

## 纳秒半导体激光器的时间抖动和触发同步特性

刘如军<sup>1</sup>, 马 成<sup>1</sup>, 施 卫<sup>1\*</sup>, 惠兆宇<sup>2</sup>, 杭玉桦<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 应用物理系 陕西省超快光电技术与太赫兹科学重点实验室, 陕西 西安 710048;  
2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

**摘 要:** 纳秒半导体激光器 (LD) 的时间抖动和多个 LD 并联触发的时间同步性是各类超快光电过程及应用中的重要参数。研究了纳秒脉冲 LD(包括 LD 触发电路)的时间抖动特性以及 2 个 LD 的触发同步性。结果表明:纳秒 LD(包括 LD 触发电路)的时间抖动与其驱动电路的驱动电压有关,均在亚纳秒量级范围。单只纳秒 LD 的时间抖动为 72 ps,当 1 个 LD 驱动电路同时触发 2 个并联的纳秒 LD 时,每个纳秒 LD 的时间抖动增至约 200 ps,2 个并联纳秒 LD 的触发时间同步性近 300 ps。

**关键词:** 纳秒半导体激光器; 时间抖动; 触发同步

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200147

## Study on time jitter and trigger synchronization characteristics of ns pulsed laser diode

Liu Rujun<sup>1</sup>, Ma Cheng<sup>1</sup>, Shi Wei<sup>1\*</sup>, Hui Zhaoyu<sup>2</sup>, Hang Yuhua<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Ultra-fast Photovoltaic Technology and Terahertz Science in Shaanxi Province, Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;  
2. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

**Abstract:** The time jitter of nanosecond semiconductor laser (LD) and the time synchronization of multiple LD parallel triggers are important parameters in various ultra-fast photoelectric processes and applications. In this paper, the time jitter characteristics of nanosecond pulse LD (with driving circuits) and the synchronization of two nanosecond LD triggers were studied. The results show that the time jitter of nanosecond LD (with driving circuits) is related to the voltage of driving circuits and is in the range of sub-nanoseconds. The time jitter of a single nanosecond LD is 72 ps, when a driving power supply simultaneously triggers two nanoseconds LD in parallel, the time jitter of each nanosecond LD increases to about 200 ps, and the time synchronization of two parallel nanosecond LD is about 300 ps.

**Key words:** nanosecond semiconductor laser; time jitter; trigger synchronization

收稿日期:2020-03-26; 修订日期:2020-04-29

基金项目:国家自然科学基金(61427814); 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室资助项目(SKLIPR1812); 江苏省基础科技计划(BK20190187)

