

半导体激光器的功率控制

周 帅 张 彤 崔一平

(东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要 为满足目前光纤通信领域中半导体激光器功率高精度控制的要求,结合半导体激光器的内部结构及其功率特性,重点研究了半导体激光器(LD)和光电二极管 PD 的工作原理,并根据激光器 LD 和光电二极管 PD 在实际工作状态下的特性参量提出了半导体激光器的高精度功率控制方法;采用 AD8304 高动态范围对数放大器设计了一种应用于光学真延时系统中的半导体激光器功率控制电路,并根据 AD8304 对数放大器的内部结构及工作特性对整个闭环电路系统做了详细分析;实验测试结果表明,该功率控制电路运行稳定、工作温度范围宽、控制精度高、成本低廉且易于集成,能够广泛适用于大多数半导体激光器中使用。

关键词 激光束; 半导体激光器; 功率控制; AD8304; 控制电路

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0065

Power Control of Semiconductor Laser

Zhou Shuai Zhang Tong Cui Yiping

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract To meet the requirement of high precision power control of semiconductor laser used in fiber communication, the principles of semiconductor laser and photodiode were studied thoroughly with regard to the internal structure and power characteristics of semiconductor laser. According to the performances of LD and PD in practice, the method of power control with high precision was proposed. The power control circuit of semiconductor laser using logarithmic amplifier AD8304 with wide range baseband log compression was designed. And the closed loop control circuit was analyzed in detail according to the internal structure and principle of converter AD8304. The testing result demonstrates that the module of power control can keep the laser working stably, has advantages of wide range of operation temperature, high control precision, less cost and easy integration, and can be applied in most semiconductor lasers.

Key words lasers; semiconductor laser; power control; AD8304; control circuit

1 引 言

半导体激光器^[1~10]凭借其体积小、重量轻、功耗低、易于调制及使用方便等优点,被广泛应用于光纤通信、生物医疗、国防以及干涉测量系统等多个领域。驱动电路^[9,11,12]对半导体激光器能否正常工作有着重要影响,也是激光器在实际应用中系统设计的关键所在。静电、高压、涌浪电流以及电网冲击等都会对半导体激光器造成永久性破坏,电流及激光器温度的变化也会造成光功率的不稳定,影响输出性能。

光延时技术^[2,6]应用于相控阵雷达中,与传统延时装置相比具有大瞬时带宽、体积小、低损耗、抗电磁干扰能力强、不存在波束偏斜现象等优点。在光源的选择上对出光的单色性、方向性、输出功率都要求很高,故必须采用激光器作为光源,而固体、液体、气体激光器的体积都比较大,工作条件要求高,故采用体积小、电光转换效率高的半导体激光器。本文采用模拟电路的控制方法来设计激光器的驱动电路,体积小、易于集成并且控制精度要求高是对整个光延时系统正常工作的重要保证。

基金项目: 部委项目(6906005001,6906002043)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-05-0465)资助课题。

作者简介: 周 帅(1981—),男,研究生,主要从事光延时方面的研究。E-mail: foreachdream@yahoo.com.cn

导师简介: 张 彤(1965—),男,博士后,教授,主要从事集成光学理论与器件方等面的研究。

E-mail: tonnyz@263.net (通信联系人)。

2 内部结构及工作原理

2.1 内部结构

一般半导体激光器集成一个发光二极管(LD)、一个光电二极管、热敏电阻、热制冷器(TEC),如图1。一个可调制的分布反馈(DFB)半导体激光器,还包含有电吸收调制器(EA)。

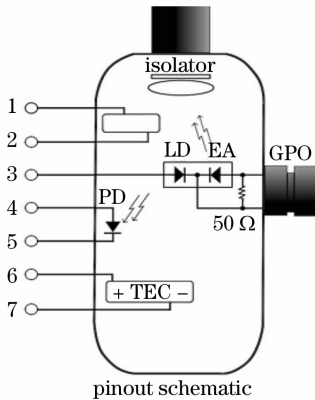


图1 半导体激光器的内部结构

Fig. 1 Internal structure of semiconductor laser

其中发光二极管 LD 使用时是正向接法,而光电二极管是反向的接法,当激光器在工作时,光电二极管探测 LD 的光功率从而产生电流,通过驱动电路来控制 LD 的发光功率。

