

冲击电流驱动下半导体激光器的快速响应研究

邓 丽, 张 涛, 许 博, 李亭亭
(四川大学制造科学与工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 基于半导体激光器的单模速率方程, 采用典型参数对其进行建模仿真, 仿真结果表明: 半导体激光器在初期的光子受激辐射速率随着注入电流的增大而增加, 上升时间随着注入电流的增大而减少。但对于固定功率限制范围的半导体激光器, 不能通过直接增大注入电流来减少上升时间, 考虑到半导体激光器的发热问题, 提出了一种在正常脉冲发光电流前端加入冲击电流来减少半导体激光器发射脉冲上升时间的方法, 保证了半导体激光器的稳定输出。通过仿真对该方法进行验证, 并对型号为 PLTB450B 半导体激光器进行了测试。仿真结果与测试结果均表明: 通过加入冲击电流的方法, 可以大大减少固定功率的半导体激光器发射脉冲的上升时间。

关键词: 半导体激光器; 单模速率方程; 受激辐射速率; 上升时间; 冲击电流

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.02.010

Fast response of semiconductor laser driven by impulse current

DENG Li, ZHANG Tao, XU Bo, LI Ting-ting

(Manufacture Science and Engineering College, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on single-mode rate equations of semiconductor laser, the typical parameters are used to model and simulate the semiconductor laser. The simulation results show that the initial photon stimulated emission rate of the semiconductor laser increases with the increase of the injection current, the rise time reduces with the increase of injection current. But for a fixed power limited semiconductor laser, the rise time can't be reduced by directly increasing the injection current. Considering the heating problem of semiconductor laser, a method of adding an impulse current in the front of the normal luminous pulse current to reduce the rise time of the transmitted pulse of the semiconductor laser is proposed, which ensures the stable output of the semiconductor laser. The method is verified by simulation, and the PLTB450B semiconductor laser is tested. The simulation results and test results show that the rise time of the transmitted pulse of the fixed power semiconductor laser can be greatly reduced by adding impulse current.

Key words: semiconductor laser; single-mode rate equation; stimulated emission rate; rise time; impulse current

1 引 言

半导体激光器作为一种精密的光电器件, 对电流变化的承受能力较差, 过大的电流变化会影响半导体激光器的性能, 情况严重时直接损坏半导体激光器, 所以半导体激光器工作时需要稳定

的驱动电流。另一方面, 半导体激光器长时间工作时的发热也会降低其性能^[1]。利用激光脉冲进行测距时, 当脉冲宽度一定时, 脉冲的上升沿越宽, 使有效脉冲所占比例越小, 则引入的时间误差就会越大, 测距误差也会随着增大。为保证半导

作者简介: 邓 丽(1992 -), 女, 硕士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: 826908128@qq.com

通讯作者: 张 涛(1967 -), 男, 硕士, 副教授, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: nic6700@scu.edu.cn

收稿日期: 2017-06-14; **修订日期:** 2017-08-15

体激光器输出稳定可靠,需要尽可能减小半导体激光器发射脉冲的上升时间。因此需要寻找合适的电流驱动半导体激光器产生脉冲光信号,减少激光脉冲信号的上升时间,加快半导体激光器的响应时间。王守武^[2]根据脉冲作用期间载流子的速率方程推导了双异质结激光器电光延迟时间与注入脉冲电流幅度和上升前沿的关系表达式,并得到双异质结激光器的电光延迟时间随注入脉冲电流的幅度增加而缩短的结论。然而他并没有分析半导体激光器输出激光脉冲信号的上升时间与输入电流直接的关系,也没有提到如何通过控制半导体激光器驱动电流来减少上升时间,提高半导体激光器的响应时间。段慧^[3]建立了基于速率方程的激光器的 SIMULINK 模型,数值模拟分析了分布反馈激光器载流子、光子的输出响应和小信号调制特性等。本文以半导体激光器的单模速率方程为建模基础,提出了一种通过在脉冲发光电流的前段加入合适宽度与高度的冲击电流来减少半导体激光器输出激光脉冲的上升时间,利用 SIMULINK 对该方法进行仿真验证成功后,并将该方法用于 PLTB450B 半导体激光器中,所得到的实验结果与仿真结果一致。

