基于 PSpice 的半导体激光高频调制系统设计

王卫鹏, 徐英添, 邹永刚, 徐 莉, 张 贺, 金 亮, 李 洋, 赵 鑫, 马晓辉 (长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室,长春 130022)

摘 要: 为了实现高频率的调制激光输出,设计了一种驱动系统由信号放大、电流调制、过流保护和具有 慢启动功能的直流偏置电路高度集成的半导体激光高频调制系统。此系统采用了结构简单的直接调制方式,运 用线性调频的高频信号去控制半导体激光器发射激光的强度,从而实现高频调制。在运用 OrCAD/PSpice 对高 频调制驱动系统进行模拟仿真的基础上,最终研制出的半导体激光高频调制系统实现了频率为 40.02 MHz、 直流偏置为 493.326 mA、正弦波调制电流峰峰值为 850 mA 的高频调制输出,调制激光平均功率为 300 mW。

关键词: 半导体激光器; 调制; 直流偏置; PSpice
 中图分类号: TN242, TN248, 4
 文献标志码: A doi:10.11884/HPLPB201729.170106

半导体激光器具有体积小、可靠性高、可直接调制等特点,它的发展一开始就与激光通信、激光雷达等高新技术 联系在一起^[3]。随着激光雷达、激光通信等技术的迅速发展,利用直接调制方式设计的高功率半导体激光高频 调制系统扮演的角色也越来越重要^[46]。由于激光脉冲的宽度、频率和形状等参数会影响半导体激光高频调制 系统的精度,而激光脉冲的参数由半导体激光器的驱动电脉冲决定^[7],因此设计出性能优良的高频调制驱动系 统就有了非常重要的现实意义^[8]。目前,半导体激光直接调制驱动系统结构复杂、输出的调制电流低、频率通 常在 10~20 MHz^[9-10]。本文依据半导体激光器高频调制特性设计了一种由信号放大电路、电流调制电路、过 流保护电路、具有慢启动功能的直流偏置电路高度集成的半导体激光高频调制系统,最终研制出的半导体激光 高频调制系统实现了频率为 40.02 MHz、直流偏置为 493.326 mA、正弦波调制电流峰峰值为 850 mA 的高频 调制输出,调制激光平均功率为 300 mW。

1 半导体激光高频调制驱动系统设计

1.1 半导体激光高频调制驱动系统设计方案

半导体激光高频调制系统的发射机由激光器及其驱动系统组成,本文所设计的半导体激光高频调制驱动系统框图如图1所示。

此半导体激光高频调制驱动系统由具有慢启动功能 的直流偏置、信号放大、电流调制、过流保护电路构成。 驱动系统的工作原理为:信号发生器发出的调制信号利 用信号放大电路放大之后,通过高速运算放大器 OPA2677将其与具有软启动功能的直流偏置电路输出 的直流信号进行叠加,从而得到一个带有直流偏置的调 制信号,带有直流偏置的调制信号作为射频大功率三极 管 MRF240的基极输入信号,使得三极管的发射极输出 带有直流偏置的调制电流,调制电流经过限流保护电路



drive system of semiconductor laser

图 1 半导体激光高频调制驱动系统框图

之后输入到带有防止反向电流击穿措施的高功率半导体激光器中,从而实现高频调制。

1.2 半导体激光高频调制驱动系统仿真

半导体激光高频调制驱动系统原理如图 2 所示。

* 收稿日期:2017-04-05; 修订日期:2017-08-10 基金项目:吉林省重大科技成果转化项目(20130303017GX);吉林省重点科学技术研究项目(20140204028GX) 作者简介:王卫鹏(1991一),男,硕士研究生,主要从事半导体激光高频调制方面的研究;1621517472@qq.com。 通信作者:徐英添(1986—),男,博士,助理研究员,硕士生导师,主要从事光电子技术及应用方面研究;xuyingtian-007@163.com。



Fig. 2 Schematic diagram of diode laser with high frequency modulation 图 2 半导体激光高频调制驱动系统原理图

方波信号为宽频信号,其作为高频调制驱动系统的调制信号时,驱动系统输出的调制电流波形容易产生畸 变,从而导致半导体激光器输出的激光波形产生畸变,使整个高频调制系统输出的激光信号失真;方波信号的 分辨率是单一的,在传输过程中容易受到干扰,相比于方波信号而言正弦波信号能够通过控制器自由切分以获 得所需的分辨率,它的抗干扰性强;而且当驱动系统输出的调制电流幅值和直流偏置大小相同时,正弦波调制 电流相对于方波调制电流来说,它的调制电流峰峰值有所提高(即调制深度提高),使得输出激光的峰峰值提 高。适当地提高激光峰峰值会降低激光调制系统的误码率,所以最终选择正弦波作为高频调制系统的输入信 号,从而提升系统工作性能。

