

文章编号: 1001-3806(2007)03-0306-05

## 激光点火技术综述

赵兴海<sup>1,2</sup>, 高 杨<sup>1\*</sup>, 程永生<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 绵阳 621900; 2 中国工程物理研究院 研究生部, 北京 100088)

**摘要:** 综述了激光点火技术的原理、系统组成及最新进展。讨论了影响激光点火的因素。提出了一种小型化激光多点点火系统构想, 将微机械光开关、微机械分光器等微电子机械系统器件引进到激光点火系统中, 提高了激光点火系统的安全性, 减小了体积。指出现阶段激光点火技术遇到的困难, 未来研究工作应关注点火过程的理论研究及降低点火能量阈值的方法。

**关键词:** 激光技术; 激光点火; 安全保险装置; 微电子机械系统

**中图分类号:** TN249; TQ565 **文献标识码:** A

### A summary of laser ignition technology

ZHAO Xing-hai<sup>1,2</sup>, GAO Yang<sup>1</sup>, CHENG Yong-sheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2 Department of Graduate Student, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The principle of laser ignition, the basic setup and recent progress of laser ignition system were summarized. All the major factors affecting laser ignition were discussed. Then a framework of a minimized multiple-point laser ignition system is presented, and microelectronic machine system (MEMS) device were introduced into laser ignition system, such as MEMS optical switches and MEMS optical splitters, which could enhance the safety and reduce the system size. Finally, all the difficulties and problems involved in laser ignition were offered. A conclusion was made that the future research work should be focused on the theory study of ignition process and the methods to decrease the ignition energy threshold.

**Key words:** laser technique; laser ignition; safety device; microelectronic machine system (MEMS)

## 引 言

把激光作为一种“精密”点火源,起爆或点燃火工品的技术,即为激光点火技术。激光点火是一种安全、可靠、轻便的新型点火技术,与常规的电桥丝雷管点火相比,其优点是:抗干扰能力强,避免了电磁波、静电等电信号的干扰;安全性高,实现了炸药、烟火剂与电源装置有效隔离及钝感点火;技术易于拓展,可实现猛炸炸药的爆燃转爆轰、装置小型化和多点起爆功能。

20世纪 60年代末至 70年代初, BRISH, MENCHELLI 等人率先介绍了激光作为起爆源的使用<sup>[1,2]</sup>。BRISH 等人最先介绍了激光点火的机理<sup>[1]</sup>。我国从 20世纪 70年代开始研究激光点火的原理<sup>[3]</sup>,取得了一定成绩<sup>[4]</sup>。

20世纪 80年代中期,由于激光器体积小型化,高

基金项目:国防预研基金资助项目(51305070402)

作者简介:赵兴海(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光点火、微电子机械系统。

\* 通讯联系人。E-mail: caep-gy@etang.com

收稿日期:2006-02-15;收到修改稿日期:2006-04-12

性能光纤出现,耦合技术的发展等使激光点火技术得到迅速发展。20世纪 90年代,美国将其列为重点研发项目。1992年,美国军标 ML-STD-1901首次要求把激光点火用于直列式点火。国外已经把激光点火应用在航空、航天和军事领域。

激光点火系统需产生、传输高能量密度的激光,受激光器、激光器驱动电源、能量光纤、高能量密度激光耦合与分束等技术的制约,目前尚难以实现系统的小型化。

1962年,美国 HALL, NATHAN 和 HOLORN YAK 研制成功半导体 GaAs 同质结激光二极管。激光二极管代替固体激光器进行激光点火,为激光点火装置小型化提供了美好的前景。

## 1 基本原理

图 1 是一个利用能量光纤传输激光的激光点火系统原理框图。



图 1 利用能量光纤传输激光的激光点火系统原理框图

目前公认的激光点火机理如下: (1)激光热点火。主要通过激光瞬间产生的高能热量,点燃引爆药; (2)激光的化学反应点火。含能材料分子吸收特定频率的激光光子并发生离解,产生的高活性高速离子进一步引起化学链反应,实现点火; (3)激光的冲击起爆作用; (4)激光的电离与等离子体点火。

