

文章编号: 2095-4980(2013)01-0152-05

大功率半导体激光器脉冲驱动电源研制

王 卫, 夏连胜, 谌 怡, 刘 毅, 石金水, 邓建军

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 研制了一种大电流、窄脉宽的半导体激光器驱动电源, 该驱动电源激励半导体激光器用于驱动砷化镓光导开关。驱动电路采用高速金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)作为开关, 为半导体激光器提供一个前沿快(1.2 ns)、脉宽窄(15 ns)、峰值电流大(72 A)的脉冲驱动电流, 并可根据需要调节电路中的参数, 获得不同前沿、不同脉宽、不同峰值的电流脉冲。半导体激光器输出的激光脉冲功率可达 75 W, 上升前沿约 3 ns, 抖动均方根小于 200 ps, 可稳定触发工作在非线性模式下的砷化镓光导开关。

关键词: 半导体激光器; 金属氧化物半导体场效应晶体管; 大电流; 窄脉宽; 光导开关

中图分类号: TN248.4; TM836

文献标识码: A

Laser diode driver used for triggering Photoconductive Semiconductor Switch

WANG Wei, XIA Lian-sheng, CHEN Yi, LIU Yi, SHI Jin-shui, DENG Jian-jun

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A new kind of driver for laser diode with high current and short duration is introduced. The laser diode is used for driving GaAs Photoconductive Semiconductor Switch(PCSS) in the experiment. The Metallic Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(MOSFET) based driver provides a current trigger for laser diode, whose rise-time, Full Width Half Maximum(FWHM) and peak current are 1.2 ns, 15ns and 72 A, respectively. The parameters of the current trigger are adjustable. The peak power of the laser diode is 75 W, its output rise-time about 3 ns, and root mean square of jitter below 200 ps. Using this driver, the non-linear PCSS can be triggered stably.

Key words: laser diode; Metallic Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(MOSFET); high current; short duration; Photoconductive Semiconductor Switches(PCSS)

光导开关(PCSS)是利用激光脉冲作用于光导半导体(如 GaAs, InP 等), 使其阻抗在极短时间内急剧减小至较低值的一种新型固体开关^[1]。与传统开关相比, 光导开关具有极其优良的电学性能, 极快的响应速度(ps 量级), 极小的触发延迟时间抖动(ps 量级), 较大的功率容量(MW 量级), 极好的同步精度(ps 量级), 极高的耐压能力(100 kV 量级), 良好的光电隔离和抗电磁干扰能力等。自 1975 年 Si 光导开关研制成功^[2], 尤其是在 1977 年性能更优越的 GaAs 取代 Si 成为光导开关基底材料^[3]以来, 光导开关在脉冲功率技术的应用得到快速发展, 在固态紧凑型脉冲功率源^[4]、高功率超宽带辐射^[5]、THz 电磁波发射^[6]、大型脉冲功率装置触发控制系统^[7]等研究领域受到广泛关注。

国内外的光导开关研究结果表明, 当 GaAs 光导开关工作在非线性模式时, 利用半导体激光器产生的 μJ 量级的激光脉冲作为触发源是可行的^[8-9]。然而, 在利用较低激励光能触发光导开关时, 光导开关的性能在很大程度上取决于激光脉冲的参数, 欲使光导开关达到良好的工作状态, 则应要求激光脉冲前沿快, 功率密度大, 抖动小^[10-12]。这就要求半导体激光器的驱动电路所提供的驱动电流要满足前沿快、幅度大、脉宽窄、抖动小等要求。本文研制的大功率半导体激光器驱动电源满足上述要求, 并可根据应用需要, 通过调节电路中的电源电压、电阻、电容等参数, 获得不同前沿、不同脉宽、不同峰值的电流脉冲。

收稿日期: 2012-06-03; 修回日期: 2012-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11035004)

1 MOSFET 的导通特性

如图 1 所示, MOSFET 开关电路的详细开通过程分为以下 4 个步骤^[10-11]:

1) 在第 1 阶段, 前级驱动电流对 MOSFET 输入电容充电, 使输入电容电压从 0 V 上升到阈值电压 V_{TH} 。因为 MOSFET 在这一阶段并未导通, D,S 间有很大的阻抗, 所以大部分充电电流都流向栅源寄生电容 C_{GS} , 小部分电流流向 C_{GD} , 导致 C_{GD} 两端电压略微降低。因为漏电流和漏电压在这个阶段都没变化, 所以这段时间又被称为开启延迟(turn-on delay)时间。

2) 在第 2 阶段, 栅源电压 V_{GS} 从阈值电压 V_{TH} 逐渐上升到密勒稳定电平 $V_{GS,Miller}$ 。由于漏源导电沟道已经建立, R_{DS} 迅速减小, I_D 快速上升, 同时储存在 C_{GD} 和 C_{DS} 上的电荷也开始通过导电沟道释放, V_{DS} 下降, 栅极电流 I_G 依然流向 C_{GS} 和 C_{GD} , V_{GS} 上升。

3) 经过第 2 阶段的 C_{GS} 充电, 漏源导电沟道进一步加强, D,S 间阻抗进一步减小。由于 MOSFET 的前级不可能扇出无限大的电流, 故栅极电流 I_G 全部都流向 C_{GD} 以促进 C_{GD} 两端电压反向, 同时 V_{GS} 维持 $V_{GS,Miller}$ 不变, V_{DS} 继续减小。由于该阶段 D,S 间阻抗不变, I_G 也不变, 所以 I_D 也维持不变。

4) 进入第 4 阶段后, C_{GD} 开始反向充电(设 C_{GD} 的 D 端为正), C_{GS} 上的电压也进一步升高, 漏源导电沟道在原来的基础上进一步加强, V_{GS} 增大, I_D 稍微增大, V_{DS} 略微减小。

由上面的分析可知, 在 MOSFET 导通过程中的第 2 阶段, MOSFET 的输出电流 I_D 正比于门电压 V_{GS} , 而门电压 V_{GS} 又等于电容 C_{GS} 两端的电压, 所以 I_D 正比于电容 C_{GS} 两端的电压。由于 C_{GS} 是由栅极电流 I_G 来充电的, 因此, 要减小 MOSFET 的导通时间, 即减小 I_D 的上升时间, 可以通过增大栅极电流 I_G 的幅值和减小 I_G 的上升时间来实现。

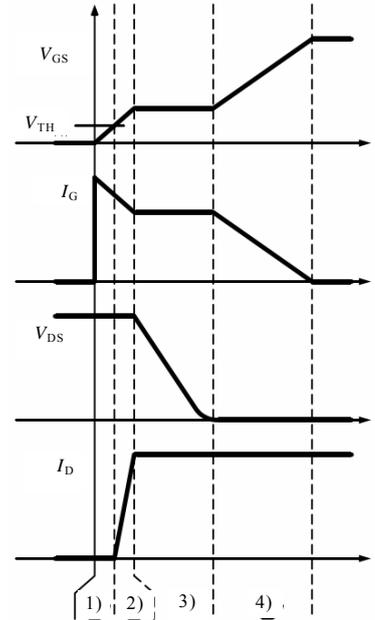


Fig.1 MOSFET turn-on time intervals
图 1 MOSFET 导通时序图

2 电路设计

大功率半导体激光器驱动电路的设计框图如图 2 所示。首先由脉冲发生电路产生初始触发脉冲, 经过脉冲整形电路后得到一个晶体管逻辑电路(Transistor-Transistor Logic, TTL)脉冲信号。此 TTL 脉冲信号经 MOSFET 驱动电路转换为快速上升沿、大驱动电流的栅极驱动信号, 驱动后端高速 MOSFET 快速地导通, 然后储能电路对半导体激光器放电得到激光脉冲, 进而驱动砷化镓光导开关。保护电路可以防止半导体激光器被反向电压损坏。