当幅值为 5 V、频率为 40 MHz 的正弦波调制信号输入到如图 2 所示的半导体激光高频调制驱动系统中, 直流电压为 10 V时,驱动系统实现的仿真结果如图 3 所示,电压幅值为 5 V,频率为 40 MHz。当如图 3 所示 的正弦波信号输入到高频调制驱动系统中,放大之后的调制信号如图 4 所示,电压的幅值为 10 V,频率为 40 MHz。



正弦波信号与信号放大后波形对比图如图 5 所示。

当如图 3 所示的正弦波信号输入到如图 2 所示的高频调制驱动系统中,直流电压为 10 V 时,驱动系统输出的调制电流如图 6 所示,驱动系统输出的调制电流为:幅值为 1.5 A,直流偏置为 1 A,频率为 40 MHz。

当正弦波调制信号输入到高频调制驱动系统中,电流调制强度为 0.5 A,驱动系统输出的直流偏置的大小 可以通过改变直流偏置电压来调节,直流偏置不同时驱动系统输出的调制电流如图 7 所示。

当正弦波作为高频调制驱动系统的调制信号时,直流偏置为1A,驱动系统输出的电流调制强度可以通过



改变调制信号电压幅值或者改变信号放大电路的放大倍数来调节,电流调制强度不同时驱动系统输出的调制 电流如图 8 所示。



本文所设计的高频调制驱动系统输出的直流偏置的 大小和调制电流的峰峰值在1A内连续可调,这样可以 提高驱动系统输出电流的灵活性,在实验过程中电流调 制强度与直流偏置的大小可以在适当的范围内调节以进 行搭配使用,可以为实验提供方便。如图9所示,直流偏 置为475 mA,电流调制强度为475 mA(即峰峰值为950 mA)。

频率为 45 MHz、幅值为 5 V 的正弦波信号输入到 高频调制驱动系统时,图 10(a)所示为 45 MHz 放大之 后的正弦波信号,图 10(b)所示为 45 MHz 正弦波调制 电流。

频率为 50 MHz、幅值为 5 V 的正弦波信号输入到



图 9 直流偏置与电流调制强度都为 475 mA 的调制电流

高频调制驱动系统时,图11(a)所示为50 MHz放大之后的正弦波信号,图11(b)所示为50 MHz正弦波调制 电流。

从图 10 和图 11 中可以看出,当正弦波调制信号达到 45,50 MHz 时,调制电流波形随着放大后的正弦波 调制信号波形的畸变而畸变。主要原因是当运算放大器对信号放大幅度相同,而信号频率增大时,信号放大电 路中高速运算放大器的响应频率达不到信号的频率,从而引起放大后的信号产生畸变。因为这个原因,本文最 终选用了 40 MHz 的正弦波信号作为调制信号。







Fig. 11 50 MHz sine-wave modulation signal after amplification and modulation current waveform 图 11 50 MHz 放大之后的正弦波调制信号与调制电流波形

1.3 高频调制驱动中的分布参数对调制电流的影响

半导体激光高频调制驱动系统中的分布参数严重影响高频调制电流的质量。因此本文分析了驱动系统中 串联电阻 R、串联电感 L、寄生电容 C 对以正弦波为调制信号的半导体激光高频调制驱动系统输出的调制电流 的影响。

驱动系统中与 LD 串联的分布电阻 R 的值分别为 2,4,6 Ω 时,对调制电流的影响如图 12 所示。从图中能够看出,调制电流的幅值和峰峰值随着串联电阻 R 的增大而减小,调制电流的峰值位置不变。

驱动系统中与 LD 串联的电感 L 的值分别为 50,80,100 nH 时,对调制电流的影响如图 13 所示。从图中 能够看出,随着分布电感 L 的增大,调制电流的峰值位置右移,调制电流的幅值和峰峰值减小。

驱动系统中与 LD 并联的分布电容 C 的值为 50,100,150 nF 时,对调制电流的影响如图 14 所示。从图中 能够看出随着寄生电容 C 的增大,调制电流的脉冲宽度增大,调制电流的幅值和峰峰值减小,其峰值右移。