根据文献 [5],激光点火主要是热点火;光化学作用对激光波长有很强的选择性;电离与等离子体点火要求的激光能量密度远大于每平方厘米吉瓦。因此,激光二极管点火属于热点火机理。

## 2 激光点火方式

激光点火主要有 3 种实现方式:激光直接点爆炸药;激光快速加热与炸药接触的薄膜引爆炸药;通过激光照射金属膜,产生高速飞片撞击炸药将其引爆。YONG 认为,激光驱动飞片点火方式的安全性最高<sup>[6]</sup>。

### 2.1 激光直接点火

激光通过光纤传输直接与引爆药接触,主要是激光辐射引爆药一点,使其急剧升温达到起火温度,引爆炸药。如图 2 所示。

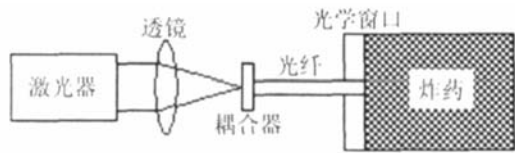


图 2 激光直接点火装置原理框图

对直接点火的研究已经有很多报道。研究的主要参数有:装药密度、颗粒大小、特出表面积、掺杂、激光波长、激光脉冲宽度、激光束斑点大小、密封性、密封材料等。这些参数对点火能量阈值均有影响。直接点火有一个爆燃转爆轰的过程,因此时间延迟较长,可达上百纳秒。

### 2.2 激光快速加热薄膜

如图 3 所示,激光快速加热薄膜,薄膜在高能量密度激光(每平方厘米吉瓦以上)的照射下,产生高速、高温等离子体,与炸药作用产生爆炸。

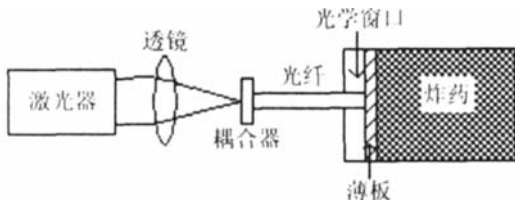


图 3 激光快速加热金属薄膜的点火装置原理框图

有时薄膜并不能全部等离子化,因此炸药和等离子体被剩余的薄膜隔开,此时爆炸主要由薄膜最初爆炸产生的冲击波引起。其时间延迟一般为几十纳秒。

金属薄膜(通常为钢板)较厚(毫米级)时,根据文

献 [7] 和文献 [8],其点火模型为“热起爆”。

薄膜(铝、铜等)较薄(微米级)时的情况较为复杂。1976年,YANG和MENICHELLI选取 26 种厚度  $0.004\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$  的不同薄膜,研究了激光脉冲宽度、薄膜厚度、照射能量密度、炸药形态等因素对应力脉冲的影响。只有近 10% 的激光脉冲能量转化为应力能,其余能量一部分被反射、一部分用于薄膜的烧蚀与电离<sup>[6]</sup>。

激光快速加热与炸药接触的薄膜引爆炸药技术,还有很多问题不能合理解释,需要更加深入的研究。

### 2.3 激光驱动飞片点火

图 4 是激光驱动飞片的点火装置原理框图。高能量密度激光照射薄膜,薄膜部分等离子化产生高速离子体,驱动薄膜碎片(飞片)猛烈撞击炸药起爆。

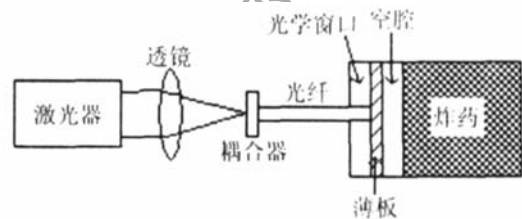


图 4 激光驱动飞片的点火装置原理框图

激光能量密度一般为每平方厘米吉瓦以上,飞片速度可达  $5\text{km/s}$ 。激光能量转化为飞片动能的耦合效率只有 40% 左右。飞片尺寸受薄膜材料种类与厚度、激光能量等因素影响,直径一般为数毫米,厚度为  $1\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ 。