作者简介:刘如军(1979-),男,博士生,主要从事超快光电子器件方面的研究。Email: liurujun@xaut.edu.cn

通讯作者:施卫(1957-)男,教授,博士生导师,博士,主要从事超快光电子器件方面的研究。Email: swshi@mail.xaut.edu.cn

## 0 引言

纳秒脉冲半导体激光器 (LD) 因具有高效、体积小、可靠性高、转换效率高、工作寿命长、驱动方便和全固化被广泛用于超快光电科学与工程领域中的超快动态过程, 涉及科研、国防、医疗等领域<sup>[1-5]</sup>。纳秒 LD(包括驱动电路) 的性能参数是决定各项应用的关键。在精密测量距离、精度等方面, 很大程度取决于纳秒 LD 发射脉冲的质量。脉冲的上升时间或者下降时间决定了测量的精度, 功率决定最大可测量范围, 光斑尺寸决定最小可测量物体的尺寸等。在用纳秒 LD 触发超快光电器件、以及并联同步触发多个超快光电器件等应用中, 除了上述参数外, 纳秒 LD(包括驱动电路) 的时间抖动和并联触发同步性至关重要, 往往决定着整个装置的性能。例如, 中国工程物理研究院应用纳秒脉冲 LD 技术并联触发 15 路砷化镓光电导开关, 获得 328 kV 的纳秒电脉冲的装置等<sup>[6-8]</sup>。所以, 作为纳秒 LD(包括驱动电路) 技术的重要参数—触发时间抖动和并联触发同步性, 是评价纳秒 LD(包括驱动电路) 性能稳定性的重要参数, 也是纳秒 LD 在各类超快光电应用中不可回避的问题。然而, 纳秒 LD(包括驱动电路) 输出光脉冲波形的各项参数, 在产品标签中有明确说明, 但时间抖动和并联触发同步性却不明确, 也未见研究报道。从实际应用的角度来看, 区分纳秒 LD 驱动电路的时间抖动及纳秒 LD 自身的时间抖动意义不大, 因为纳秒 LD 和纳秒 LD 驱动电路作为纳秒半导体激光器的整体特性, 其时间抖动对实际应用才至关重要。此外, 纳秒 LD 脉冲输出特性与纳秒 LD 驱动电路也有关, 不同的驱动电路以及驱动电路与 LD 的阻抗匹配程度对纳秒 LD 脉冲输出有较大的影响。因此, 作为纳秒 LD 与其驱动电路一体的纳秒 LD 脉冲光源系统, 研究其时间抖动特性和同步特性更具有实际意义。文中侧重研究纳秒 LD 脉冲光源系统的时间抖动。由于纳秒 LD 的输出单脉冲能量有限, 通常在 1~2  $\mu\text{J}$  量级, 所以, 文中更关注纳秒 LD 在可承受 LD 驱动电路提供电压较高的情况下的时间抖动, 以明确纳秒 LD 输出最大光脉冲能量条件下的时间抖动。

通过研究纳秒 LD 脉冲光源系统输出光脉冲的重复效果就可以获得其抖动的相关信息。纳秒 LD 输

出光脉冲波形稳定性越高, 纳秒 LD 脉冲光源系统的时间抖动就越低。研究纳秒 LD 驱动电路电触发时刻与光脉冲开启时刻的时间差的统计结果可以定量表征其时间抖动, 其标准偏差反映纳秒 LD 脉冲光源系统从驱动电路电触发到光脉冲开启的时间间隔的不确定程度。

OSRAM 公司生产的 SPL PL90\_3 型纳秒 LD 和 DIRECTED ENERGY 公司生产的 PCO7110 50-15 型纳秒 LD 驱动模块具备良好的性能, 文中以此为例研究了纳秒 LD 脉冲光源系统(型号 SPL PL90\_3、PCO7110 50-15) 的触发时间抖动与并联触发同步特性。结果表明, 该纳秒 LD 脉冲光源系统(型号 SPL PL90\_3、PCO7110 50-15) 的时间抖动和并联触发同步性与其驱动电路的驱动电压有关, 均在亚纳秒量级范围。用同一纳秒 LD 驱动电路触发单只纳秒 LD 的时间抖动为 72 ps、同时触发 2 个并联的纳秒 LD, 每个纳秒 LD 的时间抖动增至约 200 ps, 2 个并联纳秒 LD 的时间同步性近 300 ps。

## 1 单只纳秒 LD 的时间抖动

纳秒 LD 脉冲光源系统由纳秒 LD(SPL PL90\_3)、LD 驱动模块(PCO-711050-15)、TTL 信号发生器(DG535)、15 V 稳压电源(JWY-30)、195 V 稳压电源(恒压源 4NIC-S600)5 个部分组成。其中纳秒 LD(型号 SPL PL90\_3) 的峰值功率为 75 W, 出光孔尺寸 200  $\mu\text{m}$ ×10  $\mu\text{m}$ , 中心波长 905 nm, 输出光的半高宽为 25.2 ns。纳秒 LD 脉冲光源系统时间抖动测试系统如图 1 所示。

纳秒 LD 输出光脉冲的时域波形用 ET-3500 型光电探测器(PIN) 和 LeCroy WAVERUNNER 64xi(600 MHz) 示波器记录, 图 2 是纳秒 LD 多次输出光脉冲波形的叠加图, 可见具有良好的稳定性和重复性。

