

# 改善恒流驱动电路性能的研究\*

涂用军

(广东科学技术职业学院, 广州 510640)

摘要: 分析和讨论了集成运放负反馈型恒流源的负载、温度特性以及稳定精度, 得到了相当准确的解析表达式, 为设计高稳定度、高可靠的恒流源电源提供了更多的信息, 也为各种功率的恒流源性能优化设计提供参考。

关键词: 负载特性; 温度特性; 恒流源; 电流稳定度

中图分类号: TN709

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2009)06-0075-03

## Study on Improvement of Constant Current Source

TU Yong-jun

(Guangdong Vocational Institute of Science and Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The load, temperature characteristics, current precision and stability analysis are proposed in this paper, which will result in an accurate analytical formula and it also provides much useful information for designing of high reliability constant current power supply with high stability and some reference information on optimization design of static and dynamic characteristics of Constant Current Source running with the different power.

**Key words:** load characteristics; temperature characteristics; Constant Current Source; current stability

### 0 引言

半导体激光二极管(LD)已经在通信、信息、医疗、精密加工和测量等领域获得了广泛应用。然而, LD的工作波长和输出功率与其工作温度、注入电流之间有着强烈的依赖关系。例如, 半导体激光器驱动电源的基本要求是恒流源稳定度要高(至少应优于 $10^{-4}$ )<sup>[1]</sup>。近红外 LD的工作波长受工作温度变化的影响约为 $0.3\text{nm/K}$ , 受注入电流变化的影响约为 $0.03\text{nm/mA}$ <sup>[2]</sup>。在实际工程中, 一般通过仿真分析, 为硬件电路设计和测试提供参考。为此, 本文介绍了恒电流驱动电路特性的具体解析分析方法及表达式, 同时给出了本 LD 恒流驱动电路的实验测试结果。

### 1 恒流驱动电源的理论分析

在稳流电源中, 目前常用的是开关电源和线性电源, 由于开关电源的瞬态响应较差、纹波系数较大, 对于瞬态特性和稳定度要求较高的半导体激光驱动电源, 应采用线性电源较为合理。为了实现高的电流稳定度, 驱动电路大多采用集成运放负反馈的控制方法, 其恒流源的调整管普遍采用 MOS 晶体管<sup>[3]</sup>。本恒流驱动末级电路(电流驱动)如图 1 所示。

图 1 所示电路中, 负载  $R_L$  (等效于 LD) 串联于 MOS 晶体管漏极, 源极串联采样电阻  $R_0$ , 用于电流取样, 该取样电流经过 I/U 转换并经 U1 放大后, 作为反馈电压  $V_f$  与设定基准电压  $V_g$  进行比较放大, 进而控制 MOS 管的栅极电压, 实现对输出电流  $I_D$  进行调整, 使整个闭环反馈系统处于动态的平衡中, 以达到稳定输出电流的目的。输出电流  $I_D$  与设定电压  $V_g$  的关系可由负反馈原理得到  $I_D = V_g / A_{iu} R_0$ , 此式只是一个理想表达式。实际上, 随着负载、温度、输入电压等变化及器件和参数的不同选择, 输出电流还是有微小的变化。

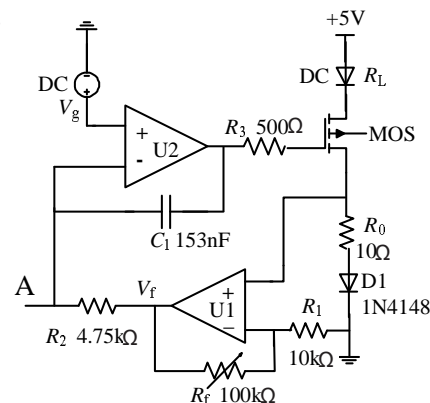


图 1 集成运放负反馈型恒流驱动电路

Fig.1 Constant current source circuit

\* 广东省科技计划资助项目(2006B13301004)

## 2 恒流源特性分析

一个理想恒流驱动电源要求在负载电阻  $R_L$  或环境温度变化时,能保持  $I_D$  恒定不变,但事实上并非如此,下面对影响恒流源输出电流稳定性的因素进行分析。

### 2.1 恒流源的负载特性分析

文献[4]给出 MOS 晶体管的漏极电流  $I_D$  为:

$$I_D = I_{DSS}(V_{GS} - V_T)^2 = \frac{\mu C_0 W}{2L}(V_{GS} - V_T)^2 \quad (1)$$

