

文章编号: 1001-2486 (2000) 03-0076-04

## 一种新型近红外脉冲强光辐射源的探索\*

张晓萍, 周津娟, 李享生, 张建德, 李传胪

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 探索了一种产生近红外脉冲强光辐射的新途径。用冲击大电流使铜丝爆炸产生圆柱式内爆冲击波, 冲击压缩惰性气体, 产生等离子体辐射近红外脉冲强光。实验表明, 用这种方法已经得到了总功率为 MW 量级, 脉宽为 10 $\mu$ s 量级的近红外脉冲强光辐射。

**关键词:** 近红外脉冲强光辐射; 电爆丝; 圆柱内爆冲击波; 等离子体辐射

**中图分类号:** O53      **文献标识码:** A

## Study on a New Type of Strong Pulsed IR Source

ZHANG Xiao-ping, ZHOU Jin-juan, LI Xiang-sheng, ZHANG Jian-de, LI Chuan-lu

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A new approach producing strong pulsed IR is studied theoretically and experimentally. Cylindrically imploding shock waves have been generated by use of strong impulse current making thin copper wires explode. Cylindrically imploding shock waves can make Argon ionized produce plasma and excite strong pulsed IR. The study indicates that strong pulsed IR of MW power and 10 $\mu$ s FWHM can be gained by using this approach.

**Key words:** strong pulsed IR; electrically exploding wires; cylindrically imploding shock waves; plasma radiation

目前, 红外对抗技术已成为军事开发的热点。最新统计资料表明, 战场上损失的飞机有 90% 以上是被红外制导导弹击中的。红外制导导弹的已有成绩及不断的技术更新, 必然促进红外对抗技术的发展。红外脉冲强光辐射技术是定向红外对抗 (DIRCM) 技术的一个分支。它可用来破坏敌方精确制导武器或 C<sup>3</sup>I 系统的红外传感器<sup>[2]</sup>, 因此该项技术研究具有重要意义。

红外脉冲强光辐射的产生有多种方法, 如炸药爆燃产生红外光, 炸药爆炸冲击压缩气体激励红外辐射。本文中用电激励的办法产生红外辐射, 这是一种全新的方法, 目前国内外还没有相关的研究报道。采用的电激励方法具有实验装置小, 辐射功率较高的优点, 并且可以很方便地在冲击大电流实验室内进行研究。

## 1 电激励近红外脉冲强光辐射 (EDSPIR) 的基本工作原理

用电激励的方法产生近红外脉冲强光辐射的关键技术是: 冲击大电流的产生; 电爆丝爆炸产生圆柱式内爆冲击波; 冲击波冲击激励惰性气体形成等离子体红外辐射。

其基本过程如图 1 所示, 通过变压器组对高压电容器 C 储能后, 闭合回路开关 S<sub>3</sub>, 电容器组通过回路的固有电感 L 和爆炸丝 W<sub>s</sub> 放电, 产生冲击大电流 i, 使爆炸丝焦耳加热, 在几微秒内完成固  $\rightarrow$  液  $\rightarrow$  气  $\rightarrow$  等离子体状态的相转变, 完成爆炸。在此爆炸过程中伴有冲击波及发光等物理现象。由于多根爆炸丝的特殊排列, 爆炸冲击波呈圆柱式内爆结构。这种内爆冲击波在圆柱轴线附近极强, 可产生极高的

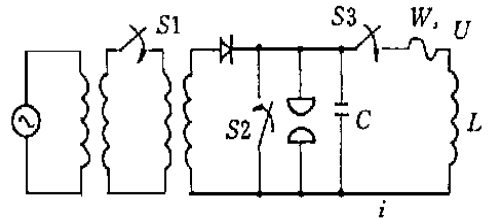


图 1 电爆丝工作电路简图

Fig. 1 Schematic of exploding wires circuit

\* 收稿日期: 1999-12-9  
基金项目: 国家部委预研项目资助  
作者简介: 张晓萍 (1975), 女, 硕士生。

高温<sup>[1]</sup>。装置中所充高压惰性气体 Ar 第一电离势较低，易于电离，在高温下部分电离，形成等离子体产生辐射。

### 1.1 电爆丝的选择

电爆丝在电路准衰振荡的 1/4 周期附近爆炸时，产生的冲击波最强，从而等离子体辐射最强。这时选择电爆丝的总横截面积<sup>[3]</sup>为

$$S \approx 1.5 \times 10^{-3} (CU_0^2/Z_0)^{1/2} (\text{mm}^2) \quad (1)$$

式中： $Z_0 = (L_0/C)^{1/2}$  为电路特性阻抗， $C$  为电容器的电容量， $U_0$  为电容器上充电电压幅值， $L_0$  为负载电感。