单只纳秒 LD(包括驱动电路) 的时间抖动  $J$  为光脉冲延迟时间的标准偏差, 其测定值为光脉冲信号与触发 TTL 信号时间延迟的均方差, 计算时用测量值的样本标准差:

$$J = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 / n} \quad (1)$$

式中:  $J$  为纳秒 LD(包括驱动电路) 的时间抖动;  $n$  为

测量次数;  $T_i$  为光脉冲信号与触发 TTL 信号的延迟时间;  $\bar{t}$  为时间延迟的平均值。

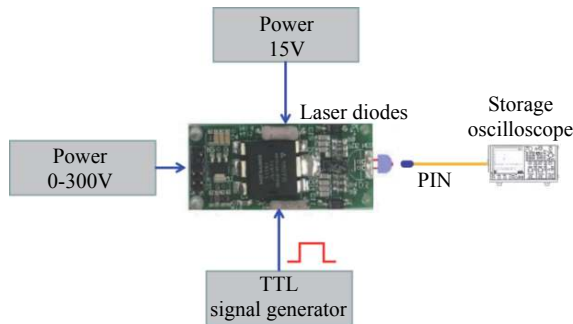


图 1 单只脉冲 LD 抖动测试系统

Fig.1 Test system of single laser diode

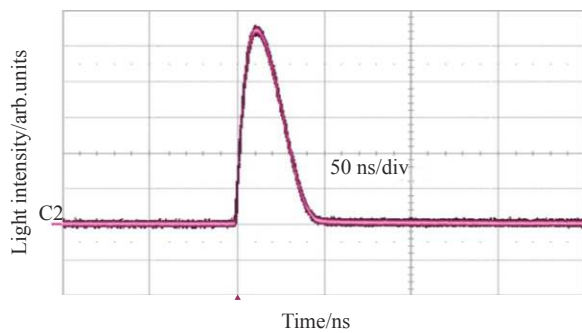


图 2 纳秒 LD 输出波形

Fig.2 Nanosecond LD output waveforms

为使纳秒 LD(型号 SPL PL90\_3) 输出尽可能高的光脉冲能量, 给 LD 驱动电路 (PCO7110 50-15) 施加最大直流输入电压 195 V, 此时触发纳秒 LD 输出光脉冲 200 次的重叠波形如图 3 所示。图 3 中蓝色为 TTL 信号, 红色为 PIN 探测的 LD 脉冲光信号, 示波器记录上升沿均值 7.2 ns, 脉宽均值 25.2 ns。用公式 (1) 可计算出, 单只纳秒 LD 的时间抖动为 72 ps。

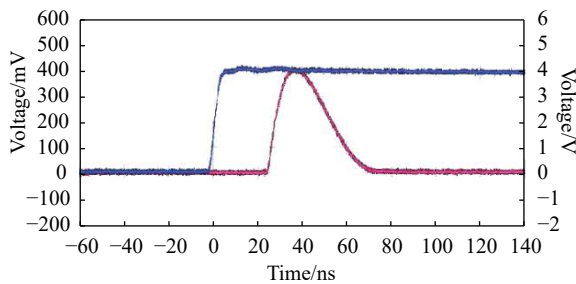


图 3 纳秒 LD 输出 200 次重叠波形

Fig.3 Nanosecond LD outputs 200 overlapped waveforms

## 2 并联纳秒 LD 同步性

将 2 个 SPL PL90\_3 型纳秒 LD 并联在同一个 PCO-711050-15 型 LD 驱动模块上, 用 2 个相同的 PIN 测试这 2 个并联纳秒 LD 的输出光脉冲的时域波形, 同时记录纳秒 LD 驱动模块的输出的电流信号。TTL 信号发生器用来控制 2 个并联纳秒 LD 的驱动模块 PCO-711050-15。并联纳秒 LD 光源的时间同步性测试系统如图 4 所示。

