

文章编号:1006-9941(2019)03-0242-07

## 用超级电容器驱动激光起爆 BNCP 的技术研究

王浩宇<sup>1,2,3</sup>,褚恩义<sup>3</sup>,洪津<sup>1,2</sup>,贺爱锋<sup>3</sup>,曹椿强<sup>3</sup>,井波<sup>3</sup>,马玥<sup>3</sup>,胡亚东<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室,安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学,安徽 合肥 230026; 3. 陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室,陕西 西安 710061)

**摘要:** 为了研究基于超级电容驱动激光起爆的作用规律,建立了基于超级电容驱动的激光输出时域模型,设计了超级电容驱动激光起爆装置,获得了在不同容值和放电电压下激光的输出波形,测试数据与数值仿真数据基本吻合。利用超级电容驱动激光起爆装置研究了以高氯酸·[四氨·双(5-硝基四唑)]合钴(III)(BNCP)为始发药、JH-14为输出装药的激光起爆器起爆规律。结果表明,基于超级电容驱动的激光起爆时间随着放电电压的升高而显著降低,降幅最大达71%,随电容容值的增大略有降低,降幅约32.1%,起爆能量均在0.037~0.057 mJ,起爆能量利用率随放电电压升高、电容值增大而降低,在放电电压13.5 V,电容120 mF的测试条件下,起爆作用时间最快为14.8 μs,实现了超级电容驱动激光快速起爆。

**关键词:** 激光二极管;超级电容;激光起爆;作用时间;高氯酸·[四氨·双(5-硝基四唑)]合钴(III)(BNCP)

**中图分类号:** TQ565; TJ45

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018034

### 1 引言

激光火工品具有电磁本质安全,易扩展等独特优势,在钝感火工品中具有一定的应用潜力<sup>[1]</sup>,近年来已逐步应用于航空、航天和军事领域<sup>[2]</sup>。激光起爆技术<sup>[3]</sup>根据作用方式可分为:激光驱动飞片起爆和激光直接起爆。激光驱动飞片起爆使用固体调Q激光器,体积较大、光纤耦合困难,目前还处于试验室研究阶段。激光直接起爆技术中固体激光器和半导体激光二极管都可作为起爆激励光源,固体激光器常被用于猛炸药及较钝感的起爆药剂性能研究<sup>[4]</sup>,大功率半导体激光器具有体积小,易集成,光纤直接输出,使用灵活等优势,但其输出激光功率密度约为 $10^3\sim 10^4\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,通常用于起爆激光敏感起爆药剂,目前常用的激光敏感起爆药剂为高氯酸·[四氨·双(5-硝基四唑)]合钴(III)

(BNCP),具有激光感度好、燃烧转爆轰(DDT)时间短、输出威力大等特点。半导体激光驱动方式通常是直流电源模块恒压或恒流模块直接驱动激光二极管,国内外研究者利用恒压和恒流两种驱动方式对BNCP起爆开展研究<sup>[5-6]</sup>。E.S. Hafenrichter等<sup>[7]</sup>利用激光脉冲恒压电源控制激光二极管输出脉宽5 μs,上升时间为2 μs功率为18 W的激光,在不同光斑直径和压药密度下对BNCP进行起爆试验,起爆延时最短仅4~5 μs,激光起爆能量在33~58 μJ。陈利魁等<sup>[8]</sup>利用恒压脉冲半导体激光器研究了掺杂对BNCP半导体激光起爆感度的影响,选择适当的掺杂物,可大幅降低发火能量,起爆延时最短为2.3 ms,发火能量为0.24 mJ。曹军胜等<sup>[9]</sup>采用压控恒流驱动方式起爆BNCP,激光起爆阈值功率随激光脉宽增加而降低。任鹏等<sup>[10]</sup>采用恒压驱动方式起爆BNCP,BNCP作用时间与激光输出能量成反比。恒压与恒流两种激光驱动方式,其本质都是直流电能直接供能,对主机电源瞬态能量供给要求较高,要提高激光二极管输出功率,就必须为大功率激光二极管提供较大的驱动电流,电源模块的体积也会随着电流的增加而成倍数增加,难以满足武器弹药对激光火工品快速作用的应用需求。

超级电容是一种近年来飞速发展的新型储能器

收稿日期:2018-01-21;修回日期:2018-07-23

网络出版日期:2019-01-03

基金项目:装备发展部十三五预研基金(6140619030116BQ43001),装备发展部十三五预研项目(41419080202-1)

作者简介:王浩宇(1989-),男,博士研究生,工程师,主要从事激光火工系统技术研究。e-mail:444377655@qq.com

通信联系人:褚恩义(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事先进火工技术研究。e-mail:enyichu@126.com

引用本文:王浩宇,褚恩义,洪津,等.用超级电容器驱动激光起爆BNCP的技术研究[J].含能材料,2019,27(3):242-248.

