

中功率激光器驱动电路的研究与设计*

张雄星 范源

(西安工业大学 光电工程学院 西安 710021)

摘要: 半导体激光器对电源稳定性要求极高,微小的电冲击都会对激光器造成不可逆转的损害,因而在实际的应用中对电路的性能和安全有着很高的要求。主要运用负反馈原理来稳定输出电流,由此获得最低的电流偏差和稳定性最高的电流输出。最后运用 Multisim 软件对电路进行仿真。恒流电路模块是基于电压控制电流源的负反馈系统,采用复合达林顿晶体管的并联路拓扑结构,寻找基极电阻的最优值,并通过实验分析验证了所提出的方法的正确性。仿真和实际测量结果表明:当稳压电路的正负输入电压变化时,其输出电压比较稳定。驱动电源的输出电流在 0~1 A 范围内是连续可调的,且输出电流稳定性很好(1 h 内波动值约为 1×10^{-5} A)。

关键词: 半导体激光器; 负反馈系统; 恒流源; 软件仿真

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3099

Research and design of medium power laser driver circuit

Zhang Xiongxing Fan Yuan

(School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Semiconductor laser device demanded on the stability of the power, to the device, small electric shock can cause irreversible damage, thus in the actual circuit application, it must have high performance and security to the circuit. It mainly based on the principle of negative feedback to get the lowest current bias and to stabilize output of current. By using the software of Multisim to simulation the circuit. The constant current circuit module was based on the negative feedback system which was the voltage controlled the current. Compound darlington transistor adopted the structure of the parallel topology, than to find the optimal value of base's resistance and through the experimental to analysis and verify the accuracy of the proposed method. The simulation and actual measurement results show that to change the value of the positive and negative input voltage in regulating circuit, the value of output voltage was stable. Output current of drive power was continuous and adjustable from 0 1 A. And the stability of output current is very good(Fluctuant value is about 1×10^{-5} A in an hour).

Keywords: semiconductor laser device; negative feedback system; constant current source; software simulation

1 引言

纵观半导体激光器的发展历史来看,前人主要是从硬件电路着手来驱动,不能达到精确控制和调节;随着数字化时代的来临,加入单片机的控制,进一步提高了输出电流的精度和实现数字化输出,同时改善了与半导体息息相关的电流变化和温度调节的方法^[1-2]。现如今,大多采用数模电路相结合,单片机精确控制的方式,大大提高了电流输出的稳定性。本文主要是应用在光纤多普勒测速行

业中,提供可直接调制,可靠的光源驱动电路的设计。由于半导体激光器器件灵敏,对电流的稳定性要求极高,查阅了相关文献,最终采取电压控制电流的负反馈调节的恒流电路,创新地采用驱动电源的输出级可以采用达林顿管的并联拓扑结构,总功率分配到各个器件上,增大驱动电源的冗余度,提升系统的可靠度的方法。本文主要研究从功率晶体管的 E-M 方程和 I-V 特性的角度,计算和分析功率晶体管并联分流不平衡的原因^[3],重点从理论上推导均流电阻的计算方法,并通过实验仿真分析验证了所提出的方

收稿日期:2016-12

* 基金项目:陕西省教育厅 2016 年度专项科学研究计划(16JK1370)项目资助

法的正确性^[4]。为后续的实验中加入保护电路和制冷电路,通过单片机来精确控输出电流可调提供了理论基础^[5]。

2 恒流驱动电源的技术研究

恒流驱动电源要求输出电流大、稳定性高,这对整个系统的设计提出了很高的要求。针对恒流驱动电源的关键技术进行了研究,提出了以下几点:

- 1) 压控恒流源采用负反馈原理来稳定输出电流,设计恒流电路图,推导输出电压与输出电流的公式。
- 2) 使用多只达林顿晶体管并联结构,增大输出电流,增大输出功率。但是由于器件自身性能不可能完全一致导致分流不均的原因,通过分析和仿真,从理论上推导出

均流电阻的最优解。

3 恒流源模块设计

运用电压控制电流负反馈原理来调节获取的电流大小值,使得所需电流变化稳定,偏差较小。如图1所示为恒流源电路仿真图, V_i (即由基准电压产生的电压)经过第一级放大电路 A_1 的同相端,经过3个晶体管并联放大输出电流,通过采样电阻进行I/V转换得到取样电压,取样电压经过 A_2 的同相端放大后作为反馈电压 V_f 反馈回 A_1 的反相输入端,通过改变输入电压 V_i 的值并与 V_f 比较,来调整运放的输出电压,从而调节输出电流,以达到恒流输出目的^[6]。