式中  $V_T$  为 N 沟道管子的开启电压  $\mu$  为电子迁移率;  $C_0$  为单位面积的电容;  $W$  和  $L$  为沟道宽长几何尺寸。对于硅材料,电子迁移率与温度的关系可表示为[5]:

$$\mu = K_0 \frac{1}{aT^{\frac{3}{2}} + bN_d T - \frac{3}{2}} \approx K_0 a T^{-\frac{3}{2}} = K_1 T^{-\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中  $a$  和  $b$  是常数;  $N_d$  是掺杂浓度;  $K_0$  和  $K_1$  是比例系数。工程中  $bN_d T^{-3/2}$  项可忽略。则式(1)可写为:

$$I_D = K T^{-\frac{3}{2}} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (3)$$

式中  $K = \frac{K_1 C_0 W}{2L}$

根据 N 沟道 MOS 场效应管转移特性曲线,当有微小增量  $\Delta V_{GS}$  和  $\Delta V_{DS}$  时,漏极电流  $I_D$  有增量  $\Delta I_D$ , 即:

$$\Delta I_D = g_m \Delta V_{GS} + \frac{1}{r_{ds}} \Delta V_{DS} \quad (4)$$

式中  $g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}|_{V_{DS}}$  为 MOS 管在工作点上的跨导;  $r_{ds} =$

$\frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D}|_{V_{GS}}$  为 MOS 管在工作点上的漏极电阻。

由图 1 可推导出输出电流  $I_D$  与电路中各量的关系(为二极管工作电压):

$$\begin{aligned} V_{DS} &= V_{DD} - I_D(R_L + R_0) \\ V_{GS} &= A_{u2}(V_g - V_T) \\ V_T &= A_{u1}(I_D R_0 + V_Z) \end{aligned} \quad (5)$$

工程中,影响电流  $I_D$  变化的因素很多,主要因素是负载电阻  $R_L$  的改变。设  $R_L$  有增量  $\Delta R_L$  (同时考虑基准电压和电源电压增量  $\Delta V_g$  和  $\Delta V_{DD}$ ,  $\Delta V_Z=0$ ),由式(5)可得:

$$\Delta V_{DS} = \Delta V_{DD} - I_D \Delta R_L - \Delta I_D \Delta R_L - \Delta I_D (R_L + R_0) \quad (6)$$

$$\Delta V_{GS} = A_{u2}(\Delta V_g - \Delta I_D A_{u1} R_0) \quad (7)$$

式(6)和(7)代入式(4)可得电流  $I_D$  的负载特性

$$\frac{\Delta I_D}{I_D} = \frac{1}{(1 + A_{u1} A_{u2} g_m R_0) r_{ds} + (R_0 + R_L + \Delta R_L)} \times \left( \frac{A_{u2} g_m r_{ds}}{I_D} \times \Delta V_g + \frac{\Delta V_{DD}}{I_D} - \Delta R_L \right) \quad (8)$$

由于  $r_{ds}$  典型值为  $0.1 \sim 3M\Omega$ ,  $g_m = 0.1 \sim 150mA/V$ , 则有  $A_{u1} A_{u2} R_0 g_m r_{ds} \gg 1$ ,  $A_{u1} A_{u2} R_0 g_m r_{ds} \gg (R_0 + R_L + \Delta R_L)$ , 式(8)可简化为:

$$\frac{\Delta I_D}{I_D} \approx \frac{\Delta V_g}{I_D R_0 A_{u1}} + \frac{1}{A_{u1} A_{u2} g_m R_0 r_{ds}} \times \left( \frac{\Delta V_{DD}}{I_D} - \Delta R_L \right) \quad (9)$$

式(9)表明  $\Delta V_g$ 、 $\Delta V_{DD}$ 、 $\Delta R_L$  都对恒流源电流变化  $\Delta I_D$  有影响,其影响程度分别与  $A_u$ 、 $I_D$ 、 $R_0$ 、 $g_m$ 、 $r_{ds}$  等参数大小有关。

### 2.2 恒流源的温度特性分析

对于典型的 N 沟道 MOS 场效应管,当温度有增量  $\Delta T$  时,漏极电流  $I_D$  有增量  $\Delta I_D$ 。由式(3)可知:

$$\begin{aligned} \Delta I_D &= K(V_{GS} - V_T)^2 \times \frac{\partial T^{-3/2}}{\partial T} \times \Delta T + K T^{-3/2} \times \\ &2(V_{GS} - V_T) \left( -\frac{\partial V_T}{\partial T} \right) \times \Delta T = -\beta I_D \Delta T \end{aligned} \quad (10)$$