WANG Hao-yu, CHU En-yi, HONG Jin, et al. Laser Initiation BNCP Driven by Super Capacitor[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(3):242-248.

件,其工作特性介于传统电容与蓄电池之间,具有明显的性能优势<sup>[11]</sup>。超级电容较传统电容器储存能量大1~2个数量级以上,且等效电阻更低,较锂电池则具有更强的瞬时功率输出,此外还具有功率密度高、工作温度宽,循环次数多等优势,非常适合激光火工品瞬时(毫秒量级)低压( $>15\text{ V}$ )大驱动电流(5~15 A)的应用。

本研究根据超级电容高储能、瞬时功率输出特性,设计了一种以超级电容为储能元件的激光起爆试验装置,探讨了在不同放电电压及超级电容容值条件下,超级电容驱动激光的输出波形与能量规律,及其对以BNCP为始发药、JH-14为输出装药的激光起爆器的激光起爆规律,为超级电容在激光火工品的应用提供参考。

## 2 试验部分

### 2.1 超级电容激光起爆装置

传统直流电源驱动模式工作时间内可为激光二极管提供稳定持续的驱动电流,而超级电容驱动方式下,超级电容储能随工作时间逐渐消耗,驱动电流随之减小,驱动能力减弱,两种驱动方式驱动激光输出功率在时域上差异较大。为了研究超级电容驱动激光起爆规律,设计了如图1所示的超级电容激光起爆装置,主要由DC-DC电源模块、控制模块、充电模块、功率驱动模块、MOSFET开关模块等功能模块和限流电阻(包含等效电阻 $R_{CS}$ 及放电回路阻抗 $R_{LS}$ )组成,当装置处于待机状态时,首先将电能存储在超级电容中,当接收到点火指令后,驱动模块控制MOSFET开关管闭合,控制超级电容放电为激光二极管提供电能,驱动激光二极管输出大功率激光。

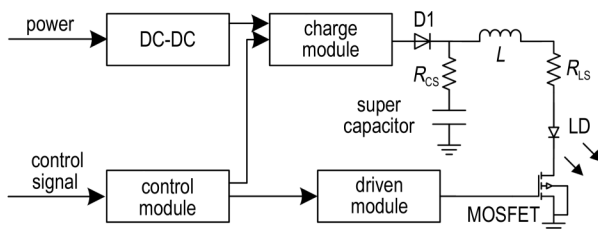


图1 基于超级电容的激光起爆装置原理图

Fig.1 Principle diagram of laser initiation device based on super capacitor

超级电容放电过程为零输入响应<sup>[12]</sup>,通常所建立的模型为RC放电模型<sup>[13-14]</sup>,电流和电压按指数规律衰减,忽略了放电回路中电感的影响,即放电开始时,

就已经达到了激光输出功率的极大值,而根据所选用大功率激光二极管器件手册及文献,激光输出上升沿一般在数十微秒量级<sup>[15]</sup>,这是由于放电回路及激光二极管自身寄生参数限制了上升沿的陡峭程度。激光起爆作用时间一般较短,因此需通过建立在时域上更能反映激光驱动上升沿特性的RLC激光输出时域模型对超级电容激光起爆装置输出特性进行仿真研究<sup>[16]</sup>。

在放电初始状态下,超级电容放电电压为 $U_F(0)$ ,则电路的放电回路可看作零输入响应的串联RLC电路,与传统脉冲激光二极管高压驱动方式不同,在低压驱动中激光二极管结电压不可忽略,由此得到超级电容放电回路基本方程如式(1)为:

$$\begin{cases} LC \frac{d^2(U_F(t) - U_T)}{dt^2} + (R_{LS} + R_{CS})C \frac{d(U_F(t) - U_T)}{dt} + (U_F(t) - U_T) = 0 \\ I_F(t) = C \frac{d(U_F(t) - U_T)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $U_F(t)$ 为起爆回路放电电压,V; $I_F(t)$ 为起爆回路放电电流,A; $C$ 为超级电容的容值,mF; $R_{CS}$ 为超级电容等效电阻, $\Omega$ ; $R_{LS}$ 为限流电阻及线阻, $\Omega$ ; $L$ 为放电回路寄生电感, $\mu\text{H}$ ; $U_T$ 为激光二极管结电压,V。