当电爆丝的总横截面积确定，单根电爆丝截面选定后，可得到电爆丝的根数。多根电爆丝紧贴绝缘圆柱筒内壁，两端焊在电极上，这种结构能产生圆柱内爆冲击波。

### 1.2 装置中 Ar 气电离机理

爆炸丝爆炸时会产生 X 光和冲击波等现象，其中冲击波电离和光致电离是使 Ar 气电离的主要因素。

内爆冲击波造成的气体整体运动具有很大能量，大量粒子整体运动的速度分量转化耗散成粒子的无规则运动速度，使气体温度迅速升高。这种耗散机制是通过整体运动粒子与无规则运动粒子碰撞实现的，所以冲击波电离气体本质上说是一种热电离。只要冲击波足够强，这种耗散性的碰撞将使 Ar 气电离成等离子体。Ar 气的电离度  $\alpha$  可用萨哈公式<sup>[4]</sup>来表示

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} p = \frac{2Z_i}{Z} \frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h^3} (kT)^{5/2} \exp(-\frac{W_i}{kT}) \quad (2)$$

式中  $p$  为压力，单位为大气压， $T$  为温度，单位为 K， $m_e$  为电子的静止质量， $W_i$  为气体的第一电离能， $h$ 、 $k$  分别为普朗克常数、玻耳兹曼常数， $Z_i$ 、 $Z$  分别为原子和一次离子的内部配分函数。对 Ar 气来说 Ar 原子和 Ar 离子的内部配分函数<sup>[4]</sup>分别为

$$Z = 1 + 60 \exp(-\frac{162500}{T}) \quad (3)$$

$$Z_i = 4 + 2 \exp(-\frac{2062}{T}) + 2 \exp(-\frac{156560}{T}) + 8 \exp(-\frac{190550}{T}) + \dots$$

例如  $p = 1 \text{atm}$ ，Ar 气在  $T = 7105 \text{K}$  时，10% 的粒子电离成  $\text{Ar}^+$ 。

### 1.3 等离子体辐射机理

经典电动力学已经证明，电磁辐射的最根本原因在于带电粒子有加速度（或减速度）。Ar 气等离子体辐射主要是韧致辐射和黑体辐射。

韧致辐射是由库仑碰撞引起的辐射。是连续谱，其光谱范围在红外。下面给出单位体积等离子体韧致辐射的总功率（量子力学公式）<sup>[4]</sup>

$$P_A = g \sqrt{\frac{8}{3\pi}} \frac{8\pi Z^2 q^2 n_e n_i}{3m_e c^3 h} \sqrt{\frac{kT_e}{m_e}} \quad (4)$$

式中  $g \approx 1$  为平均岗特因子。

由韧致辐射等机制产生的电磁辐射，在到达等离子体边界之前被等离子体多次吸收或再发射，这时辐射过程与碰撞过程处于同等重要地位。当这两种过程达到动态平衡时，其辐射与某一温度表征的固体黑体辐射相类似。黑体表面的总辐射流仅与黑体温度有关，用斯蒂芬-玻耳兹曼定律表示：

$$I = \xi T^4$$

式中  $\xi = 5.7 \times 10^{-8} \text{JK}^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。黑体等离子体辐射光谱能量密度  $I_\omega(T)$ <sup>[4]</sup>为：

$$I_\omega(T) = \frac{E\omega^3}{8\pi^3 c^3} [\exp(\frac{E\omega}{kT}) - 1]^{-1} \quad (6)$$

实际从等离子体辐射出来的是灰体（准黑体）辐射和韧致辐射等的叠加，情况要复杂得多。

## 2 实验装置设计

经过理论分析,设计加工了如图2所示实验装置,实验中,装置首先要抽真空,而后充以某一气压的Ar气。装置接入图1所示电路中产生冲击大电流,通过两个铜法兰盘和铜电极作用于有机玻璃管内壁的电爆丝,使其快速爆炸,产生内爆冲击波并电离Ar气,电离气体发出的强红外光透过透射窗辐射出去。距透射窗4m正对透射窗置放有1~3 $\mu\text{m}$ 近红外波段HgCdTe光电探测器,再通过同轴电缆经偏置电路接入示波器上。