式中,由于  $\beta$  为正值。考虑整个反馈系统的温度特性影响,可以画出图 2 所示的框图。

并可以得到  $I_D$  电流的温度特性:

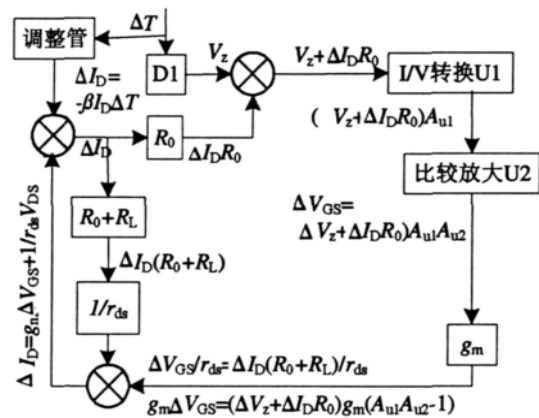


图 2 恒流源的温度特性分析框图

Fig.2 Functional diagram of temperature characteristics analysis

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_D}{I_D} &= \frac{\beta I_D + A_{u1} A_{u2} g_m \times \frac{\Delta V_Z}{\Delta T}}{A_{u1} A_{u2} g_m R_0 - 1 + (R_0 + R_L) / r_{ds}} \\ &\approx -\frac{\beta I_D}{A_{u2} A_{u1} g_m R_0} - \frac{1}{R_0} \times \frac{\Delta V_Z}{\Delta T} \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可知,增加  $A_u$ 、 $R_0$ 、 $g_m$  或减小  $I_D$  都可以改善恒流源的温度特性,由于  $r_{ds} \gg (R_0 + R_L)$ , 漏极电阻  $r_{ds}$

对温度特性影响不大。另外,工程中,一般二极管的温度特性  $\frac{\Delta V_z}{\Delta T} \approx -(2.0-5.0)\text{mV/K}$ , 这样, 串联一个二极管, 可以明显的改善恒流源的温度特性。

式(9)和(11)表明了集成运放、调整管、取样电阻、负载电阻及二极管等器件参数(如  $A_{u1}, R_0, g_m, r_{ds}$ ), 基准电压  $\Delta V_g$  和电源电压  $\Delta V_{DD}$  及环境温度  $T$  对恒流源性能的影响。对于各种器件的其他参数(如放大器的增益不稳定、零点漂移和噪声电压等)对恒流源性能的影响相当于在放大器输入端的基准电压  $V_g$  上叠加了一个等效漂移和噪声电压  $\Delta V_e$ 。因此,  $\Delta V_e$  对输出电流的影响和  $\Delta V_g$  的影响是相同的。

### 3 实验结果

由式(9)和(11)可知, 要想获得稳定度优于  $10^{-6}$  的电流源, 可适当地选择元器件(如高精度基准电压源和高精度采样电阻), 合理地布线, 使各种不利因素影响尽量减小, 以达到恒流源的整体性能要求。

据此, 本 LD 恒流源器件选用如下: 调整管选用 BSS149, 其  $g_m$  典型值为  $0.01\text{A/V}$ , 使用 PSPICE 软件测试得  $r_{ds}$  典型值为  $10^6\Omega$ 。精密基准电压选用 LM399, 其输出电压为  $6.95\text{V}$ , 具有  $1\text{PPM}/^\circ\text{C}$  的温度稳定性和  $1\text{PPM}/\text{HRS}$  的时间稳定性。集成运算放大器选用 OP27A, 其输入失调电压温漂为  $0.2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , 输入失调电压为  $0.2\mu\text{V}$ , 噪声电压最大值为  $0.25\mu\text{V}$ , 开环差模电压增益为  $100\text{dB}$  以上。取样电阻选取温度参数和时效变化小的金属膜电阻( $0.1\%$  高精度, 温度稳定性  $5\text{PPM}/^\circ\text{C}$ )。

若  $A_{u1}=R_f/R_1=10$ ,  $A_{u2}=10^5$ ,  $R_0=1\Omega$ ,  $I_D=50\text{mA}$  时, 由式(9)和式(11)可知, 电源电压  $\Delta V_{DD}$  对恒流源的性能影响  $\frac{\Delta I_D}{I_D} = \frac{1}{A_{u1}A_{u2}g_m R_0 r_{ds}} \times \frac{\Delta V_{DD}}{I_D} < 2 \times 10^{-13} \times \Delta V_{DD}$ , 可见其影响可忽略; MOS 管参数对恒流源的性能影响分别为

$$\frac{\Delta I_D}{I_D} = \frac{1}{A_{u1}A_{u2}g_m R_0 r_{ds}} \Delta R_L < 10^{-10} \Delta R_L \text{ 和 } \frac{\Delta I_D}{I_D} < 2.5 \times 10^{-7}$$