由初始条件 $t=0^+$ 时,设 $U_0$ 为初始放电电压,则 $U_F(0)=U_0$ , $I_F(0)=0$ ;令 $R_s$ 为放电回路的总阻抗, $R_s=R_{LS}+R_{CS}$ , $\alpha$ 为衰减因子, $\alpha=\frac{R_s}{2L}$ ,决定放电过程中电压和电流的衰减特性。

当 $R_s > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时,电流 $I_F(t)$ 放电波形为过阻尼正向脉冲波形如式(2)为:

$$I_F(t) = \frac{U_0 - U_T}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (2)$$

式中, $p_1 = -\alpha + \sqrt{(\frac{R_s}{2L})^2 - \frac{1}{LC}}$ ; $p_2 = -\alpha - \sqrt{(\frac{R_s}{2L})^2 - \frac{1}{LC}}$

激光二极管在超级电容放电回路电流的驱动下输出激光能量,由于激光二极管驱动的特殊性,存在结电压 $U_T$ 、阈值电流 $I_{th}$ 两项基本约束,当驱动电流低于 $I_{th}$ 时,激光二极管仅输出荧光,当驱动电压低于 $U_T$ 时,激光二极管未导通无输出,因此激光输出波形并不与电流波形完全一致。结合(2)式可得激光二极管输出功率如式(3):

$$P_{\text{laser}}(t) = \begin{cases} E_{ff} \cdot I_F(t) \cdot U_{OP} \cdot \Phi(t), & I_F(t) \geq I_{th} \\ 0, & I_F(t) < I_{th} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Phi(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $E_{\text{II}}$  为激光二极管斜率;  $\tau$  为激光脉冲时间,  $\mu\text{s}$ ;  $U_{\text{OP}}$  为激光二极管输出激光时的工作电压,  $\text{V}$ ;  $\Phi(t)$  表示只在激光脉冲时间内有激光输出。

由此建立了以超级电容容值、放电电压为变量的超级电容驱动激光输出时域模型。

根据器件数据手册及实测结果, 设定超级电容激光起爆装置放电回路限流电阻  $R_{\text{LS}}$  为  $0.9 \Omega$ , 寄生电感  $L$  为  $25 \mu\text{H}$ , 激光二极管结电压  $U_{\text{T}}$  为  $2.606 \text{ V}$ , 阈值电流  $I_{\text{th}}$  为  $0.75 \text{ A}$ , 工作电压  $U_{\text{OP}}$  为  $3.21 \text{ V}$ , 光电斜率  $E_{\text{II}}$  为  $0.5534$ , 起爆控制脉宽  $\tau$  为  $830 \mu\text{s}$ 。为了提高超级电容高功率驱动能力, 根据超级电容材料(液态钽电容 Liquid tantalum 与有机电化学双层电容 EDLC)与容值大小, 选用了表 1 所示的 7 种超级电容。

表 1 超级电容选型参数

Table 1 Selection parameters of super capacitor

sample	$C / \text{mF}$	$R_{\text{CS}} / \text{m}\Omega$	materials
1#	0.044	1580.00	liquid tantalum
2#	0.08	1200.00	liquid tantalum
3#	0.1	750.00	liquid tantalum
4#	0.44	650.00	liquid tantalum
5#	1	450.00	liquid tantalum
6#	60	650.00	EDLC
7#	120	192.00	EDLC

Note:  $C$  is the capacitance value.  $R_{\text{CS}}$  is the equivalent series resistance.

## 2.2 试验样品

试验所用传能光缆为  $105/125 \mu\text{m}$  多模阶跃型石英光缆, 长度  $2 \text{ m}$ , 数值孔径为  $0.22$ 。

激光起爆器<sup>[17-19]</sup>采用带自聚焦透镜的激光起爆器, 其始发装药为 BNCP 起爆药, 为了使激光能量能够转化为热能被药剂吸收, 掺入碳黑作为激光吸收剂, 以提高吸光性能, 含碳量为  $3\%$ , 装药量为  $50 \text{ mg}$ , 装药密度  $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; 输出装药为聚黑 (JH-14), 装药量  $150 \text{ mg}$ , 装药密度  $1.69 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。最终单发起爆器的装药量为  $200 \text{ mg}$ , 装药药柱直径为  $4.5 \text{ mm}$ , 高度为  $7.8 \text{ mm}$ 。

## 2.3 超级电容驱动激光起爆试验方法

超级电容放电起爆试验系统如图 2 所示, 由超级电容激光起爆装置、 $1\times 2$  不均匀光分束器 ( $99:1$ , 多模阶跃  $105/125 \mu\text{m}$ )、传能光缆、触发光缆、激光起爆器、激光能量计 (Ophir Vega 型)、光电探测器 (Thorlabs DET10A 型)、数字示波器 (Agilent DSO5012A