2 半导体激光器单模速率方程的分析及仿真

2.1 半导体激光器单模速率方程

半导体激光器内部工作原理:给半导体激光器加上一个大于阈值电流的脉冲电流,随着脉冲电流的注入,有源区内的载流子数逐渐上升,但光子数几乎保持不变。当有源区内的载流子数达到激光器受激辐射的阈值载流子数时,有源区内的载流子开始发生受激辐射产生光子,此时光子和载流子数量都呈现上升模式,但载流子增长速率较之前降低。经过一段时间后,由注入电流产生的载流子数和受激辐射产生的光子数达到最终的平衡状态。注入的脉冲电流的大小不影响平衡时的载流子的数量,但能决定平衡时的光子数量,注入的脉冲电流越大,平衡状态下产生的光子数越多。

半导体激光器有源区内的光子与电子之间的相互作用可以一组速率方程来描述,半导体激光器电光特性的单模速率方程的一般形式为:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_n} - g_0 \frac{N - N_t}{1 + \varepsilon S} \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma g_0 \frac{(N - N_t)S}{1 + \varepsilon S} - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta N}{\tau_n} \quad (2)$$

其中, N 表示半导体激光器有源区载流子密度; S 表示半导体激光器有源区光子密度; I 是注入电流; q 是电子电荷; V 是有源区体积; τ_n 是载流子寿命; τ_p 是光子寿命; g_0 是光增益常数; N_t 是透明载流子密度; Γ 是光限制因子; β 是自发辐射系数。

公式(1)左边表示载流子变化速率,右边第一项表示由注入电流引起的载流子增加的速率,第二项表示由于自发辐射引起的载流子减少的速率,第三项表示由于受激辐射引起的载流子减少的速率。公式(2)左边表示光子变化速率,右边第一项表示由于受激辐射引起的光子增加的速率,第二项表示由于光子损耗引起的光子减少的速率,第三项表示由于自发辐射引起的光子数增加的速率。

2.2 半导体激光器单模速率方程仿真

根据半导体激光器的单模速率方程,利用 MATLAB 仿真系统中的可视化仿真工具 Simulink 实现动态系统建模、仿真和分析。该模型各个模块的功能与半导体激光器单模速率方程的每一项相对应,其中包括自发辐射、受激辐射以及损耗等,通过增益、加减、微分、求倒以及乘积等模块建立该模型,并在光子数终端连接示波器,快速方便地得到不同仿真条件下的瞬态响应。

采用半导体激光器典型参数^[4]对单模速率方程进行建模仿真:有源区体积 V 为 $9.0 \times 10^{-11} \text{ cm}^3$,载流子寿命 τ_n 为 $3.0 \times 10^{-9} \text{ s}$,光子寿命 τ_p 为 $1.0 \times 10^{12} \text{ s}$,光增益常数 g_0 为 $3.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}/\text{s}$,透明载流子密度 N_t 为 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,光限制因子 Γ 为 0.44,自发辐射系数 β 为 4.0×10^4 。建立如图 1 所示的 simulink 仿真模型,注入电流从 20 mA 增大到 100 mA,得到的光子密度随时间变化的波形如图 2 所示。

根据不同注入电流情况下光子密度随时间变化的波形,求出不同注入电流情况下平衡时的光子密度、上升时间,见表 1。根据表 1 的数据可知光子密度随着注入电流的增加线性上升,上升时间也随注入电流增加,但当注入电流增加到一定程度之后,上升时间几乎保持不变。再根据表 1 中平衡时的光子密度和上升时间计算出光子受激

辐射的平均速率,并绘制出如图 3 所示的光子受激辐射平均速率与注入电流的关系,可直观观察到,给半导体激光器注入大于阈值电流的脉冲电流,光子受激辐射平均速率随注入脉冲电流的增加而增大。