2.2 半导体激光器的工作原理及特性

设计其驱动电路前必须了解激光二极管^[13]工作的原理及特性。

LD 发光就是采用受激辐射,使电子在能级之间跃迁释放出的光子在谐振腔产生振荡的原理而获得。一般是在 p-n 结的两端加工出两个平行光洁的反射镜面。此镜面垂直于 p-n 结的平面,和它的长度方向形成一个谐振腔。当在 p-n 结两端加上正向电压时,p-n 结内部产生自发光,其中部分光子将在两个反射镜面之间来回反射,将激发更多的光子,形成正反馈,产生激光。

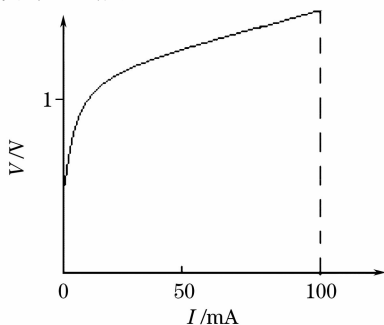


图2 激光器 I-V 特性

Fig. 2 I-V curve of laser

半导体激光器工作在正向电压下,一般阈值电压为 1 V,当电压超过 1 V 时,电流随着电压的增大而增加,如图 2 所示。

当激光器注入电流增加到能使激光器产生振荡时,此时的电流大小即为激光器的阈值电流^[3,4],只有注入电流大于阈值电流时,激光器才能发光,并且发光功率随阈值电流的增加而迅速增大(图 3)。

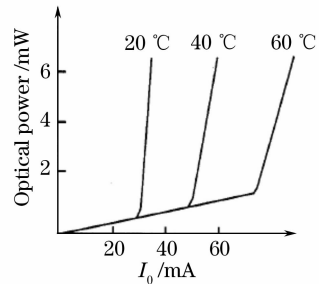


图3 激光器光功率与阈值电流特性

Fig. 3 Optical power-threshold current curve of laser

由图 3 可知,激光器的阈值电流随温度的升高而增大,所以,良好的温度控制^[7]也是激光器稳定工作的保证,一般在常温 25 °C 下。电流与光能的转换系数 η 为 0.1 mW/mA。

半导体光电二极管与普通半导体二极管一样,都具有一个 p-n 结,在它的管壳上有一个能让光射入其光敏区的窗口,为了使其工作时能更好的接收光,故设计时尽可能使其 p-n 结面积大。光电二极管是工作在反向偏置状态的,在没有光照时,反向偏置的 p-n 结只有很小的反向漏电流,称为暗电流;当有光照时,且光子能量大于 p-n 结半导体材料的带隙宽度 E_g 时,p-n 结中的价电子吸收光能后挣脱价键的束缚而成为自由电子,同时产生一个自由空穴。这些由光照产生的电子空穴对统称为光生载流子。空间电荷区内的光生载流子在强电场作用下形成光电流,由二极管的负极流向正极。

光电二极管的伏安特性可由以下公式表示:

$$I = I_0 [1 - \exp(eV/kT)] + I_L,$$

其中 I_0 是无光照时的反向饱和电流, V 是二极管两端的电压, e 为电子电荷, k 为波尔兹曼常量, T 是结温(单位为 K), I_L 是无偏电压状态下光照时的短路电流,它与光照时的光功率成正比。

由图 4 可知光电二极管的工作特性^[5]:

1) 无偏压时,二极管上仍有电流流过,并且与光照功率呈线性关系;

2) 负偏压时,二极管电流与光照功率呈线性关系;