型, 带宽  $100 \text{ MHz}$ , 采样速率  $2\text{GSa/s}$ ) 等部分组成。

试验时, 通过更换超级电容器及调节放电电压, 可测试激光起爆器在不同超级电容参数条件下的响应规律。超级电容激光起爆装置控制超级电容放电驱动激光二极管产生高功率激光, 经  $1\times 2$  光分束器后分为功率比为  $99:1$  的两束激光, 其中小功率激光经触发光纤、光衰减器传输至光电探测器 1, 作为激光起爆触发信号, 试验中光衰减器进一步对小功率激光衰减  $10$  倍, 通过对光电探测器响应度标定可计算激光输出至激光起爆器的功率。大功率激光经传能光纤传输后接入激光起爆器最终实现起爆, 在起爆试验前接入激光能量计可对激光输出能量进行测量, 而激光起爆器爆轰产生的光信号通过光电探测器 2 采集作为起爆器作用信号, 分析数字示波器存储记录的触发信号及起爆器作用信号如 (5) 式可得到激光起爆器作用时间  $\tau_{\text{d}}$ ,  $\mu\text{s}$ 。

$$\tau_{\text{d}} = t_1 - t_2 \quad (5)$$

式中,  $t_1$  为激光起爆触发时刻,  $\mu\text{s}$ ;  $t_2$  为起爆器作用时刻,  $\mu\text{s}$ 。

激光起爆能量  $E_{\text{d}}$  为激光输出功率波形在激光触发至激光起爆器作用时间段内的积分:

$$E_{\text{d}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{exp}}(t) dt \quad (6)$$

式中,  $P_{\text{exp}}(t)$  为超级电容驱动激光二极管输出时域功率,  $\text{W}$ 。

进而可以求出激光能量利用率  $\eta_{\text{d}}$ :

$$\eta_{\text{d}} = E_0 / E_{\text{d}} \quad (7)$$

式中,  $E_0$  为利用激光能量计测量的激光输出能量。

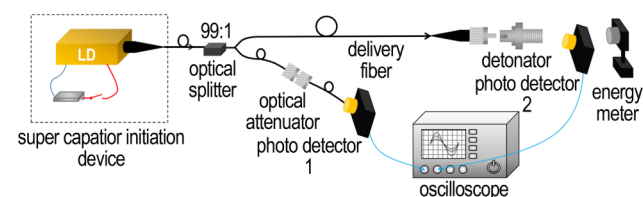


图 2 超级电容放电起爆试验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of super capacitor discharge initiation test system

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同储能容值下激光起爆试验

设定超级电容激光起爆装置放电电压为  $5 \text{ V}$ , 激光额定输出脉宽为  $830 \mu\text{s}$ , 采用表 1 所列 7 种不同容值的超级电容分别对激光输出特性和激光起爆性能进行研究。

利用 Multisim 电路仿真软件对基于超级电容驱动的激光输出时域模型数值仿真, 仿真及试验结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 仿真结果(图 3a)与试验结果(图 3b)一致性较好。求解相同容值驱动条件下激光输出脉宽仿真与试验结果, 二者相差均小于 4.2%, 数值仿真结果基本可反映不同容值下超级电容驱动激光输出特性。激光功率幅值随脉冲工作时间呈指数降低, 容值越大, 激光功率下降幅度越缓慢; 激光功率峰值均处于前沿附近, 即在脉冲形成的前期激光功率达到最高而后逐步下降; 激光输出脉宽随容值的增大而逐渐增加, 当超级电容容值增加到一定数值, 储能足以提供额定脉冲工作时间激光器所需能量, 激光输出脉宽可达额定输出脉宽。当容值为 60 mF 和 120 mF 时, 实测激光输出脉宽为 830  $\mu$ s, 激光输出功率在全脉宽范围内仅略有下降, 基本保持了平顶脉冲波形。当容值为 0.44~1 mF 时, 激光输出功率呈指数显著下降, 1 mF 时, 实测激光脉宽为 830  $\mu$ s, 而 0.44 mF 时激光输出脉宽仅 767  $\mu$ s, 储能已不足以支持全脉冲激

光输出。当容值继续下降, 电容为 0.044 mF 时, 激光输出脉宽仅为 80  $\mu$ s。在相同的放电电压下, 激光输出功率随着电容等效电阻的增大而迅速降低, 对比 60 mF 与 1 mF 电容驱动激光输出峰值功率, 虽然 60 mF 超级电容储能较高, 但由于等效电阻较大, 其输出峰值功率反而较小。