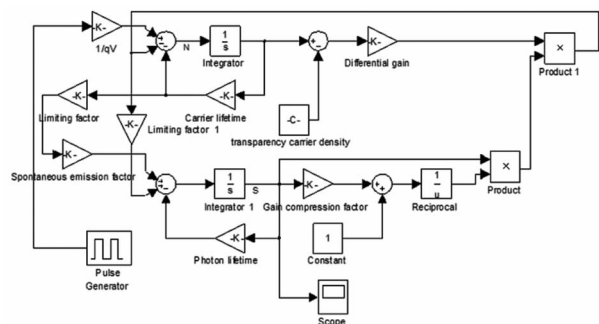


图 1 半导体激光器单模速率方程仿真模型

Fig. 1 Simulation model of single-mode rate equation for semiconductor lasers

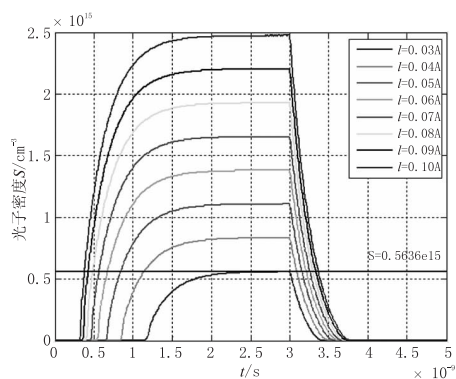


图 2 不同注入电流情况下光子密度随时间变化的波形

Fig. 2 Waveform changes of photon density with time under different injection current

表 1 不同注入电流情况下的仿真结果

Tab. 1 Simulation results under different injection currents

注入电流 I/A	平衡时的光子 密度 S/cm^{-3}	上升时间 t_r/s	光子受激辐射平均 速率 $v/(cm^{-3} \cdot s^{-1})$
0.03	0.5636×10^{15}	0.6181×10^{-9}	0.9118×10^{24}
0.04	0.8376×10^{15}	0.6295×10^{-9}	1.3305×10^{24}
0.05	1.1113×10^{15}	0.6344×10^{-9}	1.7517×10^{24}
0.06	1.3849×10^{15}	0.6413×10^{-9}	2.1595×10^{24}
0.07	1.6584×10^{15}	0.6471×10^{-9}	2.5628×10^{24}
0.08	1.9319×10^{15}	0.6488×10^{-9}	2.9776×10^{24}
0.09	2.2055×10^{15}	0.6469×10^{-9}	3.4093×10^{24}
0.10	2.4787×10^{15}	0.6496×10^{-9}	3.8157×10^{24}

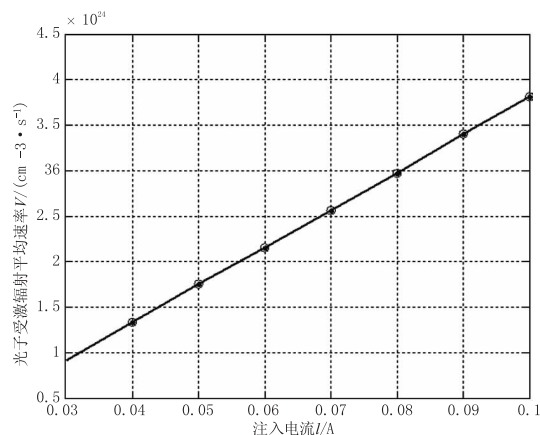


图 3 光子受激辐射平均速率与注入电流的关系

Fig. 3 The relation between average rate of photon stimulated radiation and injection current

3 冲击电流驱动下半导体激光器的快速响应研究

不同脉冲电流注入情况下,半导体激光器内部有源区载流子的产生速率和光子受激辐射速率是不同的。阈值以上的注入脉冲电流越大,半导体内部有源区载流子的产生速率越快,从而光子受激辐射速率也越快。但对于一固定输出功率的激光器,其正常脉冲发光电流是固定的,可以考虑在正常脉冲发光电流的前端加入一个合适宽度和高度的冲击电流,从而加快半导体激光器内部有源区光子受激辐射速率,减少上升时间,以实现快速响应。