现阶段报道的提高激光能量——飞片动能耦合效率的方法有:在金属薄膜内填充一层厚度小于  $0.25\mu\text{m}$  的介质层,可以使飞片动能与激光能量之比达到 50%;在光纤末端直接淀积飞片薄膜,由于其简单、可靠、高效,已经得到广泛认可。

飞片加速度可达  $10\text{Gm/s}^2$ ,并且在 20ns 内加速到最大速度的 90%。测试飞片速度可采用激光速度干涉仪(VISAR)或光记录的激光速度干涉仪(ORVIS)。VISAR 系统主要有光电倍增管和信号记录仪组成,目前光电倍增管的响应时间和信号记录采样频率还不能完全满足测量飞片速度的要求,容易出现“丢波”现象。ORVIS 虽然不使用光电倍增管和数字示波器,而用高速变相管相机。但是其操作复杂,数据处理困难,花费昂贵。因此其实际操作也存在比较大的困难。

GU 等人<sup>[9]</sup>提出了利用石英压力传感器测量飞片平均速度的方法,简单可靠,一定程度上满足精度要求,其响应时间小于 1ns,精度在 10% 以内。

## 3 激光点火系统

激光点火系统主要由发火控制系统、安保装置、驱

动电源及激光器、光纤、光纤连接器、火工品组成。

### 3.1 发火控制系统

发火控制系统主要由传感器、信息处理系统和发火装置组成。信息处理系统根据传感器探测到的环境信号或目标信息,计算判断是否发火,并将发火控制信号传递给发火装置。

### 3.2 保险与解除保险装置

随着技术的进步,全电子安全系统迅速崛起。全电子安全系统使用钝感炸药激光点火,提高了在生产、运输、储存等方面的固有安全性;系统的响应时间更短等等优点,使其发展前景更加广阔。

美国军标 ML-SLD-1316D(引信安全性设计准则)中详细规定了不需要进行隔爆的炸药,见表 1<sup>[10]</sup>。

表 1 ML-SLD-1316D 须用钝感炸药

炸药	规范
A3混合炸药	ML-C-440
A4混合炸药	ML-C-440
A5混合炸药	ML-E-14970
CH-6混合炸药	ML-C-21723
PBX9407炸药	ML-R-63419
PBXN-5炸药	ML-E-81111
PBXN-6炸药	WS-12604
D IPAM 炸药	WS-4660
HNSI 型或 2 型 A 级炸药	WS-5003
* 特屈儿	ML-T-339
* 特屈儿药柱	ML-P-46464

\* 不再生产,不得用于新研制的产品

表 1 之外的炸药,在因预定发射而解除保险的程序完成之前,应该至少需要一个隔爆件(回转板,滑片,转子等)将爆炸元件与导爆药和传爆药在功能上分开。

激光点火使用的是钝感炸药,可以不使用隔片。可以通过“断电”或“断光”来控制激光能量的产生或传输,实现激光点火的保险与解除保险。例如,可以在激光器驱动电路中加保险环节,即为电子安保装置;也可在激光器与火工品之间加保险环节,即为机电或光电安保装置。

利用 MEMS 工艺制作的微安保机构,可以从根本上改善现在引信的安全和起爆性能:可靠性可提高 5 倍~10 倍;储存寿命可达 20 年以上;体积可降低 1~2 个数量级,易于与激光二极管、集成光路集成,实现激光点火系统的小型化(见图 5)。

