

文章编号: 0258-7025(2006)11-1453-04

高能炸药抽运光解碘激光实验技术

谷卓伟, 刘常龄, 赵同虎, 周维军, 张宁, 唐晓松,
陶彦辉, 刘海涛, 桂元珍, 李建明, 吴刚, 韩梅, 张兴卫
(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 成功研制了高能炸药抽运光解碘激光器系统, 实现了爆炸激光器装置的稳定激光输出, 并获得了近百焦耳的激光输出能量。实验中分别测量了 101.325 kPa 下氩气中冲击波阵面的辐射光谱及冲击波阵面传播速度。该爆炸激光器系统利用七氟碘丙烷 C_3F_7I 作为激光工作物质, 高能炸药作为抽运能源, 实验中获得了较好的爆炸激光波形, 激光脉宽(半峰全宽(FWHM))约 $34 \mu s$, 最小光束发散角小于 20 mrad 。详细介绍了爆炸激光器的工作原理, 针对具体的实验装置及实验技术路线进行了分析和描述。分别在不同实验条件下开展了相关爆炸激光实验, 对实验结果进行了分析, 并对影响爆炸激光输出的因素进行了分析和讨论, 为进一步研制更大能量的爆炸激光装置打下了基础。

关键词 激光技术; 光解碘激光器; 高能炸药

中图分类号 TN 248.2⁺1 **文献标识码** A

Experimental Technology of High Explosive Pumped Photolytic Iodine Laser

GU Zhuo-wei, LIU Chang-ling, ZHAO Tong-hu, ZHOU Wei-jun,
ZHANG Ning, TANG Xiao-song, TAO Yan-hui, LIU Hai-tao,

GUI Yuan-zhen, LI Jian-ming, WU Gang, HAN Mei, ZHANG Xing-wei

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

Abstract A set of high explosive pumped photolytic iodine laser system was built and a steady laser output of approximate 100 J was obtained in experiments. The radiation spectra of shock wave produced by high explosive in argon of about 101.325 kPa were measured, meantime the velocities of shock wave were also measured by photography. In the experiments, the alkyl iodine C_3F_7I was used as laser working substance and a good waveform of laser was obtained. The full width at half maximum (FWHM) of laser pulse is about $34 \mu s$ and minimum angle of radiation is less than 20 mrad . The principle and technique routines were introduced in the paper. The experiments under different conditions were carried out and the experimental results were listed and analyzed. The factors that influence the laser output had been discussed. This technique progress made it possible for making a larger energy explosive-driven iodine photodissociation laser.

Key words laser technique; photolytic iodine laser; high explosive

1 引言

高能炸药在惰性气体中产生爆轰时, 冲击波阵面伴随强烈的光辐射, 这一强光辐射可以被用作激光工作介质的抽运光源, 这就是爆炸光抽运激光器的基本工作原理。与一般的电激励激光器相比, 爆炸抽运激光器具有两个鲜明的特点: 一是能量高。

惰性气体中冲击波阵面对应的黑体辐射温度约为 $25 \sim 35 \text{ kK}$, 而脉冲氙灯一般仅为 10 kK 左右。而且炸药的爆轰过程更短, 导致光辐射功率更高, 因此利用炸药作为抽运能源有可能得到更大能量、更高功率的激光输出。二是体积小、结构简单。由于爆炸光抽运激光器的能源仅为几块炸药, 体积很小, 没有复杂的能源供给系统, 完全可以实现小型化。

收稿日期: 2006-05-12; 收到修改稿日期: 2006-06-30

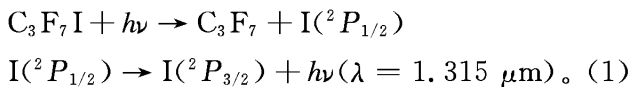
作者简介: 谷卓伟(1969—), 男, 中国工程物理研究院副研究员, 博士, 主要从事强激光与物质相互作用的研究。E-mail: guzhw@yahoo.com.cn

爆炸激光技术在激光推进、材料的激光硬化等多个领域具有广泛的应用前景^[1~3]。国外在上世纪60年代就开始了爆炸激光器的研究,美国和俄罗斯在爆炸激光器技术研究领域已经发展到相当高的水平。美国洛斯阿拉莫斯实验室^[4]在1995年就研制了一套千焦耳量级的爆炸激光器装置;俄罗斯在这一领域的研究工作一直十分活跃,目前建有数套大型爆炸激光器装置,其最大输出能量可达到 10^5 J^[5~8]。