$\text{A}/^\circ\text{C}$ ; 基准电压源性能( $\Delta V_g < 5 \times 10^{-7}$ )对恒流源的性能影响为

$$\frac{\Delta I_D}{I_D} \approx \frac{\Delta V_g}{I_D R_0 \times R_f / R_1} < 10^{-6}$$

我们对所设计恒流源的稳定性进行了实际测量, 使用的测量仪器是 SDB-1 型 6 位半数字电压表(基本精度: 直流电压  $0.005\%$ ), 测试点为图 1 中的 A 点。测试结果表明, 在系统开启 20 分钟后, 输出电流分别为  $50\text{mA}$  和  $150\text{mA}$  时, 测得 1 小时内电流变化量分别小于  $0.1\mu\text{A}$  和  $0.9\mu\text{A}$ , 相应的电流稳定度分别

为  $2.0 \times 10^{-6}$  和  $6.0 \times 10^{-6}$ , 符合设计要求。

另外, 利用本恒流源驱动 LD 进行了铷原子 D2 线的观察实验工作, 进一步检测恒流源的稳定性和可靠性。实验中, 在温控电路精密控制下(温度为  $307\text{K}$ , 稳定度为  $0.01\text{k}$ ), 利用本恒流源驱动波长为  $780\text{nm}$  的半导体激光管, 通过注入电流的扫描, 观察冲有  $1.3\text{kPa}$  缓冲气体  $\text{N}_2$  的自然铷( $^{85}\text{Rb} + ^{87}\text{Rb}$ )泡室中铷 D2 线的吸收谱(自然铷泡室温度为  $45^\circ\text{C}$  左右)。图 3 是实验装置, 图 4 是所观察到的( $^{85}\text{Rb}$  和  $^{87}\text{Rb}$ )和  $87\text{Rb}$ ( $^{87}\text{A}$  和  $^{87}\text{B}$ )的 D2 超精细吸收谱线。D2 超精细吸收谱线观察结果表明, 本恒流源电流的稳定度可达到  $10^{-6}$  量级。

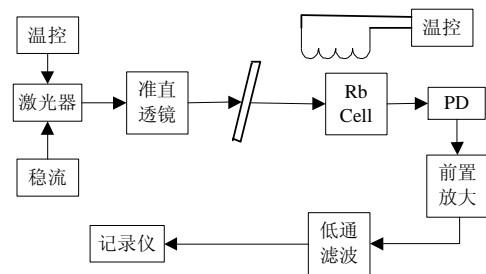


图 3 铷原子 D2 吸收谱线观察实验原理框图  
Fig.3 Functional diagram of experiment set up

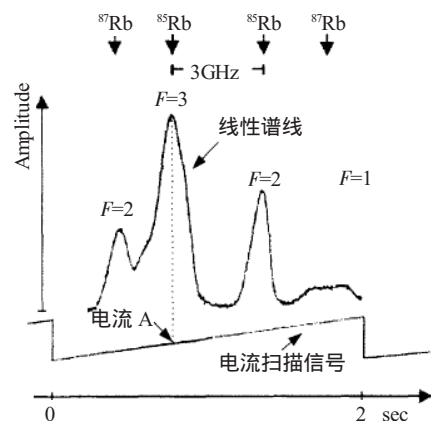


图 4 铷原子 D2 吸收谱线

Fig.4 D2-line in cell of natural Rubidium

### 4 结论

本文针对 LD 恒电流驱动电路的负载、温度特性以及稳定精度的要求, 优化设计了基于集成运放负反馈型的 LD 恒流驱动电路。经实际使用测试, 本 LD 恒流驱动电路的稳定性和可靠性达到了 LD 工作的技术要求, 能保证 LD 的安全和发射波长的稳定性。

### 参考文献

- [1] Kristan L, Corwin, Lu Z, T, et al. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor [J]. Applied (下转第 80 页)

依据前述分析过程 输出电压可写为：

$$V_o = A_m V_{ref} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta R}{R}$$

式中  $\Delta R_i \ll R (i=1, 2, \dots, n)$   $A_m = \frac{R_f}{R}$

### 3 非理想电路分析

图5(a)所示为集成高速模数转换器件AD844输入级和TZ端的内部等效电路  $R_{in}$ 为输入缓冲器电阻,取值为几十欧姆  $R_i$ 很大,可达几兆欧。理想情况下  $R_{in}=0$   $R_i=\infty$ 。非理想情况下的电路工作状态分析如下：