3) 正偏压时,负载 R_L 值很小时,二极管电流仍与光照功率呈线性关系,但当 R_L 值增大时,则呈非线性关系。

在峰值响应波长下,光电二极管的响应度 R 的典型值在 $0.00025 \sim 0.0005 \text{ mA/mW}$ 。

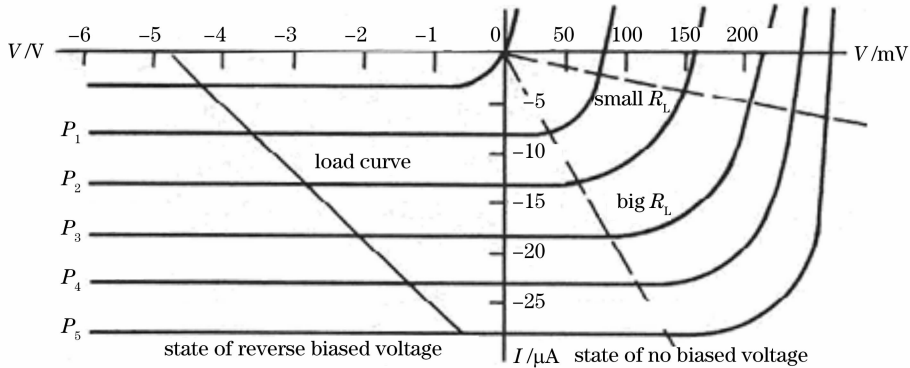


图 4 光电二极管的伏安特性^[4]

Fig. 4 $I-V$ curve of photodiode

3 稳功率控制电路

采用美国 Multiplex 光器件公司生产的 MTX510EW 激光器,该激光器 LD 的操作电流要求在 $40 \sim 100 \text{ mA}$,光电二极管的监测电流在 $0.01 \sim 1.5 \text{ mA}$,所以必须设计一个闭环反馈电路将光电二极管 PD 的监测电流转换成控制激光器 LD 的控制电流,如图 5 所示。

由二极管特性可知,光电二极管产生的电流与作用其上的光功率成线性对应关系。因此,为达到大的控制动态范围和稳定地功率控制,本系统中采用高动态范围的对数放大器 AD8304 作为功率检测控制的输入放大前级。由 AD8304 的使用手册可

知:AD8304 具有 160 dB 的动态范围,可接收放大的输入电流范围为 $100 \text{ pA} \sim 10 \text{ mA}$,其最佳接收范围是 $1 \text{ nA} \sim 1 \text{ mA}$,正是光电二极管的输出电流范围,由于 AD8304 具有对数放大的特性,即 $V_{out} \propto L_{og} I_{in}$ 能将光电二极管探测电流的大动态范围变化转换为电压的小范围变化,从而对后级控制的稳定性和可靠性提供了有力的保证。使环路精确稳定的控制激光器的输出功率得以实现。另外,该 IC 具有极低的噪声,进一步提高了功率控制的稳定性和控制精度,其宽的工作温度范围 ($-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim +85 \text{ }^\circ\text{C}$) 使系统即使在极其恶劣的高温或低温下均能正常工作。