因此通过以上分析发现驱动系统在设计过程中尽可能地减小分布参数,能够有效提升半导体激光高频调制驱动系统性能。

2 半导体激光高频调制系统实验结果与分析

实验装置搭好之后,Aglient 33250A 信号发生器发出的频率为 100 kHz, 500 kHz, 39.43 MHz, 39.69 MHz, 40.02 MHz 的正弦波信号分别输入到半导体激光高频调制系统,吉时利 2231A 可编程直流电源作为系统的直流电源,光源采用了 980 nm 带有辅助热沉的 C-Mount 封装形式的半导体激光器,其连续输出功率可达 3 W,对系统进行实验测试。

依据半导体激光器的 *I-V* 特性可知,当激光器中输入直流且使它接近或处于发光状态时,激光器两端的电 压大小几乎不随着输入电流的变化而变化,近似处于恒定状态。此时就不可以依据激光器两端的驱动电压信 号来观察调制电流的有无及其变化幅度,所以系统中驱动装置的测试使用直接测试的方法。负载使用了 3 W 的 980 nm 半导体激光器,为更方便地测量流过负载的电流情况,测试时使用阻值为 1 Ω 的取样电阻串联在激 光器的电流输入端,测量其两端电压水平并以此作为测量电流的标定。

经过合理的设计,本文最终实现了调制频率为 40.02 MHz 的高功率半导体激光高频调制。用于探测激光 波形的光探头输出端与恒河 DLM2004 型示波器连接,示波器截图所得结果如图 15~17 所示。通过测量取样 电阻两端的电压波形来观察调制电流波形且换算出调制电流的大小。

当频率为 39.43 MHz 的正弦波信号输入到高频调制系统时,激光器实现了调制电流峰峰值为 580 mA 且 直流偏置为 492.766 mA 的高频调制输出。频率为 39.43 MHz 正弦波调制电流与激光波形如图 15 所示。

当频率为 39.69 MHz 的正弦波信号输入到高频调制系统时,激光器实现了调制电流峰峰值为 850 mA 且 直流偏置为 491.794 mA 的高频调制输出。频率为 39.69 MHz 正弦波调制电流与激光波形如图 16 所示。



Fig. 15 39.43 MHz sine-wave modulation current and laser waveform
图 15 39.43 MHz 正弦波调制电流与激光波形

当频率为40.02 MHz的正弦波信号输入到高频调制系统时,激光器实现了调制电流峰峰值为850 mA且 直流偏置为493.362 mA的高频调制输出。频率为 40.02 MHz正弦波调制电流与激光波形如图17 所示。

本文所设计的高频调制驱动系统输出的直流偏置大 小和调制电流的峰峰值在1A内连续可调,这样可以提 高驱动系统输出电流的灵活性,可以为实验提供方便,在 实验过程中电流调制强度与直流偏置的大小可以在适当 的范围内调节以进行搭配使用。由于实验的测试过程中 驱动系统与激光器存在寄生参数,所以使得最终输出的 激光峰峰值有所下降。

从图 17 中可以看出,本文中的半导体激光高频调制 系统实现了频率为 40.02 MHz、峰峰值为 850 mA 且直



Fig. 16 39. 69 MHz sine-wave modulation current and laser waveform

图 16 39.69 MHz 正弦波调制电流与激光波形





流偏置为 493.326 mA 的高频调制输出,利用光功率计测量出的调制激光的平均功率为 300 mW。从图 16 和图 17 中可以看出,当调制电流强度与调制频率不变,直流偏置从 491.794 mA 增大到 493.326 mA 时,激光调

制频率 39.695 14 MHz 提升到 40.025 62 MHz,而且调制电流波形与调制激光波形的对应关系更加准确,且 调制激光功率有所提高。可以发现适当的增大直流偏置可以提高激光器的调制响应频率,这是因为激光器发 射激光的延迟时间减小,此时激光器中载流子平均寿命不限制调制频率。

由此可以得出:当电流调制强度保持不变,适当增大直流偏置,能够提高激光器的调制响应频率,输出光功 率将会增加,且调制电流波形与调制激光波形的对应关系更加准确,在结构已定的情况下,能够运用这一方法 来提高激光器的调制响应频率以及提高调制激光功率,所以直流偏置需要选择一个最优值,这样才能使激光器 的调制效率最高,工作最稳定。