不同容值的超级电容驱动激光输出能量与起爆作用时间如图 4 所示, 表 2 为激光起爆能量与能量利用率。在放电电压确定的条件下, 随着超级电容容值的增加, 激光起爆作用时间降低, 最大降幅约 32.1%, 但能量利用效率也随之逐渐降低。当容值较小, 在 0.044~0.44 mF 时, 容值对激光起爆性能具有显著影响, 容值过小如 0.044 mF 所能驱动输出的激光能量较低, 无法实现激光起爆, 而随着容值的逐步上升, 起爆作用时间从 43  $\mu$ s 迅速降为 30.7  $\mu$ s, 激光能量利用率从 29.22% 降低为 5.86%。而当容值较大, 在 1~120 mF 时, 容值对激光作用时间的影响逐渐减弱, 激光能量利用效率更为显著的降低, 这主要是由于在

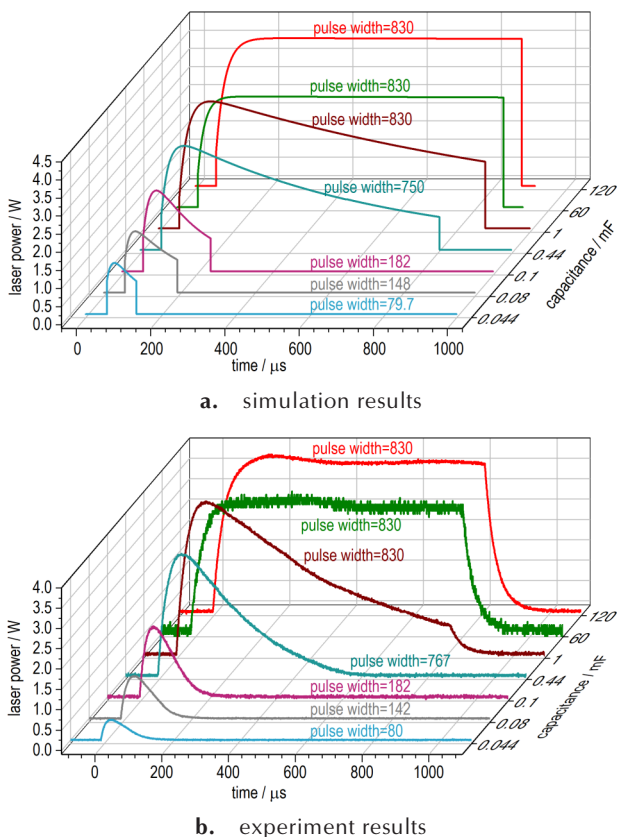


图 3 不同容值下超级电容驱动激光输出特性仿真与试验结果  
Fig. 3 Simulation and experimental results of laser output characteristic driven by super capacitor under different capacitance values

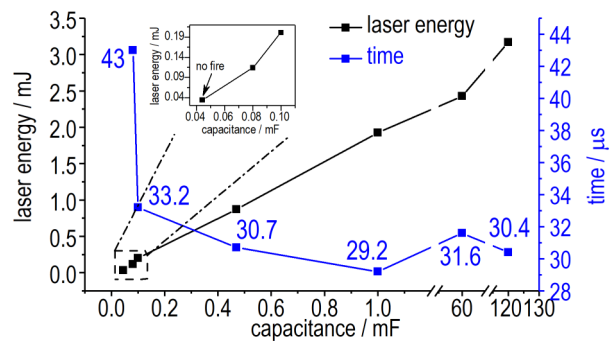


图 4 不同容值下超级电容驱动的激光输出能量与起爆作用时间曲线  
Fig. 4 Curves of laser output energy and initiation action time driven by super capacitor under different capacitance values

表 2 不同容值下超级电容驱动的激光起爆能量及能量利用率  
Table 2 The laser initiation energy and energy utilization rate driven by super capacitor under different capacitance values

C / mF	$E_0$ / mJ	$E_d$ / mJ	$\eta_d$ / %
0.044	0.034	-	-
0.08	0.114	0.037	29.22
0.1	0.201	0.045	19.98
0.44	0.870	0.057	5.86
1	1.925	0.056	2.60
60	2.430	0.043	1.60
120	3.170	0.048	1.36

Note: C is the capacitance value.  $E_0$  is laser output energy.  $E_d$  is laser initiation energy.  $\eta_d$  is energy utilization rate.