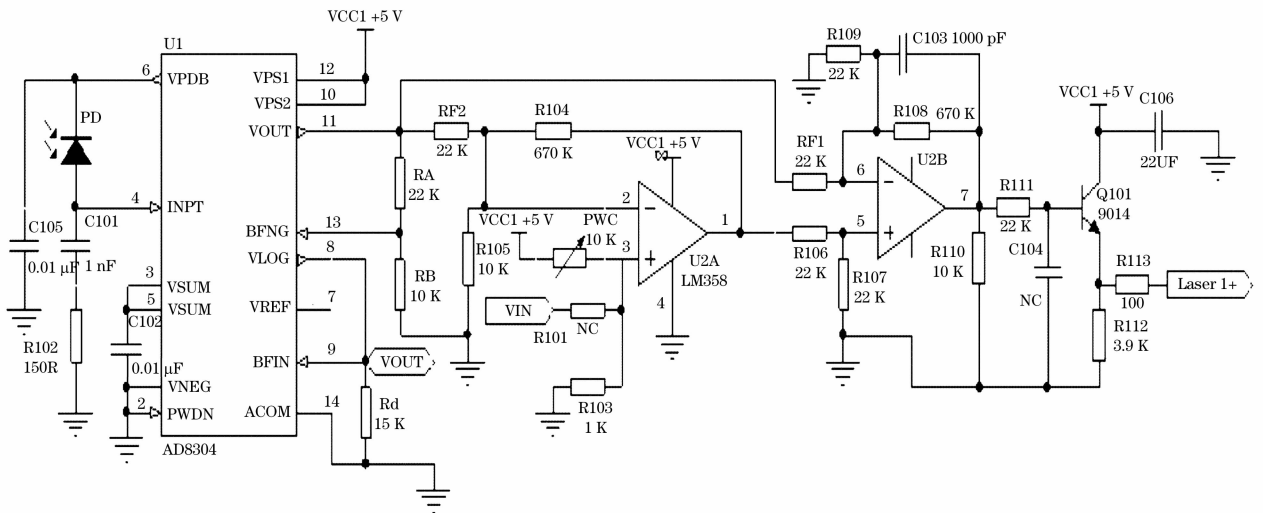


图 5 光功率控制电路

Fig. 5 Control circuit of optical power

3.1 AD8304 工作原理

AD8304 结构内部是利用了对数放大器的原理, 利用了跨导线性(translinear)技术, 即一个放大器和

一个三极管相连, 三极管即实现对数的关键所在, 所以输出电压的动态范围将会大大被抑制(图 6)。

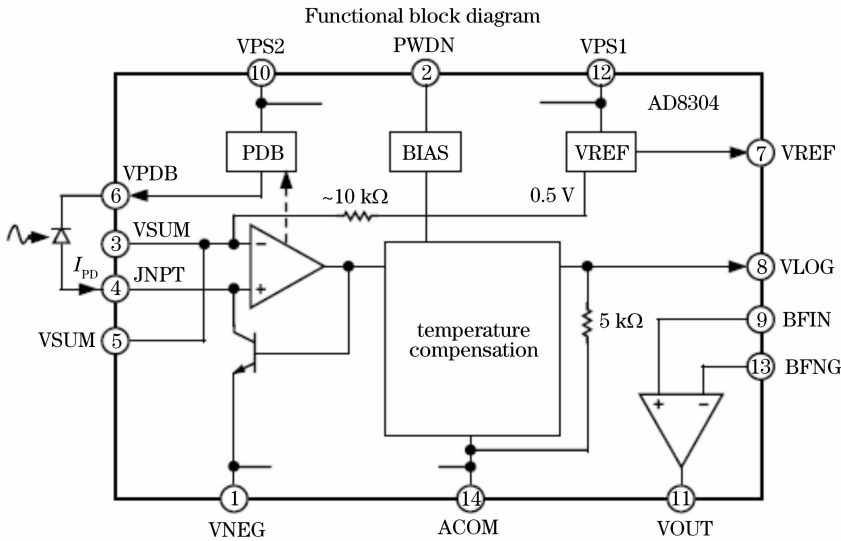


图 6 AD8304 内部结构

Fig. 6 Internal structure of AD8304

利用二极管电压电流关系:

$$I = I_{\text{反向}} [\exp(V/V_T) - 1],$$

当 $V \gg V_T$ 时, 有 $V = V_T \log(I/I_{as})$ 。I 是流过 p-n 结的电流, V 是跨 p-n 结的电压, V_T 在 27 °C 时 $V_T = KT/q = 26 \text{ mV}$, 三极管相对与二极管能很好的扩展对数放大器的动态范围。当电路工作时, 光电流 I_{PD} 流入三极管集电极, 发射极电流 $I_E \approx I_{PD}$, 则基极电压 $V_{BE} = V_T \log(I_E/I_{as}) \approx V_T \log(I_{PD}/I_{as})$ 。由于光电二极管是工作在反向偏压下的, 故其光电流 I_{PD} 是正

比与光功率 P_{OPT} 的, 即 $I_{PD} = \rho P_{OPT}$, 同样, 三极管发射结的反向饱和电流 I_{as} 与管子截止功率也有同样的关系, 即 $I_{as} = \rho P_Z$, 所以有 $V_{BE} = V_T \lg(P_{OPT}/P_Z)$ 。