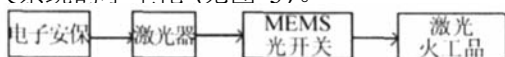


图 5 激光点火系统基本框图

文献 [11] 中报道了一种微型光开关,如图 6 所示,由热执行器、悬臂梁、光纤夹持机构、两根能量光纤

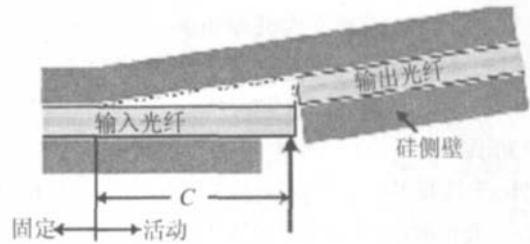


图 6 一种微型光开关

组成。设定导通状态后,热执行器驱动悬臂梁,使附着其上的一根能量光纤与另一根固定的能量光纤逐渐对准,激光能量得以耦合到输出光纤端。

### 3.3 激光器及其驱动电路

激光器是激光点火的关键部件,激光器的选取取决于激光器当前发展水平、炸药起火阈值、体积要求、应用环境要求等。

激光器输出功率从毫瓦到吉瓦不等,大部分激光器的输出功率满足激光点火应用需求,但高功率激光传输、耦合方面的安全性及激光器小型化方面还需研究、创新。

要减小激光点火系统的体积,激光二极管的应用是一种必然。目前的主要问题是激光二极管的输出能量不够。美国 CEO 公司已经生产出了 50W 脉冲激光二极管线阵,工作温度为室温,工作波长为 808nm;连续二极管阵列的输出功率可提高 10 倍。美国 RMC 公司 LDX 系列的激光二极管功率达到 100W,工作波长 808nm;美国 Spectra-Physics 公司生产的光纤耦合单发射极激光二极管功率为 0.4W~1.2W,工作波长 808nm~830nm,其典型斜度效率为 0.7W/A,典型转化效率大于 25%,最大工作电压 2V,工作温度在 25℃~32℃之间,波束散度是  $NA=0.08$ 。对于脉冲激光二极管阵列,其峰值功率为 50W, 120W, 1500W, 4800W 不等,输出峰值功率为 350kW 的脉冲式激光二极管阵列也已出现。可见,激光二极管正在迅猛发展。

由于现在高功率脉冲激光难以耦合到光纤,而且难以在光纤中传播,因此,一般不要求使用调 Q 激光器。

为了保证激光输出的稳定,防止尖峰脉冲的出现,保护激光器,避免激光器意外启动,杜绝可能发生的危险。因此,对激光器驱动电路提出了特出的要求。

如图 7 所示,激光二极管驱动电路包括电流源、保



图 7 激光二极管典型驱动电路

护电路和温度控制电路。激光二极管是一种高功率密

度并且具有高的量子效率的小巧精密器件,电流或者温度的微小变化都会引起激光器的工作状态发生大的变化,比如工作温度提高 30℃,其寿命缩小 10 倍。同时在激光点火中存在的外界电磁脉冲,静电等都会引起激光器的损坏,或者意外点火。要使激光二极管的输出功率稳定,必须使其注入电流稳定,因此,激光器应该与其电流源匹配。现在研究结果一般建议激光二极管输出激光功率大于 1W,驱动电流为安培级。

### 3.4 光纤

在激光点火系统中,光纤是激光能量传输的通道。如果采用激光二极管作为光源,由于其功率不是很高,而点燃钝感炸药又需要较高的点火阈值能量,则提高能量光纤的传输效率及光纤部件的耦合效率意义重大。