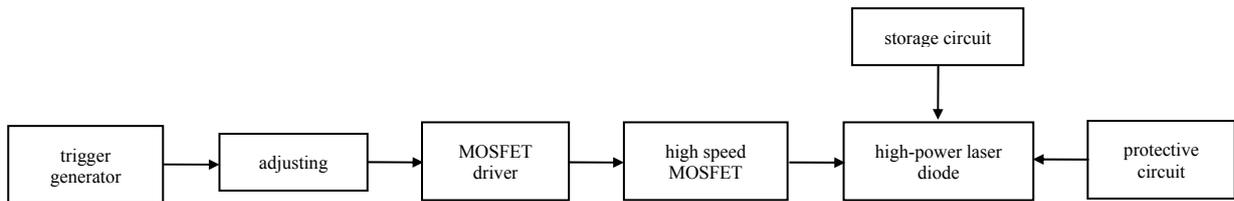


Fig.2 Block diagram of drive circuit unit
图 2 驱动电路设计框图

驱动电路主要电路原理图如图 3 所示。图 3 中, 左侧虚线框内为 MOSFET 驱动电路。 C_1 是一个小储能电容, 它的作用是在触发脉冲 trigger 到来使雪崩晶体管 Q_1 导通时, 通过 Q_1 、栅极电阻 R_2 为 MOSFET 提供一个前沿快、电流大, 但能量小的驱动脉冲信号, 这样可以最大限度地缩短 MOSFET 的导通时间。但为了 MOSFET 在驱动脉冲电流很大的情况下不至于损坏, 驱动脉冲的能量应当很小。因此, 应当满足 $C_1 \ll C_{iss}$, 其中 C_{iss} 为 MOSFET 的输入电容, DE275 的 C_{iss} 为 1 800 pF, 经过计算、模拟, C_1 的选取应当在 300 pF 左右。 L_1 为电路分布电感, 它会加大驱动信号的上升时间, 在电路设计时应当尽量减小。 R_2 为栅极电阻, 合理选取 R_2 可以消除栅极振荡, 使栅极驱动信号达到较好波形。

MOSFET 是整个电路的核心器件。为保证大功率半导体激光器获得的驱动电流在前沿、幅值、脉宽方面达

到要求,必须选用导通速度快、导通内阻小、峰值电流大的 MOSFET。综合考虑下,选用 IXYS 公司生产的 DE275,它的导通速度快: $t_{on}=2\text{ ns}$, 导通内阻小: $R_{DS(ON)}=0.4\ \Omega$, 短脉冲条件下最大耐受电流 $I_D=72\text{ A}$, 最大耐受电压 $V_{DSS}=500\text{ V}$ 。

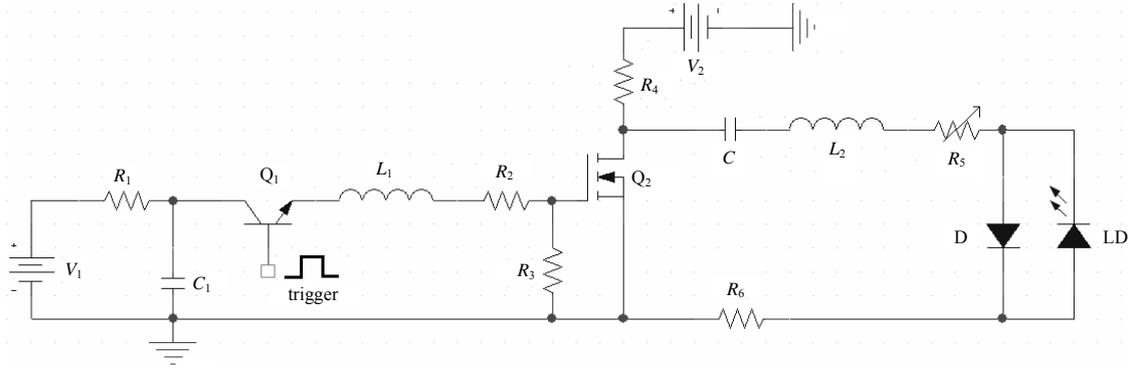


Fig.3 Main circuit of the driver
图 3 驱动电路原理图

MOSFET 是整个电路的核心器件。为保证大功率半导体激光器获得的驱动电流在前沿、幅值、脉宽方面达到要求,必须选用导通速度快、导通内阻小、峰值电流大的 MOSFET。综合考虑下,选用 IXYS 公司生产的 DE275,它的导通速度快: $t_{on}=2\text{ ns}$, 导通内阻小: $R_{DS(ON)}=0.4\ \Omega$, 短脉冲条件下最大耐受电流 $I_D=72\text{ A}$, 最大耐受电压 $V_{DSS}=500\text{ V}$ 。