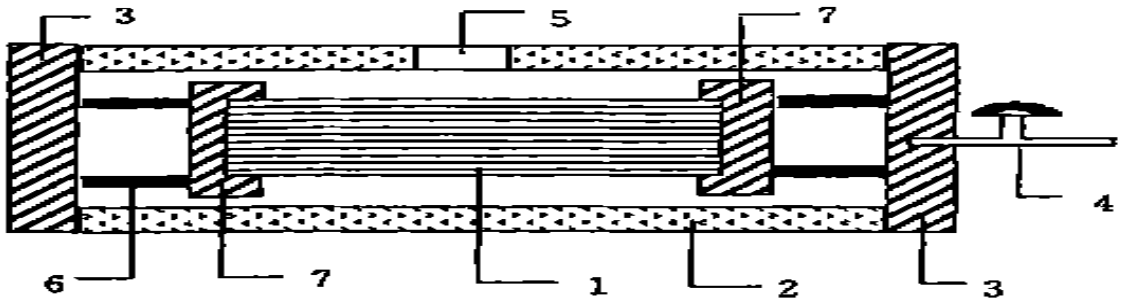


图2 电激励近红外脉冲强光辐射实验装置图

- 1- 有机玻璃管 (内壁均匀排列多根电爆丝)    2- 尼龙筒    3- 铜法兰盘  
4- 抽气充气阀    5- 透射窗    6- 铜支撑杆    7- 铜电极

Fig.2 Device of electrically inspired strong pulsed IR experiment

1-organic glass tube (several electrically exploding wires arranging evenly in the inner wall) 2-nylon barrel  
3-copper flange set 4-valve of air pump and puff 5-transmission window 6-copper knighthead 7-copper electrode

## 3 实验结果及分析

实验测量了放电回路电感负载上的电压、回路放电电流、从透射窗透射出来的1~3 $\mu\text{m}$ 近红外脉冲强光辐射的辐射峰值功率波形,如图3(a)、(b)、(c)所示。经过对测量中所用电阻分压器、电流线圈以及装置透射窗透射系数的标定,我们已把示波器上显示的电压信号换算成相应的电感负载电压、回路放电电流、源点1~3 $\mu\text{m}$ 近红外脉冲强光辐射峰值功率的量纲标识在图3上。实验中我们还就装置中所充Ar气气压对近红外辐射能的影响作了详尽的研究,实验结果如图4和表1所示。经过对所测结果进行分析,我们得出以下几点。

表1 Ar气气压对近红外辐射的影响

Tab.1 The influence of argon pressure on infrared radiation

Number of exploding wires	Capacitance ( $\mu\text{F}$ )	Inductance ( $\mu\text{H}$ )	Charge voltage (kV)	Pressure of Argon (atm)	Radiate energy (J)
22	12	2	30	0.5	60 4682
22	12	2	30	1	72 1828
22	12	2	30	1.5	119. 329
22	12	2	30	3.5	77. 9658
22	12	2	30	4.5	72 0156

(1) 实验中给电容器组加30kV的高压,在放电回路中产生了30kA以上的冲击的电流,如图3(b)所示。在微秒内电爆丝过热爆断,之后红外探测器探测到一个强辐射脉冲,如图3(c)所示,其峰值功率在MW量级,脉宽在10 $\mu\text{s}$ 量级,总辐射能量达到了100J量级,总能量转换效率达到1%以上。