3 结 论

为提高调制激光频率而设计的半导体激光高频调制系统实现了频率为 40.02 MHz、直流偏置为 493.326 mA、调制电流峰峰值为 850 mA 的高频调制输出,激光平均功率为 300 mW。可以得出结论:当调制电流强度 不变,适当地增大直流偏置可以提高激光器调制响应频率,增大输出激光功率,且可以使调制电流波形与调制 激光波形的对应关系更加准确。偏置电流需要选择一个最优值,这样可以使激光器实现较高的频率调制,这是 因为激光器发射激光的延迟时间减小,此时激光器中载流子平均寿命不限制调制频率。

参考文献:

- [1] Krehlik P. Characterization of semiconductor laser frequency chirp based on signal distortion in dispersive optical fiber[J]. *Opto-electronics Review*, 2006, **14**(2):119-124.
- [2] 郭士锐,陈智君,张群莉,等.大功率半导体激光表面改性的研究进展[J].激光与光电子学进展,2013(5):51-58. (Guo Shirui, Chen Zhijun, Zhang Qunli, et al. Research progress on laser by high power diode laser surface modification. Laser & Optoelectronics Progress, 2013(5): 51-58)
- [3] 羊华军. 激光雷达中的高频大功率半导体激光器驱动研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007. (Yang Huajun. Research on the high-frequency and high-power semiconductor laser driver for radar. Hangzhou: Zhejiang University, 2007)
- [4] 王磊,赵海宾,余继周,等.主被动结合激光雷达系统设计与性能仿真[J].红外与激光工程,2015,44(s1):68-72. (Wang Lei, Zhao haibin, Yu Jizhou, et al. Passive and active combined LADAR system design and simulation. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(s1):68-72)
- [5] 顾峰. 光调制中直接调制和外调制的问题研究[J]. 江苏科技信息, 2015(24):62-63. (Gu Feng. Research on direct modulation and external modulation in optical modulation. *Jiangsu Science and Technology Information*, 2015(24):62-63)
- [6] 何涛,侯鲁健,吕波,等. 激光雷达探测反演 PM2.5 浓度的精度研究[J]. 中国激光, 2013, **40**(1):206-211. (He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, et al. Study of accuracy of lidar inversion PM2.5 concentration. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(1):206-211)
- [7] 姜海娇,来建成,王春勇,等.激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J].中国激光, 2011, 38(5):229-235. (Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, et al. Reserch on ranging property of laser radar and its range accuracy. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5):229-235.)
- [8] 陈慧敏,高志林,朱雄伟. 调频连续波激光调制方法研究[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(6):1762-1765. (Chen Huimin, Gao Zhilin, Zhu Xiongwei. Method of frequency modulated continuous wave laser modulation. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(6):1762-1765)
- [9] 盛元平. 窄脉冲半导体激光器驱动电路的设计与仿真试验[J]. 舰船电子工程, 2015, **35**(5):11-13. (Sheng Yuanping. Narrow pulse semiconductor laser driving circuit design and simulation test. *Ship Electronic Engineering*, 2015, **35**(5):11-13)
- [10] 刘斌,黄战华,蔡怀宇.基于差动电路的准连续半导体激光器驱动设计[J].激光技术, 2015, 39(2):166-169. (Liu Bin, Huang Zhanhua, Cai Huaiyu. Design of driving system of quasi continuous wave laser diode based on differential amplifier circuit. Laser Technology, 2015, 39(2):166-169)

Design of high frequency modulation system of semiconductor laser based on PSpice

Wang Weipeng, Xu Yingtian, Zou Yonggang, Xu Li, Zhang He, Jin Liang, Li Yang, Zhao Xin, Ma Xiaohui

(State Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to output high frequency modulation, we designed a high frequency modulation system of semiconductor laser which is composed of a signal magnifying circuit, a current modulation circuit, an over current protection circuit and a DC bias circuit with slow start function. The high frequency modulation drive system of semiconductor laser uses a simple structure of the direct modulation method. The direct modulation method controls intensity of semiconductor laser by a signal of adjustable frequency. We simulated the high frequency modulation drive system of semiconductor laser by OrCAD/Pspice. The high frequency modulation system of the semiconductor laser can output laser with frequency of 40.02 MHz and average laser power of 300 mW, and it can output modulation current with DC bias of 493.326 mA and peak value of sine wave modulation of 850 mA.

Key words: semiconductor laser; modulation; bias of direct current; PSpice

PACS: 42.55. Px; 42.60. By