国内外激光点火研究使用的光纤多为直径为数百微米的多模石英光纤,见图 8。根据光纤直径对 B/

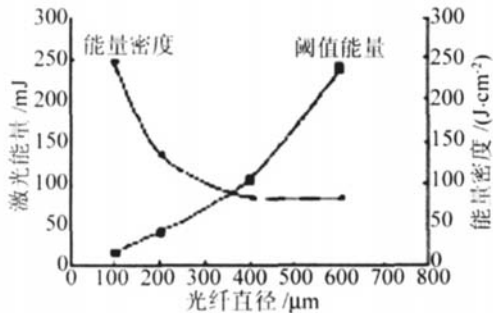


图 8 不同芯径下激光感度曲线

$KNO_3$  点火阈值影响的实验研究,光纤直径越大,激光能量密度越小,激光点火能量阈值越大。激光点火能量阈值的增长与光纤的直径不成线性关系,而是波长、脉冲宽度、炸药特性、光纤直径等综合因素的函数<sup>[12]</sup>。

美国国防部对激光点火用光纤的要求是:峰值功率可达  $10GW/cm^2$ ,使用寿命至少 10 年,抗拉强度  $750.000psi (52.5kg/cm^2)$ ,损耗为  $6dB/km$ ,接头损耗为  $1dB$  个。

渐变折射率光纤可以使光束在相同的传播时间内具有相同的空间周期长度,因此可以对光束自聚焦。如果为抛物线型,光纤具有较小的模式色散,激光输出成高斯分布,能量更加集中。

### 3.5 光纤连接器

光纤-光纤、光纤-激光器、光纤-火工品之间的连接,采用光纤连接器,其连接性能直接影响激光点火系统的能量传输效率。激光多点点火需采用单入多出光纤连接器。

光纤连接器的主要技术指标包括:插入损耗、回波损耗、重复性和互换性。

目前光纤连接器的插入损耗一般在  $0.3dB$  左右,符合现在激光点火技术的应用要求,但高能量密度的

光纤连接成本较高、用于单光纤进入多光纤输出的连接器较少。

激光点火的光纤连接器主要采用 SMA 标准接头。美国休斯飞机公司为适应机载设备、地球物理探测和海底光缆等恶劣环境的需要,开发了单独密封的端接件,它们在 30480m 高空时能承受 260℃ 的高温,耐压 1000V,并且在 4136.8kPa 的压力时仍能保持密封的完整性(见图 9)<sup>[13]</sup>。