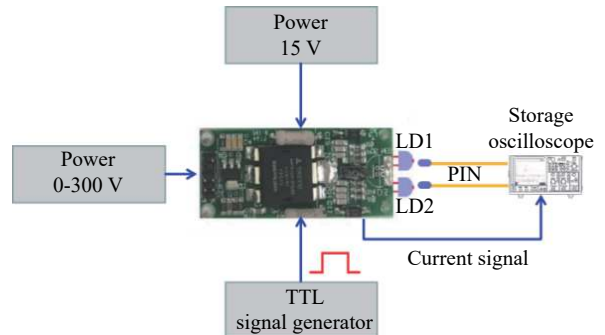


图 4 并联纳秒 LD 时间抖动测试系统

Fig.4 Parallel nanosecond LD time jitter test system

2 个并联纳秒 LD 的触发同步性显然与每个纳秒 LD 的时间抖动有关。当用一个驱动电路同时驱动 2 个相同型号的纳秒 LD 时, 由于每个 LD 的阻抗特性存在微小差异, 驱动电路加载在这 2 个 LD 的驱动电流并不相同, 这将导致每个 LD 的时间抖动会因实验条件的不同而变化。为此, 对图 4 所示的 2 个并联 LD 的时间同步性分别作三种测试: (1)1#LD 和 2#LD 并联触发条件下, 测试 1#LD 的时间抖动随驱动电压的变化关系; (2)1#LD 和 2#LD 并联触发条件下, 测试 2#LD 的时间抖动随驱动电压的变化关系; (3)1#LD 和 2#LD 并联触发条件下, 二者输出光脉冲的同步性随驱动电压的变化关系。下面分别介绍这三种测试。

(1) 1#LD 和 2#LD 并联触发条件下, 1#LD 的时间抖动随驱动电压的变化关系按照上述纳秒 LD 时间抖动的测试方法测试, 调整纳秒 LD 驱动电路的电压以步长 5 V 从 50 V 增加到 300 V, 在每一条件下触发 20 次, 通过测量驱动模块输出的电流信号与 1#LD 的时域波形的延迟, 根据公式 (1) 可计算出 1#LD 时间抖动随驱动电压的变化关系, 如图 5 所示。

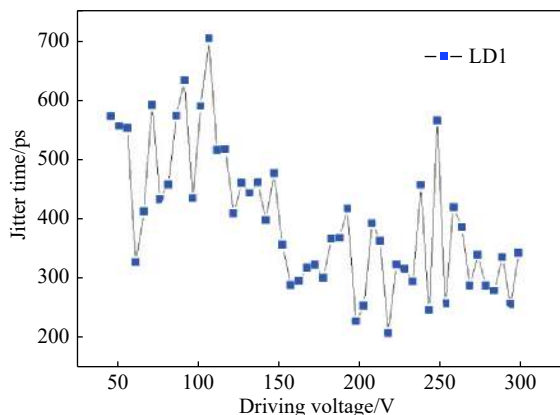


图 5 1#激光二极管抖动时间随驱动电压变化关系

Fig.5 Jitter time of LD1 under different driving voltages

从图 5 中可以看出,在 2 个 LD 并联触发条件下,1#LD 的时间抖动为数百 ps。1#LD 的时间抖动随驱动电路电压增大的变化总体上表现为减小的趋势。当驱动电压在 120~240 V 区间,时间抖动变化相对比较平稳;驱动电压低于 100 V 或高于 240 V,时间抖动变化比较大。驱动电压最小 50 V 时,抖动为 573 ps,驱动电压最高 300 V 时抖动为 345.8 ps,驱动电压为 220 V 时,时间抖动值最小,为 211.7 ps。

(2) 1#LD 和 2#LD 并联触发条件下,2#LD 的时间抖动随驱动电压的变化关系用同样的方法,可以测量出 2#LD 时间抖动随驱动电压的变化关系,如图 6 所示。