右侧虚线框内为主放电路。在栅极触发脉冲还未到达时, MOSFET 处于截止状态, 电源 V_2 通过保护电阻 R_4 、储能电容 C 、二极管 D 和取样电阻 R_6 为 C 充电。在栅极触发脉冲到达时, MOSFET 导通, 储能电容 C 通过 MOSFET、地、 R_6 和 LD 放电, 为 LD 提供一个前沿快而峰值大的驱动电流, 驱动 LD 输出前沿快而峰值功率高的激光脉冲, 进而驱动工作在非线性模式下的 GaAs 光导开关。在取样电阻 R_6 上获得一个负电压脉冲波形, 它反应了放电过程中主回路中电流的变化情况。二极管 D 与 LD 反极性并联, 用来保护 LD 不被反向电压所损坏, 同时为 C 的充电过程提供了回路。在应用过程中, 可以通过调节栅极电阻 R_2 、充电电压 V_2 、储能电容 C 和可调电阻 R_5 等参数来调节驱动脉冲电流的前沿、脉宽和峰值。

图 4 为主回路的电路仿真波形。图 4(a)为回路分布电感 L_2 的参数扫描波形, 4 条曲线从左至右分别表示 L_2 为 20 nH , 40 nH , 60 nH , 80 nH 时的驱动电流波形。可以看出, 回路分布电感 L_2 越大, 驱动电流前沿越大, 峰值越小, 因此, 在主回路的设计过程中要特别注意, 尽量减小主回路中的分布参数。采取的措施主要包括: 首先, 尽量缩短主回路的长度, 因为回路越长, 分布参数越大; 其次, 尽量选择电感量小的电阻、电容等器件, 并且器件引脚要尽量短; 再次, 通过多个器件的并联使用来减小分布电感; 最后, 通过电路板的敷铜、器件合理布局等措施减小分布参数。图 4(b)为可调电阻 R_5 的参数扫描波形, 5 条曲线从左至右分别表示 R_5 为 $10\ \Omega$, $8\ \Omega$, $6\ \Omega$, $4\ \Omega$, $2\ \Omega$ 时的驱动电流波形。 R_5 主要作用是为了抑制回路分布电感 L_2 对驱动电流波形的影响, 从模拟结果可以看出, R_5 较大时对 L_2 的抑制效果较好。然而, R_5 变大时也会增加驱动电流的上升时间, 因此需通过实验合理选取 R_5 的值。

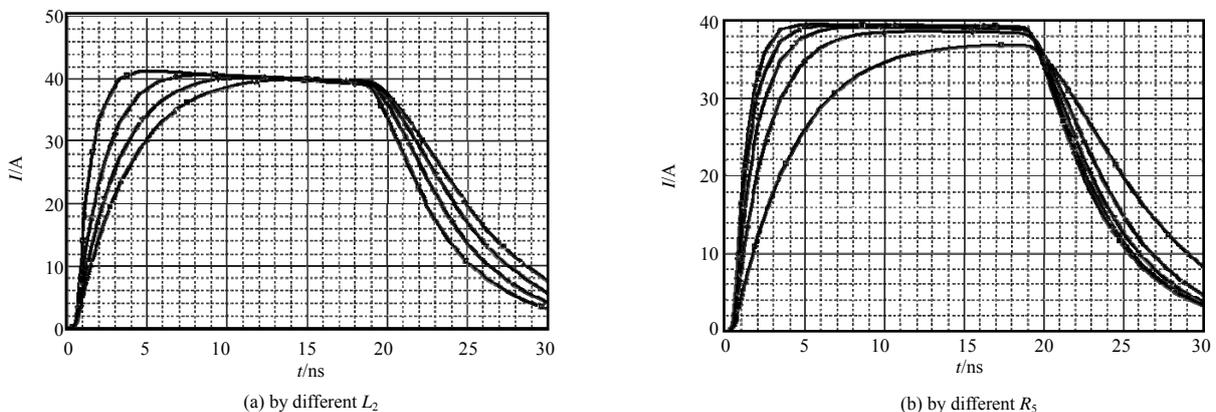


Fig.4 Circuit simulation waveforms
图 4 电路仿真波形

3 实验结果与分析

当负载为单只 75 W 脉冲半导体激光器时, 实验输出波形如下图所示。

图 5 为驱动电流波形图, 波形为负脉冲是由于在取样电阻 R_6 上获得的是负电压脉冲波形。脉冲前沿为 1.2 ns, 半高宽约 15 ns, 峰值电压 4.7 V, 取样电阻 $R_3=0.1 \Omega$, 故此波形反映的驱动电流峰值约为 47 A。