由于三极管发射结的温度敏感性强, 需在后面加入温度补偿模块以保持其工作稳定。看实际应用中, 将 VLOG 和 BFIN 连缓冲输出到 VOUT, 而 BFNG 和 BFIN 放大输出到 VOUT, VSUM 是用于屏蔽输入的电流噪声的, VNEG 通常接地, 基本连接图如图 7 所示。

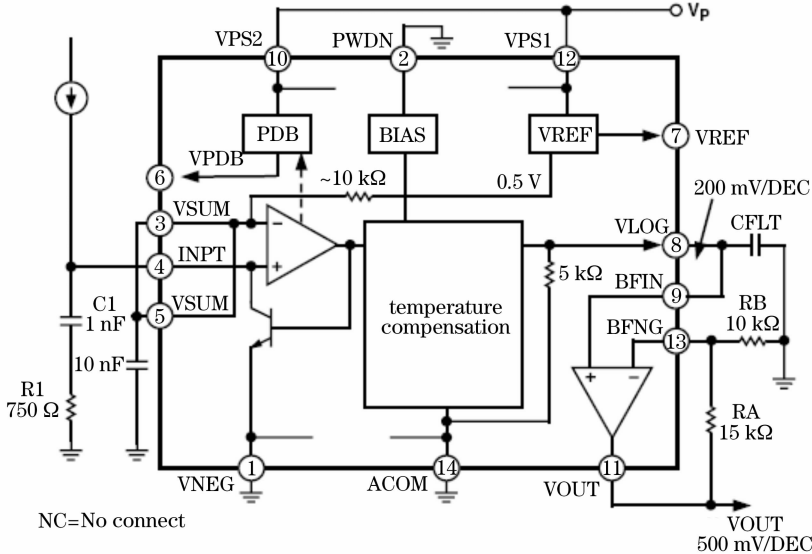


图 7 AD8304 典型连接电路

Fig. 7 Typical circuit of AD8304

从 VLOG 出来的 200 mV/dec(这里是指光电二极管输入电流每变化 10 倍时输出对数电压的变化值,即每分贝 10 mV)通过运方差分放大到 VOUT 输出变为 500 mV/dec(对应每分贝 25 mV),当光电二极管输出电流范围在 100 pA~10 mA 时,对数范围输出在 0.1 V 到 1.6 V。

3.2 后级差分放大及电流驱动电路

由于有低噪声高稳定性的精确对数放大前级,则功率控制的后级电路采用高放大倍数的两级差分放大器,其直流电压放大倍数约为 30×33 倍,即 1000 倍约 60 dB。也就是说,其光功率的大小与设定功率输出值的差值经系统作用后会产生一个与其对应的放大了 1000 倍的输出误差电压值,即 $\Delta V = 1000 \times \Delta P_{opt}$ 将此误差电压作用于激光器的功率控制端,从而通过功率控制环路将输出光功率锁定。由环路增益 $\Delta G = \Delta V / \Delta P = 1000$ 可知,可将光功率的变化锁定在 $1/\Delta G$ 内,即 0.1%,即光稳定度为 10^{-3} ,足以满足系统对光功率稳定性的要求。

因为激光二极管工作需要较大电流(40~100 mA),故在差分放大电路最后设计一个三极管,有输出误差电压来控制该三极管的基极电流,并放大从发射极输出,从而驱动激光器 LD 正常工作。

本电路就是要放大直流电压,故图中的几个电容都是利用隔直通交的特性对交流产生的噪声信号进行耦合。

4 工程测试结果

将该激光器功率控制电路应用于光延时系统中,采用 MTX510EW 电吸收调制激光器。配合温度控制电路,延时系统采用一米长的单模光纤作为延时线,通过光电探测器输出电信号,由网络分析仪对整个系统做延时测试。信号频率随机选在 1.5 GHz、2.5 GHz 时,平均延时为 11 ns,整个测试过程用时 2 h,测试环境温度控制在 10~40 °C 之间,信号输出一直保持稳定。

