一。从测试系统实际可能使用的激光功率水平出发对  $\text{TeO}_2$  晶体的抗激光损伤阈值进行实验研究。实验时先将 Verdi-10 激光器输出的激光经 3 : 1 缩束后再照射到  $\text{TeO}_2$  晶体上,然后将激光功率从 0.1 W 开始以一定间隔缓慢增加,直到激光功率增加到 10 W 为止。在整个过程中保持对声光开关工作状态的监测,最后将  $\text{TeO}_2$  晶体取下用肉眼观察,以确认是否损坏。实验结果表明, $\text{TeO}_2$  晶体在 10 W 激光照射下仍然完好无损,且能正常工作。考虑到 3 : 1 缩束后激光束直径为约 0.75 mm,可认为声光晶体的抗激光损伤阈值大于  $2.26\ \text{kW}/\text{cm}^2$ 。

光能利用率也是开关的一项重要指标。对声光开关而言,它主要由衍射效率、晶体透过率等综合决定。其中,衍射效率是影响开关光能利用率的最主要因素。针对 3 : 1 缩束情况下的声光调制器+1级衍射光效率进行测量,经过仔细调整并多次测量后发现其平均值约为 75%。同时也对声光晶体静态透过率进行了测量,结果为约 94%。这样,可认为该声光开关光能利用率为约 70.5%,已接近电光开关。

通过实验时对声光开关的调试还发现,开关的工作状态取决于其与入射激光的角度,开关稳定性主要取决于角度稳定性。利用专门设计的调节架固定声光开关,实现开关的快速调整且在较长时间内保证了开关的工作稳定性。这对于实际测速实验而言是十分重要的。

## 3 结 论

利用基于  $\text{TeO}_2$  晶体的行波式声光调制器搭建了一个用于激光干涉测速系统中的声光开关。实验研究了该开关的光信号波形、消光比、晶体抗光损伤阈值以及光能利用率等,结果表明,与传统的普克尔

型电光开关相比,声光开关能有效消除开关光信号顶部的“振铃”现象、改善信号波形,且开关消光比得到大幅度提升,达到 5000 : 1;开关光能利用率达 70%,接近电光开关指标,晶体抗光损伤阈值也在系统工作激光功率水平之上。另外,开关固有延迟及波形上升沿时间均在微秒量级内,完全满足系统对开关同步性的要求。以上研究表明,声光开关作为电光开关的一种可能的替代品在实际激光干涉测速系统中具有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 北京:国防工业出版社,2001:126-129.
- [2] 胡绍楼,汪源浚,彭其先,等. 激光干涉测速用光电开关[J]. 光电工程,1996,23(12):55-59.  
HU Shao-lou, WANG Yuan-jun, PENG Qi-xian, et al. Optoelectric shutter for laser velocity measurement with interferometry[J]. Opto-Electronic Engineering, 1996,23(12):55-59.
- [3] 吴泉英,田芬. 声光调制器在 YAG 激光器中的应用[J]. 声学技术,2000,19(4):220-221.  
WU Quan ying, TIAN Fen. Application of acoustic-optics modulator in the YAG Laser[J]. Acoustic Technique, 2000,19(4):220-221.
- [4] 何晓亮,刘伟,艾毅智. 连续固体激光器用声光 Q 开关[J]. 压电与声光,2002,24(1):23-25.  
HE Xiao-liang, LIU Wei, AI Yi-zhi. Acoustooptic Q-switch used in CW solide laser system[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2002,24(1):23-25.
- [5] 王春雨,孔勇,郭明秀,等. 输出高重复频率脉冲列的全固态激光器[J]. 中国激光,2005,32(5):601-603.  
WANG Chun-yu, KONG Yong, GUO Ming-xiu, et al. High-repetition-rate LD-pumped solid state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005,32(5):601-603.
- [6] 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京:科学出版社,2000:29-50.

## A acoustooptic switch for shock wave and detonation physics experiments

LIU Qiao\*, LI Ze-ren, LIU Jun

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

**Abstract:** A travelling wave acoustooptic switch based on Bragg diffraction was proposed according to the requirement for optical switches used in shock wave and detonation physics experiments. Some important parameters of this acoustooptic switch such as the switch waveform, extinction ratio, light damage threshold and energy availability were experimentally obtained. The results show that compared with electrooptic switches, the acoustooptic switch effectively eliminates the ringing phenomena existing on the top of light switch waveforms, reduces the instrument volume, and improves the working stability. The extinction ratio is about 5000 : 1. The light damage threshold of the acoustooptic crystal is larger than 2.26 kW/cm<sup>2</sup> and the energy availability of the switch reaches up to 70%. The inherent delay time and rising edge time are 900 ns and 440 ns, respectively, which meet the synchronism requirement of the measuring system. In addition, the duration of the switching time can be easily changed by the trigger signal to meet different test demands.

**Key words:** mechanics of explosion; acoustooptic switch; acoustooptic modulation; switch waveform; extinction ratio; laser interferometry for measuring velocities

\* Corresponding author: LIU Qiao

E-mail address: crystal-palace@163.com