激光起爆器作用时间内, 大容值范围内的超级电容所驱动的激光功率基本保持稳定, 容值对BNCP药剂的影响降低, 其作用时间的差异主要受超级电容等效电阻  $R_{CS}$  影响,  $R_{CS}$  越小作用时间越快。在放电电压确定的条件下, 电容储能容值及等效电阻两因素将共同影响激光起爆器作用时间, 存在较优值, 在选择超级电容时应选择容值适中, 等效电阻较小的超级电容。

### 3.2 不同放电电压下激光起爆试验

在电容容值为 120 mF, 激光输出脉宽为 830  $\mu$ s 的试验条件下, 超级电容激光起爆装置采用 5 种不同放电电压对激光输出特性和激光起爆性能进行研究。

利用 Multisim 电路仿真软件对基于超级电容驱动的激光输出时域模型数值仿真, 其仿真结果及试验结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 激光输出功率仿真(图 5a)与试验结果(图 5b)基本吻合, 除放电电压为 4 V 时二者相差 12.8%, 其余放电电压下二者相差均在 6.4% 以内。放电电压直接决定激光输出功率, 放

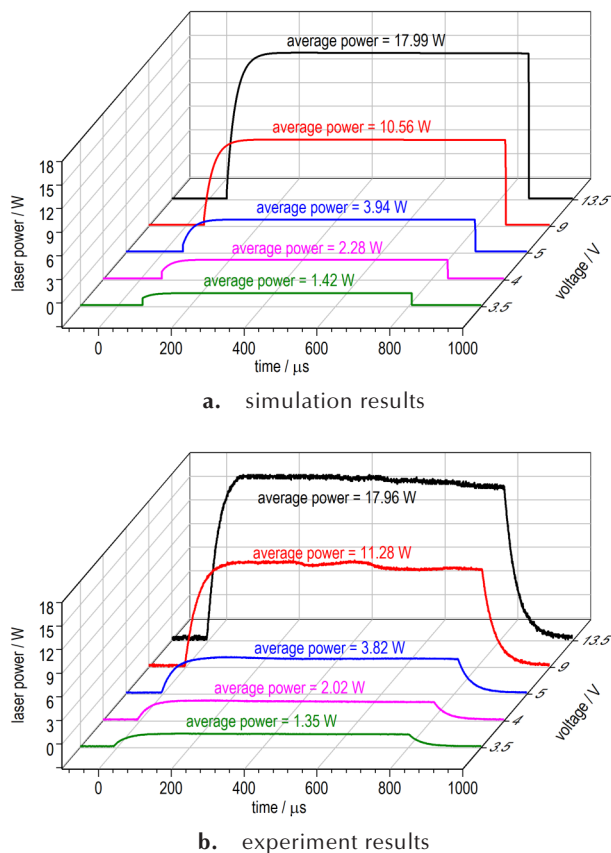


图 5 不同放电电压下超级电容驱动的激光输出波形的仿真与试验结果

Fig.5 Simulation and experimental results of the laser output waveform driven by super capacitor under different discharge voltages

电电压越高, 超级电容驱动激光输出功率越高。当超级电容确定, 激光功率输出时域波形基本一致, 仅功率幅值随放电电压发生变化, 放电电压越高, 激光输出功率越高。这主要是因为激光二极管在导通状态下具有结电压  $U_T$ , 当放电电压较小时, 扣除结电压, 剩余电压所能驱动的电流较低, 进而影响激光功率, 当放电电压逐渐升高, 激光二极管结电压对驱动电流的影响就逐步降低, 进而激光二极管就可以输出更高功率的激光。

不同放电电压下超级电容驱动激光输出能量与起爆作用时间如图 6 所示, 表 3 为激光起爆能量与能量利用率。超级电容固定为 120 mF, 随着放电电压的升高, 激光起爆作用时间显著降低, 最大降幅达 71%, 激光起爆能量基本在 0.04~0.055 mJ, 但能量利用效率也随之降低。在 3.5~9 V 放电电压范围内, 放电电压对起爆作用时间具有显著影响, 而当放电电压高于 9 V, 放电电压对起爆作用时间的影响逐渐减弱, 但起爆作用时间仍然随着放电电压的增加而降低, 能量利用效率达到最低。这主要是由于随着放电电压的升高, 激光输出功率显著增加, 为 BNCP 提供了更多的激光能量, 加速了作用过程, 但较高的放电电压也必然引起激光能量利用效率的降低。

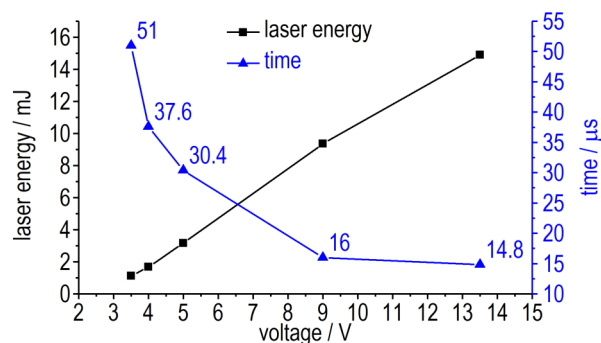


图 6 不同放电电压下超级电容驱动的激光输出能量与起爆作用时间曲线

Fig.6 Curves of laser output energy and initiation action time driven by super capacitor under different discharge voltages