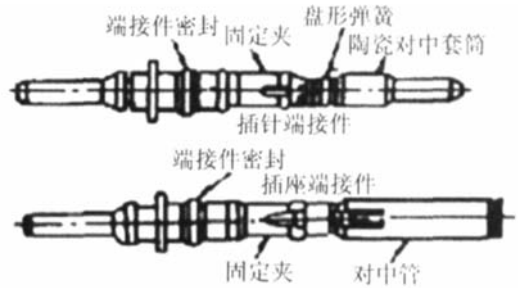


图 9 一种单独密封的光连接器

无源光耦合器是一种更广义概念上的连接器,能使光在特殊结构耦合、再分配。其主要技术指标包括:插入损耗、附加损耗、分光比、方向性、均匀性、偏振相关损耗和隔离度。

无源光耦合器的发展为激光多点点火提供了一种新的技术途径。现在广泛应用的耦合器有熔融拉锥型全光纤耦合器和波导型光耦合器。

### 3.6 激光火工品

目前,激光火工品有激光点火器、激光雷管两类。

激光点火器的对炸药的约束要求强度比较低,通常为光纤脚结构,即光纤端面与药剂直接接触。一般的光纤脚结构如图 10a 所示。激光点火器的研究

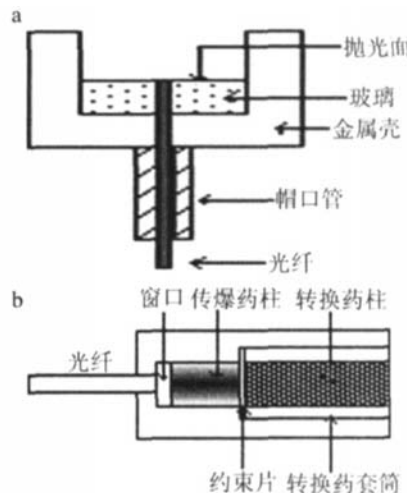


图 10 激光火工品

a-激光点火器结构示意图 b-激光雷管结构示意图

包括:点火器的密封技术,点火器中传爆药、猛炸药的填充状态,激光与点火药的作用过程、机理等。目的是降低点火阈值、减小点火延迟、提高安全性。

激光雷管(见图 10b)可直接点燃猛炸药,因此,要求壳体强度较高,窗口材料一般为蓝宝石和磷玻璃。

美军标 ML-STD-1901 中规定了直列式点火系统的许用点火药,目前唯一许用的只有  $B/KNO_3$ 。其它烟火剂只有证明其敏感度小于  $B/KNO_3$  才能使用在直列式点火中<sup>[14]</sup>。美国 Scot 公司在研制飞机抛放系统用激光点火子系统时,使用  $B/KNO_3$  作为点火器的点火药。根据 ZHANG 等人的研究,只有在 B 和  $KNO_3$  配比一定值的情况下,激光点火延迟最小或激光点火能量阈值最低<sup>[15]</sup>。美国 UPCO 公司和 Quantic 公司已把激光起爆雷管成功运用到武器系统中。

## 4 激光点火系统的发展趋势

### 4.1 小型化

随着大功率半导体激光器阵列的出现,激光器小型化成为可能;随着微电子、微机械、微光学技术的发展,激光点火系统小型化成为可能。一个小型化激光多点点火系统的构想如图 11 所示。图中的 LED 和光

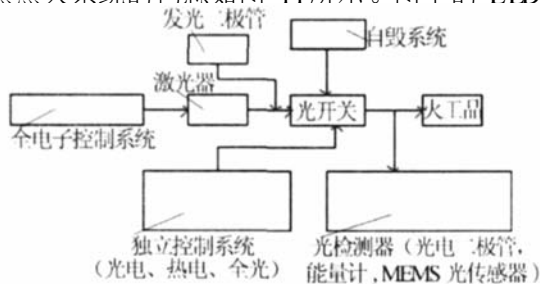


图 11 小型化激光多点点火系统构想框图

检测器共同组成了一种内建自检测装置,光检测器通过探测由 LED 发出的普通光,检测整个光路是否已经接通,并且能够计算出光路的传输效率。自毁系统可以使光开关永久断开。

### 4.2 单脉冲点火

现在的固体激光器,单脉冲能量可以达到焦耳量级,脉冲宽度只有几个纳秒,因此点火响应时间可以大大降低。

### 4.3 多模点火

对激光束分光,可实现多点同步点火;选通光路,可实现寻址点火。

## 5 结束语

由于能量形式独特、抗电磁干扰能力强等固有高安全性的特点,激光点火在军事、航空、航天等领域具有重要的应用价值。

激光点火系统中,激光的功率密度要达到每平方厘米吉瓦量级,导致诸多技术难题,如光纤耦合、光学器件(光纤及光纤连接器、耦合器)损伤等<sup>[16]</sup>。

MEMS 技术特别是微光学器件在激光点火应用大大减小了整个系统的体积,同时 MEMS 光开关与全电子安全系统组成的组合光电混合安保装置大大增强了系统的安全性。但是由于激光功率较高,在各种微器件提高抗损伤性能研究和设计方面还要努力。

激光多点点火技术要求对光束实现分束,可以使用光纤分束器,也可以运用微分光器件,但这方面的技术在国内还不是很成熟。

脉冲激光二极管阵列的峰值功率已高达 350kW,但尚不能满足单脉冲激光点火的要求;激光二极管点火的延迟时间约为几十毫秒,还不能满足高同步性起爆的应用需求。

因此,激光点火技术的实用化,还需要加强基础研究,特别是激光点火过程细节的理论研究比如激光与炸药的相互作用。通过减小炸药的颗粒直径可增大炸药的激光感度,且同一种炸药的激光感度还受药层厚度的影响,药层越厚,越容易吸收激光能量,越容易被激发<sup>[17]</sup>。另外,在不影响激光安全点火的情况下,如何降低整个光路的传输激光功率也是一个重要的研究方向。