近年来,中国工程物理研究院流体物理研究所开始系统的爆炸激光器的研究工作,先后研制成功电光激励和爆炸激励的光解碘激光系统,探索并掌握了相关的核心实验技术,实现了稳定的激光输出。

2 实验原理及基础

在对国外相关研究进行了全面深入的调研分析后,决定选用具有较高增益的多氟烷基碘化物(C_3F_7I)作为工作介质,该类激光器的工作原理可简单描述为



多氟烷基碘化物吸收紫外辐射(240~320 nm)并发生分解,得到亚稳态的激发态碘原子,激发态碘原子发生能级跃迁,变成基态碘原子并放出波长为1.315 μm 的红外辐射。

爆炸激励方式的物理基础是利用爆炸冲击作用下惰性气体产生的强烈光辐射。由于惰性气体是单原子气体,它们的热运动仅有平动,没有转动和振动,也不会产生分解,因而比热容小,容易获得比多原子分子气体更高的温度。在高温下惰性气体的原子电离将产生强烈的光辐射。研究表明,这一辐射过程近似为黑体辐射过程,其光谱分布满足普朗克定律

$$M_\lambda(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, (2)$$

式中 $M_\lambda(T)$ 为光谱辐射出度, λ 为波长, h 为普朗克常数, c 为光速, T 为温度。

总辐射通量符合斯忒藩-玻耳兹曼定律

$$M(T) = \sigma T^4, (3)$$

式中 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数。黑体辐射的峰值波长与温度的关系符合维恩位移定律

$$\lambda_m T = 2898 (\mu\text{m} \cdot \text{K}), (4)$$

式中 λ_m 为光谱辐射的峰值波长。从(4)式可知,辐射峰值波长 λ_m 与温度成反比,温度越高, λ_m 越向紫外

方向移动。由于爆炸光谱的温度远高于普通的脉冲氙灯,因此,其光谱中含有更多的紫外成分,这对于利用紫外辐射作为抽运源的光解碘激光器是极为有利的。

高压下氙气的冲击雨贡纽曲线

$$D = 0.811 + 1.022u, (5)$$

式中 D 为冲击波速度(km/s), u 为粒子速度(km/s)。

平面冲击波满足的动量和质量守恒方程

$$p = \rho_0 Du, (6)$$

$$\rho(D - u) = \rho_0 D, (7)$$

气体状态方程

$$p = (1 + \alpha)\rho RT, (8)$$

式中 ρ_0, ρ 分别为冲击波阵面前后气体的密度(g/cm^3), p 为冲击波阵面的压力(0.1 MPa), α 为气体的电离度, R 为气体常数。

对于氙气情况,假定冲击波阵面后的自由电子、氙离子和原子处于热平衡状态,萨哈(Saha)方程可以简化为

$$\alpha = \left[2.540 \times 10^5 \frac{p}{T^{5/2}} \exp\left(\frac{1.821 \times 10^5}{T}\right) + 1 \right]^{-1/2}, (9)$$

从实验测出气体中的冲击波速度或粒子速度后,就可以由上面的方程估算气体中的压力、温度和电离度等物理和力学参数。

3 实验研究

爆炸激光器的特点在于利用高能炸药作为激光抽运光源。因此,惰性气体中的冲击波阵面发光光谱及有效光抽运时间对于爆炸激光器装置研制是极为重要的,在搭建爆炸激光装置之前,首先开展了相关的分解实验。

3.1 氙气中爆炸冲击波紫外光谱的实验测量

实验中利用多通道光学高温计测量了氙气环境中炸药冲击波阵面的紫外辐射脉冲波形。图1是Jo-9159炸药在氙气中产生的紫外辐射脉冲信号(波长为250 nm)。其中,纵坐标为光信号幅度,横坐标为时间。由于在0~5 μs 时间内无发光信号,故图中略去。

3.2 氙气中炸药冲击波速度的测量

爆炸光辐射的有效抽运时间将决定爆炸激光器输出的脉冲宽度。在实际装置中,输出激光脉宽 τ 可简单估算为

$$\tau = l/v, (10)$$

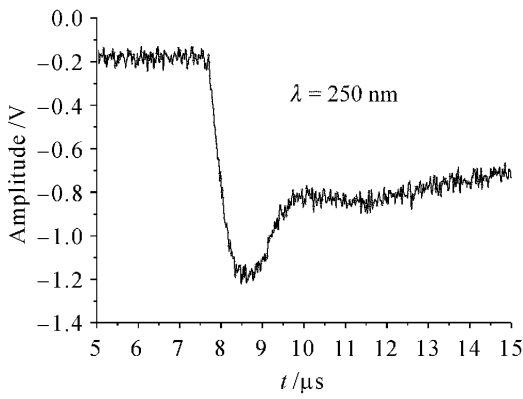


图 1 Jo-9159 炸药在氩气中产生的紫外辐射
Fig. 1 UV radiation of shock wave produced by Jo-9159 explosive in argon