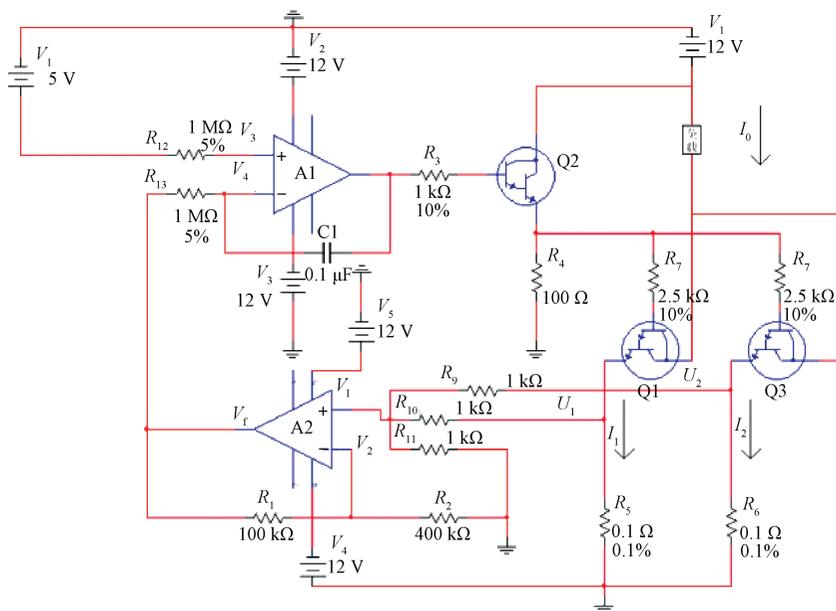


图1 恒流源电路

在运放 A_1 组成的输入级电路中,根据理想运算放大器的“虚短”和“虚断”的原则, $I_+ = I_-$, $V_+ = V_-$,可以得出:

$$V_3 = V_4 = V_i = V_f \quad (1)$$

在运放 A_2 组成的负反馈回路中,根据节点电流特性可知同相输入端电压节点 V_1 处的电压为:

$$V_1 = R' \left(\frac{U_1 + U_2}{R_a} \right) \quad (2)$$

式中: $R' = R_9 // R_{10} // R_{11}$ 。

反馈电压 V_f 和反相输入端电压 V_2 的关系为:

$$V_f = \frac{R_1}{R''} \times V_2 \quad (3)$$

式中: $R'' = R_1 // R_2$ 。

取 $R_9 = R_{10} = R_a$, $R_5 = R_6 = R_c$,由运放特性可知, $V_1 = V_2$,并且 $I_1 = I_2 = \frac{1}{2} \cdot I_0$,将式(1)、(2)带入式(3)中,可得输出电流与输入电压的关系:

$$I_0 = \left(\frac{R'' \times R_a}{R' \times R_1} \right) \times \frac{1}{R_s} \times V_i \quad (4)$$

式中:令 $A_f = \left(\frac{R'' \times R_a}{R' \times R_1} \right) \times \frac{1}{R_s}$, A_f 为运放反馈网络的放大倍数。

由式(4)可见,1)当 V_i 一定, I_0 与 A_f 成正比变化,调整 A_f 可以相应的改变电路电流;2)当 A_f 一定时 I_0 与 V_i 成正比变化,基准电压 V_i 值一定时, I_0 恒定,也可以达到稳定输出电流的目的。

由于半导体激光器属于对电流电压敏感的器件,所以必须适当设计限流和保护电路。首先,高精度的基准电源温度特性良好,噪声系数低,电流电压稳定度较好。其次,要引入控制电压与半导体激光器两端电压实施比较和监测,运用负反馈调节,来稳定其两端电压值^[7-8]。最后在前级放大电路和后级输出电路间加上上电保护和延时软启动来保护激光器,防止电脉冲的瞬间增大被损坏^[9]。

4 并联均流电阻的设计

4.1 并联均流电阻的设计原理

为了使输出电流增大,可以采用并联多个晶体管来获得大的输出电流,但是由于每个晶体管的特性参数上并不完全相同,接入电路后会出现电流分配不一致的现象。根据非平衡载流子的扩散理论和 PN 结理论,晶体管的直流电流与直流电压的关系可表示为埃伯斯-莫尔(Ebers-Moll)方程^[10]。由 E-M 方程推导可得到晶体管的 I_c 表达式:

$$I_c = \beta I_b - I_{CEO} \left[\exp\left(\frac{q}{kT}(V_{BE} - V_{CE})\right) - 1 \right] \quad (5)$$

式中:单位电子电荷量 $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$,玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $\frac{kT}{q} = 25.3 \text{ mV}$ (室温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下), T 是热力学温度,单位为 K ^[11]。