## 参考文献

- [1] BRISH A A, GALEEV IA, ZAITSEV B N *et al* The mechanism of initiation of condensed explosives by laser radiation in Russian [J]. *Physics of Ignition and Explosion*, 1969, 5 (4): 475~479.
- [2] MENCHELLIV J, YANG L C. Sensitivity of explosives to laser energy [R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1970. 10~15.
- [3] SUN Ch W, WANG Z N, JIA B R *et al* Experimental study on laser initiated explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1981, 1 (1): 84~90 (in Chinese).
- [4] HU Y, SHEN R Q, YE Y H. Development of laser ignition [J]. *Energetic Materials*, 2000, 8 (3): 141~144 (in Chinese).
- [5] XIANG Sh B, FENG Ch G, WANG L Q *et al* Investigation on mechanisms of laser diode ignition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32 (2): 42~47 (in Chinese).
- [6] YONG L D, NGUYEN T, WASCH J. Laser initiation of explosives, pyrotechnics and propellants: a review [R]. New York: Department of Defence, 1995. 2~38.
- [7] WANG W P, ZHANG K X, LU X F *et al* Study on ignition of metal envelopment explosive by laser beam [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10 (4): 547~551 (in Chinese).
- [8] WANG W P, TAN F L, ZHANG K X *et al* Ignition threshold of metal covered energetic material by laser beam [J]. *Laser Technology*, 2001, 25 (3): 200~202 (in Chinese).
- [9] GU Zh W, SUN Ch W, LU CL *et al* The measurement of the average velocity of flyer driven by mini size laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13 (3): 309~312 (in Chinese).
- [10] ZHANG H Sh. Translation of ML-STD-1316D (safety criteria for fuze design) [J]. *Modern Fuze*, 1994 (1): 61 (in Chinese).
- [11] KEV N R C, LAWRENCE F, DON L D. High-power optical microswitch based on direct fiber actuation [J]. *Sense Actuators & Applied Physics*, 2005, A119 (2): 512~519.

(下转第 313 页)

余偏振度平均值为 2.41 dB, 均方差为 1.57。可以看出单片液晶退偏效果不佳, 双片与 3 片退偏效果相当, 因此, 采用了由两液晶片组合的退偏装置。下面对由两液晶片组合的退偏装置做了进一步的研究测试。

通过调整液晶的姿态, 也就是改变  $\Psi$  的大小, 得到了不同姿态下的退偏结果, 如图 4 所示, 图中的圆点

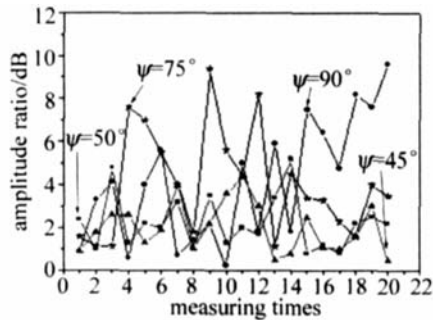


Fig 4 Depolarizing effect with different status of double LC

线表示  $\Psi = 90^\circ$  时的退偏效果, 残余偏振度平均值为 4.09 dB, 均方差为 2.84; 星号线表示  $\Psi = 75^\circ$  时的退偏效果, 残余偏振度平均值为 4.02 dB, 均方差为 2.46; 方形线表示  $\Psi = 50^\circ$  时的退偏效果, 残余偏振度平均值为 2.17 dB, 均方差为 1.26; 三角线表示  $\Psi = 45^\circ$  时的效果, 残余偏振度平均值为 2.11 dB, 均方差为 1.14。可以看出对液晶在施加一定的电压情况下, 当入射的线偏振光与液晶入射表面取向的夹角成  $45^\circ$  时可以获得较好的退偏效果。