(2) 当爆炸丝和实验电路参数选定后,爆筒内所充Ar气的压强对近红外辐射有影响。如果其他

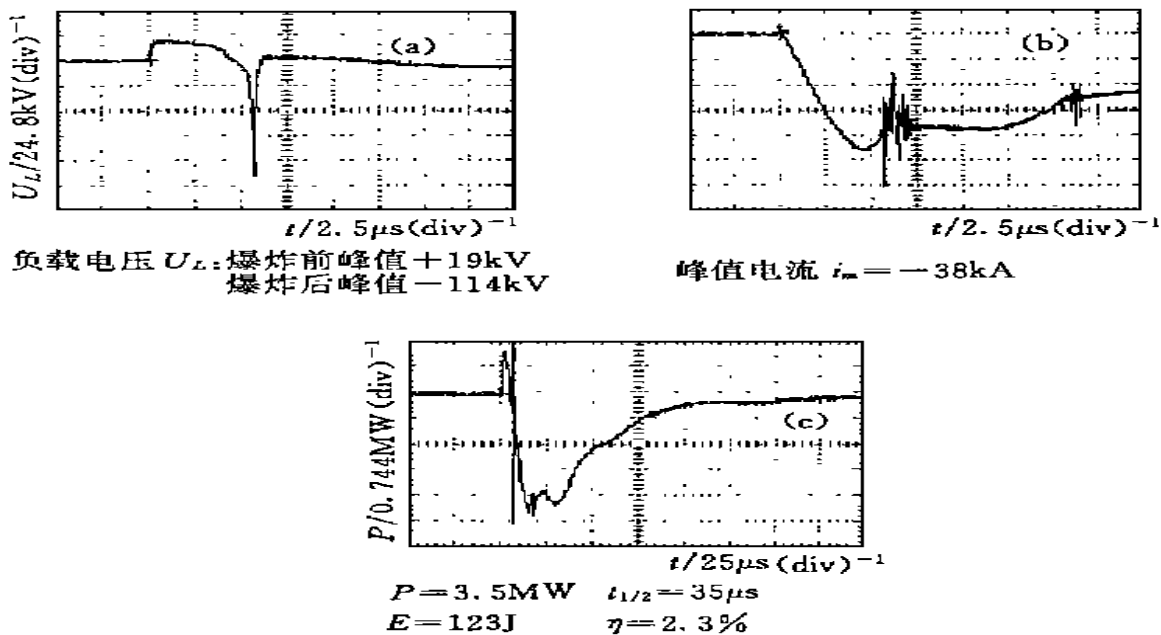


图3 一次典型电激励近红外脉冲强光辐射实验波形图

(a) 负载上的放电电压 (b) 回路的放电电流 (c) 红外探测器抓到的波形

Fig. 3 Typical waveform of electrically driven strong pulsed infrared radiation experiment

(a) discharge voltage of load (b) discharge current of circuit (c) waveform from infrared detector

参数选定，则气压有一最佳值，使辐射最强。如表1和图4所示，当Ar气气压为1.5atm时，1~3μm波段辐射总能量最强。这是因为气压低时，等离子体密度低，近红外辐射弱；而气压高时，等离子体密度高，对近红外辐射的衰减大，辐射出的近红外光也弱。

(3) 利用电爆炸丝爆炸激励Ar气产生等离子体，确实是一种产生近红外脉冲强光辐射的新途径。探索用电爆炸箔替代电爆炸丝，以及用其他气体替代Ar气，都是很有意义的。

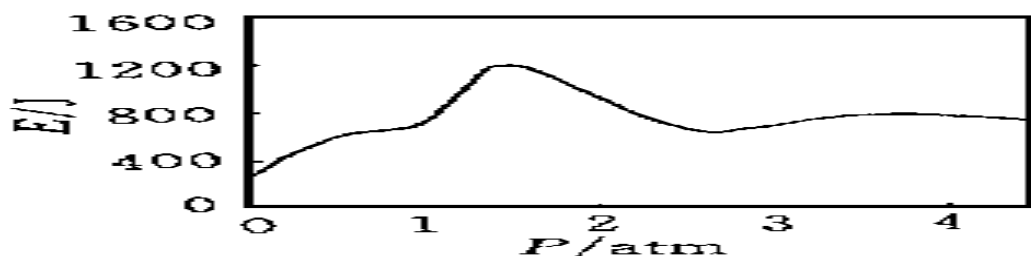


图4 Ar气气压对近红外脉冲强光辐射能影响的实验曲线图

Fig. 4 The experiment graph of argon pressure vs. infrared radiation energy

参考文献:

[1] Demen R.S. Electrical Generation of Imploding Shock Waves [J]. Exploding Wires, 1962, 2: 45.  
 [2] 付伟. 定向红外对抗技术的新发展 [J]. 红外技术, 1997, 1: 6-8.  
 [3] 王莹. 电爆炸导体及其应用 [J]. 爆炸与冲击, 1986, 6 (2): 184-192.  
 [4] 金佑民, 樊友三. 低温等离子体物理基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1983.