从式(5)可以看出,当基极电流 I_b 为常数时,集电极电流 I_c 仅与基极-发射极间电压 V_{BE} 和集电极-发射极间电压 V_{CE} 确定。

4.2 并联均流电阻的推导

为实现并联均流,可以使每只晶体管的基极串联电阻 R_B 值相等,或者使发射极串联电阻 R_E 值相等,引入负反馈结构来调节电流使流过每只晶体管的电流近似相等。实现方法如图 2、3 所示分别为基极串联电阻 R_B 的并联电路图和发射极串联电阻 R_E 的并联电路图。

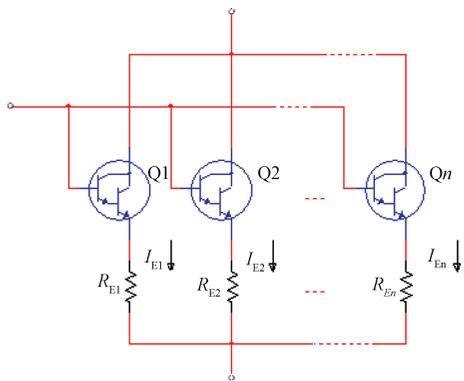


图 2 基极串联电阻 (R_B) 的并联电路

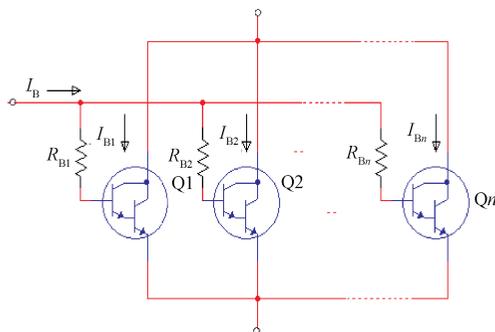


图 3 发射极串联电阻 (R_E) 的并联电路

图 2 所示的基极串接均流电阻的并联电路中,在实际应用中, R_B 可由以下公式计算:

$$R_B = \frac{U_{BE(on)} \cdot \delta_u}{I_B \cdot \delta_i} = \frac{n \cdot h_{FEmin} U_{BE(on)} \cdot \delta_u}{I_0 \cdot \delta_i} \quad (6)$$

式中: I_0 为总的输出电流, I_B 为基极电流, $U_{BE(on)}$ 为晶体管的基极-发射极开启电压, h_{FEmin} 为晶体管的电流放大倍数的最小值, n 为并联晶体管的个数。 δ_u 和 δ_i 分别是基极-发射极电压和基极电流的降额率,通常取为 $\delta_u = 10\%$ 、 $\delta_i = 1\%$ ^[12]。试验用两只同一厂家生产的 TIP122 功率晶体管,其主要参数如表 1 所示。

表 1 TIP122 主要参数

符号	意义	值	单位
V_{CBO}	集电极基极电压 ($I_E = 0$)	100	V
V_{CEO}	集电极-发射极电压 ($I_B = 0$)	100	V
I_C	集电极电流	5	A
I_B	基极电流	0.12	A
$V_{CE(sat)}$	集电极-发射极饱和电压	2~4	V
$V_{BE(on)}$	基极-发射开启电压	2.5	V
h_{FEmin}	电流增益	250	

可知 $h_{FEmin} = 250$, $U_{be(on)}$ 开启电压的最大值为 2.5 V , 输出电流 $I_0 = 5 \text{ A}$, 带入式(6)可得均流电阻 R_B 的最优值:

$$R_B = \frac{2 \times 250 \times 2.5 \times 10\%}{5 \times 1\%} = 2.5 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

图 3 所示的发射极串接均流电阻的并联电路中, R_E 的计算公式为:

$$R_E = \frac{U_{CE(sat)} \cdot \delta'_u}{I_E \cdot \delta'_i} = \frac{n \cdot h_{FEmin} U_{CE(sat)} \cdot \delta'_u}{I_0 \cdot \delta'_i} \quad (8)$$

式中: I_E 为发射极电流; $U_{CE(sat)}$ 为晶体管集电极-发射极的饱和压降; 试验中取 $R_E = R_S$ 。

此外,晶体管的输出特性与温度紧密相关,电流增益系数会随温度而变化,并联的晶体管需要考虑散热,添加散热片来及时降低温度的变化引入的影响,来提高功率管的寿命和使用效率^[13]。

5 实验和仿真

5.1 输出电流与输入电压线性度关系测试

考虑到激光半导体价格昂贵,用光电二极管替代,同样也可以得到良好的测量效果,试验用直流电源,打到 5 V 档,测 0.1Ω 的采样电阻两端电压,用仿真工具里的万用表实时测量负载两端电压值,在 Multisim 里进行仿真测试最终可以得到如图 4 所示的输出电流与输入电压的线性度关系测试图。