### 3 结论

利用液晶在外驱动电压的作用下产生分子扭曲和折射率变化, 从而改变液晶的偏振特性的特点, 提出了一种新型单色退偏振器, 它由两片液晶片组合而成, 这种退偏振器对入射光偏振方向不敏感, 可对偏振方向未知或经常变化的入射单色光进行完全退偏, 同时它

是一种时间无关的退偏器, 能满足 IC 前端系统的要求。通过实验研究证明, 液晶退偏器有一定的退偏效果, 但是退偏还不够彻底, 须进一步对液晶退偏器进行改进完善。

### 参考文献

- [1] WANG Ch Ch, YUAN X D, QING X W *et al* Recent advances of XG II high power solid-state laser facility [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 469~472 (in Chinese).
- [2] LOEBER A D. Depolarization of white light by birefringence crystal II: the Lyot depolarizer [J]. J O S A, 1982, 72(5): 650~656.
- [3] XU F Y. A new type of depolarizer of magnesium fluoride [J]. Sociality of Optical Engineering, 1992, 1752(3): 315~316.
- [4] WETZEL R. A depolarizer for poly and monochromatic light of any desired wavelength [J]. Optic, 1987, 76(4): 189~191.
- [5] CHEN H X, SU I Zh, CHEN Zh P *et al* Optical modulation characteristics of liquid crystal television (LCTV) and its application in optics information processing [J]. Journal of Chinese Lasers, 2000, A27(8): 741~745 (in Chinese).
- [6] LU K, SALEH B E A. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator [J]. Opt Engng, 1990, 29(10): 240~246.
- [7] ZHAO D Zh, ZHANG H Y. Spatial light modulator [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992. 55~60 (in Chinese).
- [8] COY J A, ZALDARRAGA M, GROSZD F *et al* Characterization of a liquid crystal television as a programmable spatial light modulator [J]. Opt Engng, 1996, 35(6): 15~19.
- [9] KIRSCH J C, GREGORY D A, THIEM W *et al* Modulation characteristics of the Epson liquid crystal television [J]. Opt Engng, 1992, 31(5): 963~970.
- [10] LAUDE V, MAZE S, CHAVEL P *et al* Amplitude and phase coding measurement of a liquid crystal television [J]. Opt Commun, 1993, 103: 33~38.
- [11] NETO L G, ROBERGE D, SHENG Y. Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled-mode liquid-crystal televisions [J]. Appl Opt, 1996, 35(8): 4567~4576.
- [12] LIU H K, CHAO T H. Liquid crystal television spatial light modulators [J]. Appl Opt, 1989, 28(7): 4772~4780.

(上接第 310 页)

- [12] CUI W D, ZHU Sh Ch, SHI H M *et al* Effects of optical fiber on laser firing and initiating system [J]. Initiator & Pyrotechnics, 2000(4): 34~37 (in Chinese).
- [13] WANG Zh H. Brief analysis of technical difficulties for military fiber optic cable connectors [J]. Optical Fiber & Electric Cable, 1996(4): 10~11 (in Chinese).
- [14] WAN KM, FU L H, YANG Zh Q *et al* Design of laser ignition system [J]. Initiator & Pyrotechnics, 1996(2): 31~37 (in Chinese).
- [15] ZHANG H Q, YAN N, HUA G *et al* Effect of the mass percentage of

composition to semiconductor laser diode ignition threshold and delay time [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2002(1): 23~25 (in Chinese).

- [16] TRINH H P, EARLY J, OSBORNE R *et al* Technology development of a fiber optic-coupled laser ignition system for multi-combustor rocket engines [R]. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2003. 1~10.
- [17] WEI A Y, GUO X B, ZHANG J T. Experimental study on laser initiation of common explosive initiator composition [J]. Energetic Materials, 2004, 12(4): 243~245 (in Chinese).