5 结 论

本文介绍了激光器的工作特性及功率控制的原理,采用高精度大动态范围对数放大器 AD8304 设计了一种激光器功率控制电路,并围绕 AD8304 对电路的设计原理做了详细分析,该电路功率控制稳定,精度高且工作温度范围宽,通过进一步优化设计,能适用于多种半导体激光器的功率控制。

参 考 文 献

- Zhang Guiyin, Jin Yidong. Experimental study on the spectral stabilization of the output of semiconductor laser[J]. *J. North China Electric Power University*, 2007, **34**(4): 104~106
张贵银,靳一东. 半导体激光器输出光谱稳定性的实验研究[J]. 华北电力大学学报, 2007, **34**(4): 104~106
- Zhou Gongyi, Zhang Tong, Cui Yiping. Design of true-time-delay module of integrated optical waveguide switch matrix[J]. *Chin. J. Electron Devices*, 2007, **30**(3): 789~792
周工艺,张彤,崔一平. 集成光波导开关阵列真延时模块设计[J]. 电子器件, 2007, **30**(3): 789~792
- Wang Zhen, Jia Zhidong, Ding Yangbin *et al.*. Design of steady light controller of the semi-conductor light source[J]. *Missile and Space Vehicle*, 2007, (4): 59~61
王 镇,贾智东,丁扬斌等. 半导体光源的稳光控制电路的设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2007, (4): 59~61
- He Wei, Jiang Hong. The power steadiness and control technology of semiconductor laser[J]. *The Implement of Ocean, Weather and Hydrology*, 2004, (1): 68~70
何 伟,江 虹. 半导体激光器恒功率控制技术[J]. 气象水文海洋仪器, 2004, (1): 68~70
- Zhu Shiguo, Zhou Jijun. The experimental test of V-I characteristic with photoelectric cell[J]. *Physic Experiment*, 1999, **20**(2): 12~14
朱世国,周积骏. 半导体光电二极管伏安特性的实验测定[J]. 物理实验, 1999, **20**(2): 12~14
- Zhou Gongyi. Application of optical switch and waveguide in true time delay for Phased array antenna[D]. Nanjing: Southeast University, 2006
周工艺. 光开关和光波导在光控相控阵雷达真延时中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2006
- Yi Hongjing, Ye Ziqing, Liu Hongzhi *et al.*. A testing system of the dependence of the output power on the cavity temperature[J]. *Optoelectronic Technology*, 2007, **27**(3): 187~190
伊红晶,叶子青,刘洪志等. 一种激光器功率与腔体温度关系测试系统[J]. 光电子技术, 2007, **27**(3): 187~190
- Wang Jiaqiang, Yue Xinquan, Li Yong *et al.*. *Communication Engineering of Fiber* [M]. Beijing: Postal University press of Beijing, 2002. 25~37
王加强,岳新全,李 勇等. 光纤通信工程[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 25~37
- Yu Yonglin. The progress of semiconductor laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, **44**(2): 69~70
余永林. 半导体激光器的发展[J]. 激光与光电子学进展, 2002, **44**(2): 69~70
- Chen Jiuying, Liu Jianguo, Zhang Yujun *et al.*. Autobalanced detection based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 350~353
陈玖英,刘建国,张玉钧等. 调谐半导体激光吸收光谱自平衡检测方法研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 350~353
- Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Reasearch center of laser fusion, China Academy of Engineering Physics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 55~61
於海武,徐美健,段文涛等. 惯性刷变能源激光器驱动器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(9): 55~61
- Leng Feng, Zhu Shiqun. Driving effect of a bidirectional ring laser with injected signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 778~782
冷 锋,朱士群. 含有注入信号的双向环形激光场中的驱动效应[J]. 光学学报, 2001, **21**(7): 778~782
- Li Jie, Chen Haiqing, Yu Hongbin. Study of deformable mirror for compensating the thermally induced aberration of laser diode-pumped solid-state laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1198~1202
李 捷,陈海清,余洪斌. 用于激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的微变形镜特性研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1198~1202