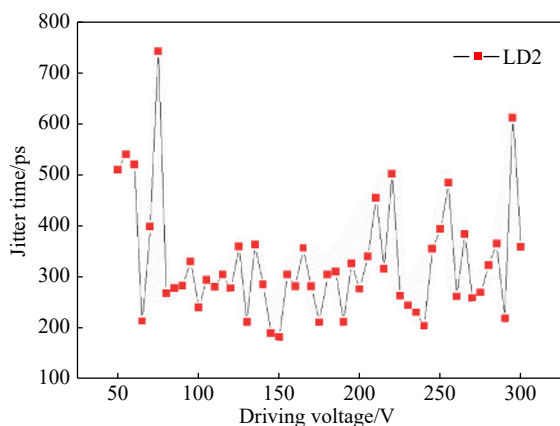


图 6 2#LD 抖动时间随驱动电压变化关系

Fig.6 Jitter time of LD2 under different driving voltages

由图 6 可见,驱动电压在 80~200 V 之间,时间抖动随驱动电压变化比较平稳,驱动电压低于 80 V 或高于 200 V,时间抖动随驱动电压变化比较大。驱动电压为 50 V 时,时间抖动 513.2 ps,驱动电压为 300 V

时,时间抖动为 361.8 ps。驱动电压为 150 V 时,时间抖动值最小,为 184.8 ps。

由以上结果可见:用 1 个驱动电路驱动 2 个并联 LD 的触发条件下,每个 LD 的时间抖动在数百皮秒量级,比单只 LD 的时间抖动大。这是由于型号相同的 2 个 LD,其阻抗特性并不完全相同,同 1 个驱动电路加载在每个 LD 上的驱动电流不相同,这种分流不均匀使每个 LD 输出光脉冲波形幅值不同,导致每个 LD 的时间抖动增大。

(3) 1#LD 和 2#LD 在并联触发条件下,二者输出光脉冲的同步性随驱动电压的变化关系是指第一个激光脉冲信号与第二个激光脉冲信号上升到最大值 50% 处延迟时间的标准偏差,其测定值为激光脉冲信号的时间延迟的均方差,计算时用测量值的样本标准差。并联纳秒脉冲 LD 同步性  $J_{LD}$  为:

$$J_{LD} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 / n} \quad (2)$$

其中,

$$T_i = |T_{i(LD1)} - T_{i(LD2)}| \quad (3)$$

式中:  $T_{i(LD1)}$  和  $T_{i(LD2)}$  分别是第  $i$  次同时触发 1#LD 和 2#LD 光脉冲上升到最大值 50% 处所对应的时间;  $T_i$  是  $T_{i(LD1)}$  与  $T_{i(LD2)}$  的时间差值;  $\bar{T}$  为  $T_i$  的平均值;  $n$  为测量次数。

1#和 2#并联 LD 的触发同步性测试原理如图 4 所示。用 1 个 LD 驱动电路同时触发 2 个相同型号的 LD,当驱动电压为 300 V 时,这 2 个 LD 输出光脉冲的波形见图 7。由图 7 可见,1#LD 和 2#LD 输出的光脉冲上升沿基本重合,上升沿 7.4 ns。

为获得并联 LD 的时间同步性随驱动电压的变化关系,使驱动电压以步长 5 V 从 50 V 增加到 300 V,在每一条件下触发 20 次,通过测量 1#LD 与 2#LD 时域波形上升沿之间的延迟,根据公式 (2),可计算出 2 个并联纳秒 LD 的时间同步性,如图 8 所示。

显然,驱动电压在 105~230 V 之间,2 个 LD 的时间同步性随驱动电压变化比较平稳;驱动电压低于 100 V 或高于 230 V,2 个 LD 的时间同步性随驱动电压变化比较大。当驱动电压为 50 V 时,时间同步性 333.5 ps,驱动电压 300 V 时,时间同步性为 461.1 ps。当驱动电压为 235 V 时,时间同步性最小,为 272.2 ps。