将宽度为 12 ns,幅值为 0.06 A 的脉冲电流与宽度为 3 ns,幅值为 0.1 A 的脉冲的脉冲电流叠加在一起,驱动上述的半导体激光器,并与直接用宽度为 12 ns,幅值为 0.06 A 的脉冲电流驱动半导体激光器对比,通过建模仿真得到如图 4 所示的不同注入电流情况下半导体激光器的响应波形。

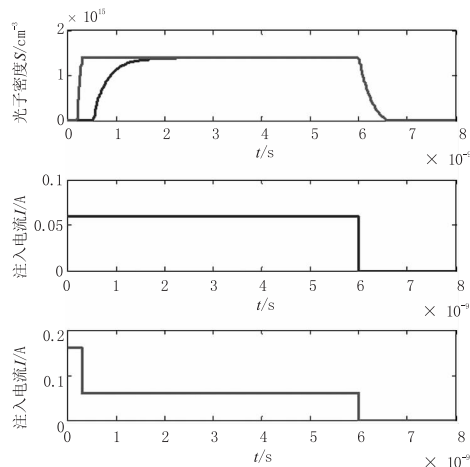


图 4 不同注入电流情况下半导体激光器的响应

Fig. 4 Response of semiconductor lasers under different injection currents

通过图4所示波形,计算出两种电流条件下驱动半导体激光器平衡时的光子密度、上升时间和光子受激辐射平均复合速率,见表2。

表2 两种电流条件下的仿真结果

Tab.2 Simulation results under two current conditions

注入电流	平衡时的光子密度 S/cm^{-3}	上升时间 tr/s	光子受激辐射平均速率
宽度为 12 ns, 幅值为 0.06 A	1.3852×10^{15}	6.3996×10^{-10}	2.1645×10^{24}
宽度为 12 ns, 幅值为 0.06 A	1.3852×10^{15}	8.2552×10^{-11}	1.6779×10^{25}
+ 宽度为 3 ns, 幅值为 0.1 A			

通过表2的数据可以发现,给驱动半导体激光器的正常发光脉冲电流前段加入一个合适高度与宽度的冲击电流,半导体激光器平衡时的光子密度保持不变,但是上升时间显著减少。因此可以加入冲击电流的方法来增加有源区内光子受激辐射平均复合速率,加快半导体激光器的响应。

4 实验验证

选用欧司朗公司型号为 PLTB450B 的半导体激光器进行实验验证。该半导体激光器的阈值电流为 0.2 A,工作电流为 1.2 A。

实验所用的电路结构^[6-7]为基于运算放大器的电流负反馈结构。运算放大器、三极管、采样电阻组成电流反馈放大器,其工作原理为,控制器控制 DA 转换器产生一个脉冲电压激励信号,进而控制运算放大器和三极管产生一个脉冲电流驱动半导体激光器。图5为电路结构原理图。

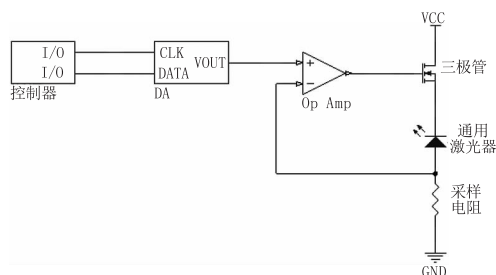


图5 电路结构原理图

Fig.5 Schematic diagram of circuit structure

图6中通道1为注入的脉冲电流的波形,通道3为脉冲激光波形,通道4为电流同步信号波形。由图6可以看出脉冲电流驱动激光器产生的激光波形的上升非常缓慢,差不多 $6 \mu\text{s}$ 。