所得数据横坐标表示输入电压,纵坐标表示输出电流,在仿真工具里的直流线性分析中得到输入电压与输

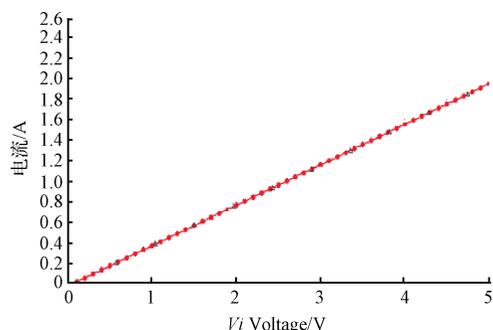


图4 输出电流与输入电压的线性度

出电流之间的关系。从图中可以看出输出电流与输入电压线性关系明显,误差达到 0.003%。

5.2 电流稳定度测试

在实验室常温情况下,仿真测量电流恒定输出设定 200 mA 情况下,观察电流表每隔一段时间的电流值,通过仿真工具直流稳定分析,得到测试结果如图 5 所示。

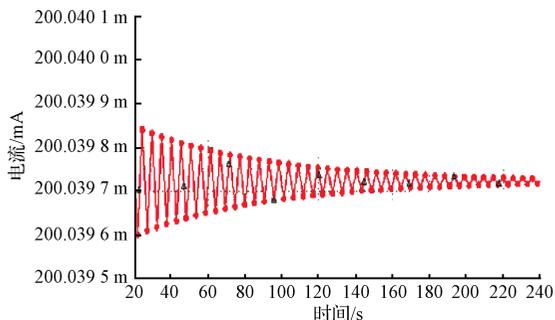


图5 电流稳定度测试

由图 5 可知,当电流为 200 mA 时,可得到输出电流最大值与设定值偏差值为 0.039 9 mA,平均值为 200.039 75 mA,电流稳定度 I_s 利用式(4)计算得^[13]:

$$I_s = (I_{\max} - I) \times 100\% =$$

$$(200.039 9 - 200.0397 5) \times 100\% = 0.015\% \quad (8)$$

同理,当电流设为 900 mA 时,输出电流最大值与设定值偏差值为 0.021 3 mA,电流平均值为 600.021 0 mA,电流稳定度达到 0.003%。从两组不同电流的实验数据可知,采样电流的平均值与预设电流的偏差较小,其产生的误差可能是由于系统误差造成^[14-16]。

6 结 论

利用软件仿真可以弥补硬件实验的不足,可以更快的辅助完成硬件达不到的实验,同时可以方便和清晰的观察波形,读取数据,优化参数,完善电路设计,减小误差。实验表明,系统的输出电流与输入电压线性度良好;对两组

电流稳定度进行测试,其电流偏差最大为 0.040 0 mA,稳定度 0.003%,在实际应用中基本满足我们驱动半导体激光器要求,具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 栖原敏明,周南生. 半导体激光器基础[M]. 共立出版,2002.
- [2] RAZAVI B. Design of analog CMOS integrated circuits[M]. International ed. New York: Mc Graw-Hill Higher Education, 2001.
- [3] DAVIS C C, YU A W. Lasers and Electro-Optics[M]. 北京:世界图书出版公司,1998.
- [4] 彭军. 运算放大器及其应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [5] 孙雪梅. 一种用于线路检测的大功率数字化恒流源设计[D]. 厦门:厦门大学,2006.
- [6] 曹瑞明. 半导体激光器功率稳定性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008.
- [7] 欧素萍. 半导体激光器驱动电源的设计与实现[D]. 郑州:郑州大学,2013.
- [8] 李晓雷,蒲南江,李小虎,等. 半导体激光器驱动电源的设计及仿真[J]. 电子测试,2011(8):75-77.
- [9] 陈志娟. 通用半导体激光器驱动模块的设计与制作[D]. 吉林:吉林大学,2008.
- [10] STEFAN L. 功率半导体器件与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [11] BENDA V, GOWAR J, GRANT D A. Power Semiconductor Devices: Theory and Applications [M]. England:John Wiley Sons Ltd,1999.
- [12] 郑朝思,胡企铨. 大功率半导体激光器应用的若干问题研究[J]. 光学精密工程,2014,3(5):15-20.
- [13] 查申森,郑建勇,苏麟,等. 大功率 IGBT 并联运行时均流问题研究[J]. 2005,25(7):32-34.
- [14] 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.
- [15] 塞尔吉欧·弗朗哥[美],刘树棠等译. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计(第3版)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2004.
- [16] 赵玲. 20 A 大功率恒流驱动器的设计与实现[D]. 吉林:吉林大学,2012.

作 者 简 介

张雄星,1979 年出生,讲师,主要研究方向为光电测试、仪器仪表测控技术。
E-mail:1539834057@qq.com