图 6 为驱动电流与输出激光脉冲的波形, 激光脉冲前沿 3 ns, 半高宽约 24 ns。重复多次实验, 测得激光脉冲的抖动小于 200 ps。由于在触发砷化镓光导开关时, 触发激光脉冲的前沿、能量和抖动等参数会直接影响开关的导通参数, 因此, 优化半导体激光器的输出激光脉冲参数具有非常重要的意义。

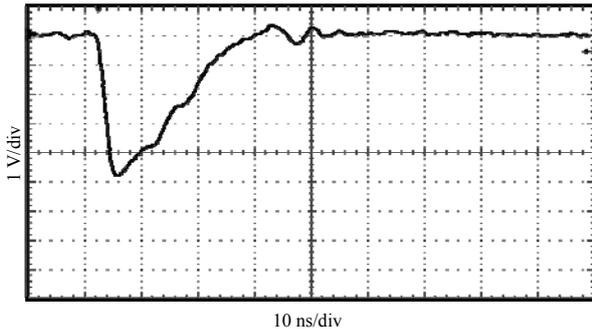


Fig.5 Drive current waveform
图 5 驱动电流波形

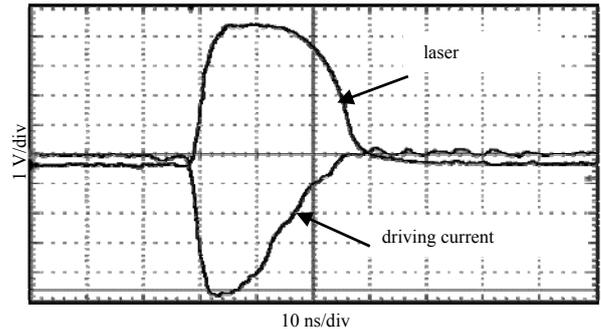


Fig.6 Drive current and output laser pulse waveforms
图 6 驱动电流与输出激光脉冲波形

由于激光脉冲的抖动在很大程度上由驱动电流决定, 因此需要在实验中测量驱动电流的抖动, 包括单个驱动电源的抖动和驱动电源之间的抖动。单个驱动电源的抖动通过与触发脉冲的时间差测量得到, 如图 7 所示, 目前使用的 2 个驱动电源的抖动分别为 130 ps 和 170 ps。2 个驱动电源的比较如图 8 所示, 2 个波形除了在幅度上略有差别外基本一致, 相互之间的抖动小于 100 ps。