图7中通道1为注入的带有冲击电流的脉冲电流波形,通道3为脉冲激光波形,通道4为电流同步

信号波形。脉冲电流由冲击电流和脉冲发光电流两部分组成,图7中的通道1的较高脉冲部分为冲击电流,幅度较低的脉冲部分为脉冲发光电流。由控制器控制 DA 产生一个冲击电压,该电压控制后端的电流反馈放大器产生持续时间为 800 ns 冲击电流,电流高度为正常脉冲发光电流的 2.2 倍,在 800 ns 后,将冲击电压的幅度降至正常脉冲发光控制电压的幅度,控制后端的电流反馈放大器产生正常脉冲电流。应用该方法后可以发现,激光器发光的上升沿明显变快。

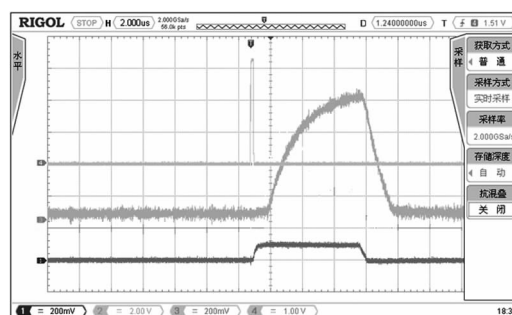


图6 正常脉冲发光电流激励产生的激光波形

Fig.6 Laser waveform generated by normal pulsed glow current

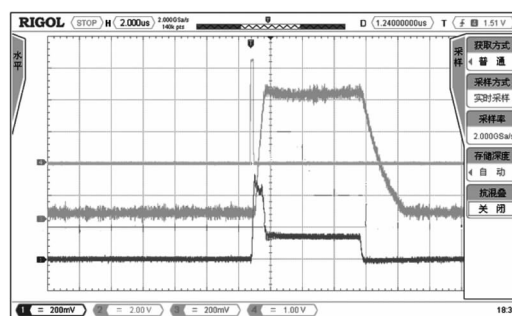


图7 带冲击电流的脉冲电流激励产生的激光波形

Fig.7 Laser waveform generated by pulsed current excitation with impulse current

5 结论

本文基于半导体激光器的单模速率方程建模仿真,分析了半导体激光器平衡时的光子密度、上升时间和光子受激辐射平均速率的关系,提出了给半导体激光器正常脉冲发光脉冲电流前段加入一个合适高度与宽度的冲击电流来提高半导体激光器内部有源区内光子受激辐射速率,从而减少了半导体激光器的上升时间,加快了半导体激光器的响应速率。本文的研究结果对半导体激光器测距中减小测量误差具有重要的意义。

参考文献:

- [1] KONG Qingnan. STM32-based drive circuit designed for semiconductor laser diodes[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
孔庆楠. 基于 STM32 的半导体激光器驱动电路的设计[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [2] WANG Shouwu, ZHAO Liqing, ZHANG Cunshan, et al. Relation between electro-optic delay time and injection current of DH laser and its measurement[J]. Journal of Semiconductors, 1982, 3(2): 113 – 119. (in Chinese)
王守武, 赵礼庆, 张存善, 等. DH 激光器电光延迟时间与注入电流的关系及其测量[J]. 半导体学报, 1982, 3(2): 113 – 119.
- [3] DUAN Hui. The response characteristics of semiconductor lasers based on rate equations[D]. Qinhuangdao: Yanshan University. 2010. (in Chinese)
段慧. 基于速率方程的半导体激光器响应特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- [4] P K Lau. Gb/s optical fiber transmission system power penalty LD parameters[J]. Journal of light wave technology, 1997, 30(9): 1663 – 1668.
- [5] JIN Wendong, LI Yingxin, YANG Chunji, et al. Power control technology of dual-channel semiconductor laser[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(4): 273 – 277. (in Chinese)
金文东, 李迎新, 杨基春, 等. 双通道半导体激光电源控制技术[J]. 激光与红外, 2015, 45(4): 273 – 277.
- [6] ZHANG Xiongxing, FAN Yan. Research and design of medium power laser driver circuit[J]. Foreign electronic measurement technology, 2017, 2(2): 59 – 62. (in Chinese)
张雄星, 范源. 中功率激光器驱动电路的研究与设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 2(2): 59 – 62.