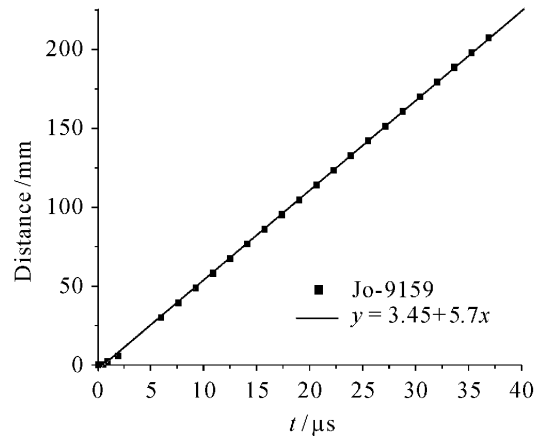


图 3 冲击波阵面的时间与位移的关系
Fig. 3 Relationship on displacement of shock wave front versus time

这里 l 为从炸药端面至激光工作室的距离, v 为惰性气体中冲击波阵面的速度。

由此可见, 惰性气体中冲击波阵面的速度是一个关键数据。由于国外文献上相关数据差异较大, 从 5~6 km/s 至 9~10 km/s^[9], 而且炸药种类不同, 因此为了给原型装置设计提供依据, 利用高速摄影技术开展了氩气中冲击波速度的测量。

实验中 101.325 kPa 的氩气环境中 Jo-9159 炸药冲击波阵面的传播见图 2, 测量结果见图 3。实验表明, 氩气中的冲击波速度约为 5.7 km/s。对于加平面波透镜的炸药结构, 冲击波速度会更高一些, 约为 8 km/s。



图 2 利用高速转镜相机记录的氩气中冲击波的传播情况
Fig. 2 Propagation of shock wave in argon recorded by photography

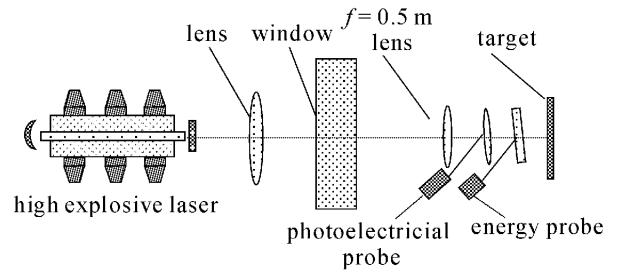


图 4 爆炸激光的传输及测试实验布局
Fig. 4 Experimental setup of high explosive pumped laser

240 mm, 选用 6 个炸药组件对称排列。工作介质充于石英管中, 其尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 并于 2005 年 11~12 月开展了两轮外场 6 发实验。

图 4 是爆炸激光装置实验及测试光路布局图, 爆炸装置距离测试位置约为 10 m, 利用一个焦距为 5 m 的透镜聚焦传输, 在室内再用焦距 0.5 m 的短焦透镜二次聚焦。分别用能量计、光电二极管记录能量及波形, 用焦斑纸记录光斑的形状。

改进后的爆炸激光原型装置参数及测量结果见表 1。测量的部分激光波形分别见图 5。在表 1 中, 实验 001~004 共 4 发实验均采用氩气抽运方式, 005~006 两发实验采用氙气抽运方式。

表 1 改进后的爆炸激光原型装置参数及测量结果

Table 1 Parameters and measurement results of optimized explosive pumped laser devices

Experiments	$\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$ pressure / $\times 133.3 \text{ Pa}$	Mixed gas pressure / $\times 133.3 \text{ Pa}$	Distance from explosive to laser chamber /mm	FWHM of laser / μs	Laser output (at 10 m from the device) /J
001	30	601 (Xe)	125	/	No output
002	30	0	125	8.4	23.7
003	30	0	197.5	25.2	29.6
004	30	0	197.5	30.4	35.8
005	30	530 (Ar)	197.5	34.0	43.4
006	30	624 (Ar)	197.5	27.8	31.4