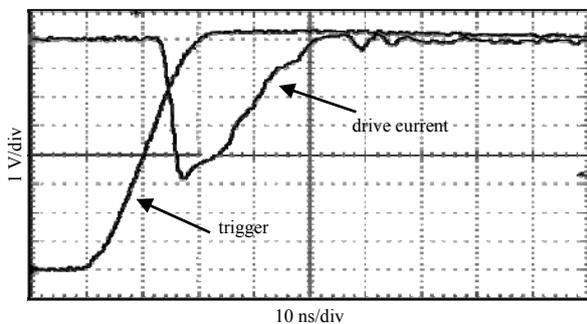


Fig.7 Drive current and trigger pulse waveforms
图 7 驱动电流与触发脉冲波形

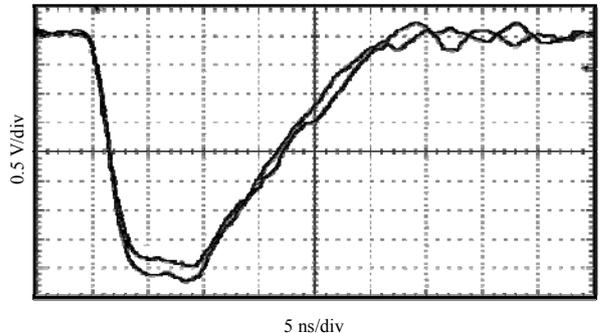


Fig.8 Comparison between two drivers
图 8 两个驱动电源的比较

4 结论

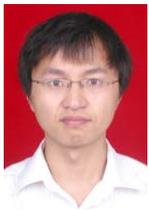
本设计利用高速 MOSFET 作为开关, 研制了一种新型大电流、窄脉宽的半导体激光器驱动电源, 为半导体激光器提供一个前沿快(1.2 ns)、脉宽窄(15 ns)、峰值电流大(72 A)、抖动小(<200 ps)的脉冲驱动电流, 驱动电流的参数可以根据需要进行调节。半导体激光器输出的激光脉冲功率可达 75 W, 上升前沿约 3 ns, 抖动小于 200 ps, 可稳定触发工作在非线性模式下的砷化镓光导开关。经过实验验证, 驱动电源运行稳定可靠, 各个驱动电源之间一致性良好。

参考文献:

- [1] 袁建强, 谢卫平, 周良骥, 等. 光导开关研究进展及其在脉冲功率技术中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 171-176. (YUAN Jianqiang, XIE Weiping, ZHOU Liangji, et al. Developments and applications of photoconductive semiconductor switches in pulsed power technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 171-176.)
- [2] Auston D H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon[J]. Applied Physics Letters, 1975, 26(3): 101-103.

- [3] Lee C H. Picosecond optoelectronic switching in GaAs[J]. Applied Physics Letters, 1977,30(2):84-86.
- [4] Nunnally W C. Critical component requirements for compact pulse power system architectures[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005,33(4):1262-1267.
- [5] Schoenberg J H,Burger J W,Tyo J S,et al. Ultra-wideband source using Gallium Arsenide photoconductive semiconductor switches[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997,25(2):327-334.
- [6] Li M,Sun F G,Wagoner G A,et al. Measurement and analysis of terahertz radiation from bulk semiconductors[J]. Applied Physics Letters, 1995,67(1):25-27.
- [7] Zutavern F J,Armijo J C,Cameron S M,et al. Optically activated switches for low jitter pulsed power applications[C]// Proc of 14th IEEE IPPC. Dallas,Texas,USA:[s.n.], 2003:591-594.
- [8] Malcolm B. Some future directions for repetitive pulsed power[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002,30(1):262-266.
- [9] Loubriel G M,Zutavern F J,Alan M,et al. Longevity of optically activated, high gain GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998,26(5):1393-1402.
- [10] Laszlo Balogh. Design and Application Guide for High Speed MOSFET Gate Drive Circuits[R]. Texas Instruments Incorporated, 2002:6-7,14.
- [11] 丁明军,于治国,贾兴. 基于功率 MOSFET 的慢升快降型高压脉冲信号源[J]. 信息与电子工程, 2009,7(6):578-580. (DING Mingjun,YU Zhiguo,JIA Xing. Power MOSFET based slow rising-fast falling high-voltage pulse signal source[J]. Information and Electronics Engineering, 2009,7(6):578-580.)
- [12] 马良柱,宋志强,刘统玉,等. 大功率半导体激光器驱动电路[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):441-443. (MANG Liangzhu, SONG Zhiqiang,LIU Tongyu,et al. Power driving circuit of Laser Diode[J]. Information and Electronics Engineering, 2010, 8(4):441-443.)

作者简介:



王 卫(1985-), 男, 重庆市人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向固态开关技术. email: sailorwangwei@126.com.

夏连胜(1970-), 男, 四川省乐山市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为强流二极管物理和高梯度加速器.

谌 怡(1984-), 男, 四川省广安市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为介质壁加速器相关技术.

刘 毅(1987-), 男, 成都市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为固态脉冲形成线技术.

石金水(1964-), 男, 四川省绵阳市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为直线感应加速器研制及其应用.

邓建军(1964-), 男, 江西省吉安市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为脉冲功率技术、高功率加速器等.