表 3 不同放电电压下超级电容驱动的激光起爆能量及能量利用率

Table 3 The laser initiation energy and energy utilization rate driven by super capacitor under different discharge voltages

$U / V$	$E_0 / mJ$	$E_d / mJ$	$\eta_d / \%$
3.5	1.120	0.041	3.67
4	1.680	0.040	2.39
5	3.170	0.048	1.52
9	9.360	0.045	0.48
13.5	14.910	0.054	0.36

## 4 结论

(1) 建立并数值仿真了具有激光上升沿时域特征的超级电容驱动的激光输出时域模型, 模型数值仿真结果与试验结果有较好的一致性, 初步揭示了基于超级电容驱动激光二极管时域输出规律。

(2) 放电电压决定激光输出功率, 放电电压越高, 超级电容驱动激光输出激光功率越高; 激光起爆作用时间随着放电电压的增高而显著降低, 降幅最大约 71%, 激光起爆能量稳定在 0.037~0.057 mJ, 能量利用率随放电电压升高而快速降低, 当放电电压大于 9 V 时, 起爆作用时间降幅逐渐减缓。

(3) 超级电容的储能容值决定激光输出能量, 容值越大超级电容驱动激光输出能量越大; 激光起爆作用时间随容值的增高而降低, 降幅最大约 32.1%, 激光起爆能量稳定在 0.04~0.05 mJ, 能量利用率随容值的增高而降低, 当容值大于 1 mF, 激光起爆时间基本稳定。120 mF 电容驱动激光起爆作用时间最短为 14.8  $\mu$ s, 可实现半导体激光快速起爆。

### 参考文献:

- [1] Bowden M D, Cheeseman M. Laser initiation of energetic materials: a historical overview [C]//San Diego. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 6662: 666208-1-666208-12.
- [2] 王宇, 魏超, 张嵩. 钝感火工品中新技术、新含能材料研究进展 [J]. 科技导报, 2013, 31(10): 75-75.  
WANG Yu, WEI Chao, ZHANG Song. Developing status of new techniques and new energetic materials in insensitive pyrotechnics [J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(10): 75-75.
- [3] 赵兴海, 高杨, 赵翔. 激光起爆技术研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 797-802.  
ZHAO Xing-hai, GAO Yang, ZHAO Xiang. Development of laser initiation technology [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2009, 38(5): 797-802.
- [4] Setchell R E, Trott W M. Prompt laser ignition and transition to detonation in a secondary explosive [R]. DE9404141, 1995: 1-18.
- [5] Livermore E, Lierstuen L O, Raknerud R, et al. Optical pyrotechnology for launchers and satellites [C]//Tenerife. Proceedings of SPIE-International Conference on Space Optics—ICSO 2014, 10563: 105631R1-105631R8. (17 November 2017)
- [6] 李继峰, 严楠, 高颂. 激光二极管点火驱动电路设计 [J]. 火工品, 2004(1): 4-6.  
LI Ji-feng, YAN Nan, GAO Song. Design of laser diode driver for ignition [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004(1): 4-6.
- [7] Hafenrichter E S, Fleming K J, Jr M B W. Fast laser diode ignition of confined BNCP [C]//Nevads. AIAA-41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2003: 1-11.
- [8] 陈利魁, 盛涤伦, 杨斌, 等. 掺杂对 BNCP 半导体激光起爆感度的影响 [J]. 含能材料, 2009, 17(2): 229-232.  
CHEN Li-kui, SHENG Di-lun, YANG Bing, et al. Effect of dopant on BNCP semiconductor laser sensitivity [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 229-232.
- [9] 曹军胜. 半导体激光起爆试验研究 [J]. 激光杂志, 2014, 35(10): 29-32.  
CAO Jun-sheng. Experimental study on the initiation of semiconductor laser [J]. *Laser Journal*, 2014, 35(10): 29-32.
- [10] 任鹏, 张蕊, 贺爱锋, 等. 恒压驱动对激光阵列起爆系统性能的影响 [J]. 火工品, 2016(1): 29-32.  
REN Peng, ZHANG Rui, HE Ai-feng, et al. Effect of constant-voltage drive on laser array initiation system performance [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2016(1): 29-32.
- [11] 陈曦, 张洪源, 刘伟, 等. 储能式电源在航天火工品驱动的应用研究 [J]. 电源技术, 2016, 40(4): 792-795.  
CHEN Xi, ZHANG Hong-yuan, LIU Wei, et al. Research of energy storage type power supply for driving aerospace electric initiating devices [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(4): 792-795.
- [12] 沈超, 付丽璋, 吴世通, 等. 电容放电式火工品点火电路参数设计与仿真 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(1): 67-73.  
SHEN Chao, Fu Li-zhang, WU Shi-tong, et al. Parameter design and simulation of the capacitor discharge ignition circuit for initiation explosive device [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(1): 67-73.
- [13] 刘明芳, 张小兵. 半导体桥点火模型的建立及数值模拟 [J]. 火炸药学报, 2008, 31(5): 87-90.  
LIU Ming-fang, ZHANG Xiao-bing. Establishment of semiconductor bridge ignition model and its numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(5): 87-90.
- [14] 熊煜, 孙迎波, 刘刚明, 等. 微型化大电流脉冲激光器驱动电路研究 [J]. 半导体光电, 2014, 35(5): 912-915.  
XIONG Yu, SUN Ying-bo, LIU Gang-ming, et al. Research on miniaturized high current pulsed LD driver circuit [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(5): 912-915.
- [15] 李涛, 胡和平, 杨洪, 等. 大功率激光二极管驱动电源研制 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(3): 454-457.  
LI Tao, HU He-ping, YANG Hong, et al. Development of high-power laser diode power supply [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(3): 454-457.
- [16] 徐孝彬, 张合, 张祥金. 激光引信可调高频窄脉冲驱动电源设计 [J]. 光子学报, 2017, 46(Suppl.1): 23-28.  
XU Xiao-bin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. Design of high-frequency and narrow pulsed driver power of laser fuze [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(Suppl.1): 23-28.
- [17] 盛涤伦, 朱雅红, 陈利魁, 等. 激光与含能化合物相互作用机理研究 [J]. 含能材料, 2008, 16(5): 481-486.  
SHENG Di-lun, ZHU Ya-hong, CHEN Li-kui, et al. Interactional mechanism between laser and energetic compound [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 481-486.
- [18] 贺爱锋, 褚恩义, 曹椿强, 等. 低温对激光起爆系统能量传输效率的影响 [J]. 含能材料, 2016, 24(7): 698-702.  
HE Ai-feng, CHU En-yi, CAO Chun-qiang, et al. Influence of