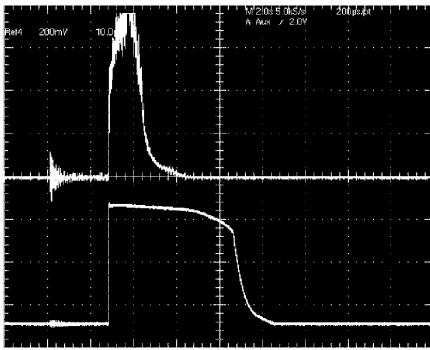


图 5 示波器记录的激光波形

(上面波形为 002 号实验, 下面波形为 004 号实验)

Fig. 5 Waveforms of laser pulse recorded by oscillograph
(upside: experiment No. 002, downside: experiment No. 004)

由 002 号和 003 号的实验结果可以看出, 同样条件下, 将炸药至石英管壁的最短距离由 125 mm 增加至 197.5 mm 时, 脉宽增加了 3 倍多, 能量也有较大的增加。从得到的激光波形看, 目前这一距离仍有增加的空间。

对激光光斑的实验测量结果表明, 该爆炸激光装置的光束发散角约为 18~24 mrad。

在 005 号实验中, 石英管内注入 4×10^3 Pa 的 C_3F_7I 和 7.07×10^4 Pa 的氩气。实验结果表明, 混合气体的出光效率高于单一工作介质。同时这也是这轮实验中出光能量最高的一发。根据在实验室光解碘激光器上做的传输实验看, 将光解碘激光传输 10 m 距离的空间损耗约为 30%~50%, 因此, 在爆炸激光器出口处的实际激光能量接近 100 J。

006 号实验装置与上面的其他实验装置有所不同。它是采用二维抽运的方式, 即在装置的侧面和上面各沿平行石英管方向放置 3 个炸药组件, 而不是前面实验所采用的对碰抽运方式。这样做的目的是试图提高炸药抽运的均匀性, 但从实验结果看, 这种加载方式并没有优势。

4 结 论

经过近两年的工作, 目前已基本掌握了爆炸激光的主要特点和关键技术, 并实现了近百焦耳级激光的稳定输出, 为今后研制更大能量的爆炸激光装置打下了基础。由于爆炸激光系统较为复杂, 影响因素很多, 而且爆炸抽运与实验室的电光抽运方式差别很大, 因此对这项技术的完善需要进一步的相关实验与理论相结合。

参 考 文 献

- 1 Zheng Yijun, Tan Rongqing, Zhang Kuohai *et al.*. Experiment of laser-propulsion free-flight [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 171~174
郑义军, 谭荣清, 张阔海等. 激光推进自由飞行实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 171~174
- 2 Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao *et al.*. Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1352~1356
吴边, 王声波, 郭大浩等. 强激光冲击铝合金改性处理研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1352~1356
- 3 Chen Shisheng, G. Brederlow, E. Fill *et al.*. A high power atomic iodine amplifier with an aperture of 320 mm [J]. *Chinese J. Lasers*, 1986, **14**(9): 513~517
陈时胜, G. Brederlow, E. Fill 等. 直径为 320 mm 的大孔径高功率碘原子激光放大器[J]. *中国激光*, 1986, **14**(9): 513~517
- 4 C. R. Jones. Review of explosive-driven iodine lasers in the U. S. [C]. *SPIE*, 1995, **2502**: 344~350
- 5 V. P. Arzhanov, B. L. Borovich, V. S. Zuev *et al.*. Iodine laser pumped by light from a shock front created by detonating an explosive [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1992, **22**(2): 118~120
- 6 N. G. Basov, B. A. Vyskubenko, E. M. Zemskov *et al.*. High-energy explosively pumped photodissociation lasers [C]. *SPIE*, 1998, **3574**: 398~402
- 7 G. A. Kirillov, V. A. Eroshenko, G. G. Kochemasov *et al.*. Powerful short-pulse lasers pumped by the light of a shock wave front [C]. *SPIE*, 2000, **3889**: 447~454
- 8 N. G. Basov, E. M. Zemskov, V. M. Kazansky *et al.*. Explosively pumped photodissociation lasers with phase conjugation [C]. *SPIE*, 1998, **3574**: 403~406
- 9 C. R. Jones, W. C. Davis. Optical properties of explosive-driven shockwaves in noble gases [C]. Los Alamos Conference on Optics, 1982. LA-UR-83-1928