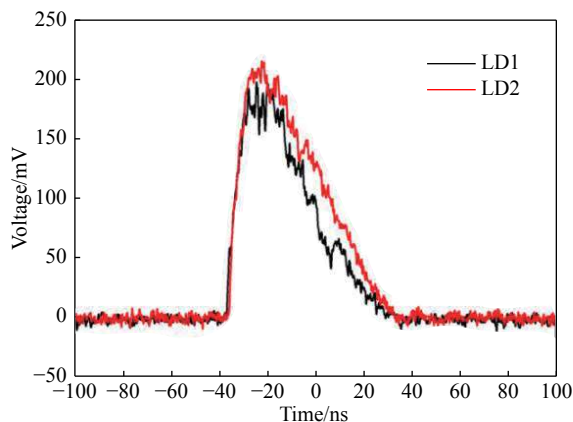


图 7 驱动电压 300 V 时 2 个脉冲 LD 输出光脉冲波形

Fig.7 Waveform of the 2 pulses LD with driving voltage of 300 V

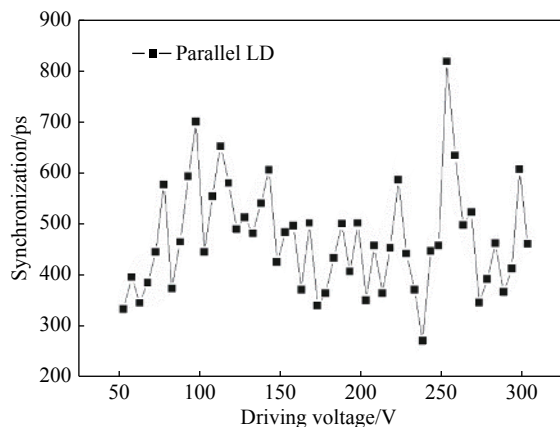


图 8 并联纳秒 LD 时间同步性随驱动电压变化关系

Fig.8 Synchronization of parallel nanosecond LD under different driving voltages

### 3 结 论

文中研究了纳秒 LD 脉冲光源系统 (型号 SPL PL90\_3、PCO7110 50-15) 的时间抖动和并联触发同步性, 结果表明: 纳秒 LD 脉冲光源系统的时间抖动与其驱动电源的驱动电压有关, 均在亚纳秒量级范围。单只纳秒 LD(SPL PL90\_3、PCO-711050-15) 的触发时间抖动为 72 ps; 当 1 个驱动电路同时触发 2 个并联的纳秒 LD 时, 每个纳秒 LD 的时间抖动增至约 200 ps, 2 个并联纳秒 LD 的触发时间同步性近 300 ps。由此可见, 对不同型号的纳秒 LD 及相应的 LD 驱动电路,

为了减小单只纳秒 LD 脉冲光源系统的时间抖动, 可以通过文中的实验测试方法得到单只 LD 驱动电路的最佳驱动电压; 对于多路 LD 并联触发、且同步性是重要参数的应用场景, 也需要首先使各个纳秒 LD 处于时间抖动最小的工作条件, 并同时考虑各个纳秒 LD 的驱动方式是由一个 LD 驱动电路同时驱动多个纳秒 LD、还是多个 LD 驱动电路分别驱动每个纳秒 LD 的情况, 然后得出最佳多路纳秒 LD 同步触发时的最佳结果。

### 参考文献:

- [1] Shen Y, Liu Y, Wang W, et al. Anode failure mechanism of GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by laser diode [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(10): 4584-4587.
- [2] Zhang T, Liu K, Gao S, et al. Characteristics of GaAs PCSS triggered by 1  $\mu$ J laser diode [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2015, 22(4): 1991-1996.
- [3] Shi Wei, Hao Nana, Fu Zhanglong, et al. Large current GaAs PCSS triggered by a laser diode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(21): 2158-2161.
- [4] Shi Wei, Wang Shaoqiang, Ma Cheng, et al. Generation of an ultra-short electrical pulse with width shorter than the excitation laser [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27577.
- [5] Shi Wei, Jiang Huan, Li Mengxia, et al. Investigation of electric field threshold of GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by 1.6  $\mu$ J laser diode [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(4): 042108.
- [6] Wang Wei, Xia Liansheng, Chen Yi, et al. Research on synchronization of 15 parallel high gain photoconductive semiconductor switches triggered by high power pulse laser diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 022108.
- [7] Shi Wei, Ji Yu, Xu Ming, et al. Comparison on the synchronization of two parallel GaAs photoconductive semiconductor switches excited by laser diodes [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38(9): 1274-1277.
- [8] Wang Langning, Jia Yongsheng, Liu Jinliang. Photoconductive semiconductor switch-based triggering with 1 ns jitter for trigatron [J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2018, 3: 256-260.