low temperature on laser transmission efficiency in laser initiation subsystem [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(7): 698–702.

[19] 陈建华, 鲁建存, 贺爱锋, 等. 自聚焦激光换能元模拟仿真分析

[J]. *火工品*, 2010(1):48–52.

CHEN Jian-hua, LU Jian-cun, HE Ai-feng, et al. Simulation on self-focusing laser transducer component[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(1): 48–52.

## Laser Initiation BNCP Driven by Super Capacitor

WANG Hao-yu<sup>1,2,3</sup>, CHU En-yi<sup>3</sup>, HONG Jin<sup>1,2</sup>, HE Ai-feng<sup>3</sup>, CAO Chun-qiang<sup>3</sup>, JING Bo<sup>3</sup>, MA Yue<sup>3</sup>, HU Ya-dong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061, China)

**Abstract:** To study the action rule of laser initiation driven by super capacitor, a time-domain model of laser output driven by super capacitor was established and a laser initiation device driven by super capacitor was designed. The output waveforms of laser under different capacitance values and discharge voltages were obtained. The test data were basically consistent with the numerical simulation data. The initiation rule of laser detonator of tetraamine bis(5-nitrotetraoleto) cobalt(Ⅲ) perchlorate (BNCP) as the primary charge and JH-14 as the output charge was studied by the laser initiation device driven by super capacitor. Results show that the laser initiation time driven based on super capacitor decreases rapidly with the increase of discharge voltage, and the maximum decreasing amplitude reaches 71%, and the laser initiation time decreases slightly with the increase of the capacitance value, the decreasing amplitude is about 32.1%. The initiation energy is between 0.037 mJ and 0.057 mJ. The initiation energy utilization rate decreases with the increase of discharge voltage and the capacitance. Under the test conditions of discharge voltage of 13.5 V and capacitance of 120 mF, the initiation action time is as fast as 14.8 μs, which realizes the rapid laser initiation. driven by super capacitor.

**Key words:** laser diode; super-capacitor; laser initiation; action time; tetraamine bis(5-nitrotetraoleto) cobalt(Ⅲ) perchlorate (BNCP)

**CLC number:** TQ565; TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018034

(责编 王艳秀)