定义CCH+电流转换误差为  $\varepsilon_i$ , 则  $I_z = (1 - \varepsilon_i) I_x$ , 当  $V_y = 0$  时,  $V_{off}^{cc}$ 为在X端产生的偏移电压。由于电流传输器的两个输入端的不对称性,假设电压运放有一个偏移电压  $V_{off}^{op}$ , 则非理想情况检测电路的等效电路如图5(b)所示。

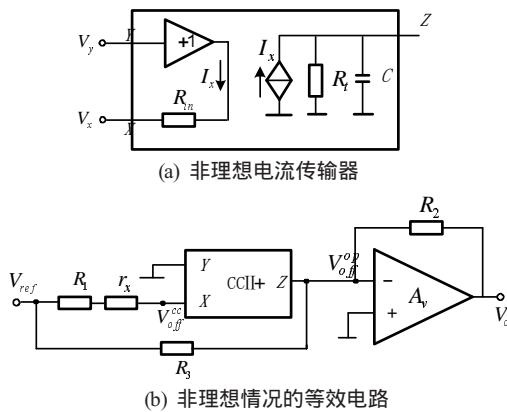


图5 非理想电流传输器及检测等效电路

Fig.5 Nonideal Current Conveyor and equivalent circuit

分析电路可以得到：

$$I_z = \frac{V_{ref} - V_{off}^{op}}{R_3} + \frac{V_o - V_{off}^{op}}{R_2} = (1 - \varepsilon_i) I_x = (1 - \varepsilon_i) \frac{V_{ref} - V_{off}^{cc}}{R_1 + R_{in}}$$

整理后得：

(上接第 77 页)

Optics, 1998, 37(15):3295-3298.

[2] 李发泉, 王玉平, 程学武. 稳频半导体激光器的温度控制技术[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(3): 29-31.

LI Fa-quan, WANG Yu-ping, CHENG Xue-wu. Technique of Temperature Control for Diode Laser Frequency Stabilization [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(3): 29-31.

[3] 姜洪雨. 一种新型高精度高温稳定性恒流源研究[J]. 现代电子技术, 2008, 277(14):2-5.

JIANG Hongyu, Research of a New Type of Constant Current Source with High precision and High Temperature Stability [J]. Modern Electronics

Technique, 2008, 277(14):2-5.

[4] 杨孟琢. 反馈放大器的稳定性理论及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992:87-109.

[5] 秦世才, 高清运. 现代模拟集成电子学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 50-54.

作者简介：

涂用军(1963-), 男, 副教授, 博士生, 主要研究方向非线性系统理论及功率电子学。Email: tu1668@163.com

收稿日期 2009-02-15

(常会敏 编发)

$$V_o = -R_2 \left( \frac{1}{R_3} - \frac{1 - \varepsilon_i}{R_1 + R_{in}} \right) V_{ref} - \frac{R_2(1 - \varepsilon_i)}{R_1 + R_{in}} V_{off}^{cc} + \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right) V_{off}^{op}$$

若  $R_{in} \cong 0$  则：

$$V_o = -R_2 \left( \frac{1}{R_3} - \frac{1 - \varepsilon_i}{R_1} \right) V_{ref} - \frac{R_2(1 - \varepsilon_i)}{R_1} V_{off}^{cc} + \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right) V_{off}^{op}$$

由上式可以看出 输出电压与  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和电流转换误差  $\varepsilon_i$  的值有关 式中比值  $R_2/R_1$  和  $R_2/R_3$  可用来减小偏移电压的影响。

### 4 结论

基于电流传输器设计的混合型电阻桥检测电路与传统的电压型电路相比, 组成电桥的器件减少, 只用了两个电阻, 是传统桥式电路的一半, 降低了电桥的复杂性; 基本输出电压增大, 是电压型电阻桥的四倍; 可适用于多个传感器的检测而不需附加电路, 电路中没有共模输入信号, 对电路器件的要求降低, 同时提高了电路抗干扰的能力。由于电流传输器是一种高速、低功耗器件, 因此降低了检测电路的功耗。利用电流模技术设计的电流传输器实现了对传统电阻桥电路的改进, 所设计的电路结构简单、精度高、功耗低, 在实际应用中具有推广和使用价值。

### 参考文献

[1] 李琳. 电流传输器及其应用[J]. 计量与测试技术, 2004 (8): 29-30.

[2] 杨韵漪, 萧蕴诗, KOCA&Oumlml. 基于等价CC 结构的电压型/电流型转换方法[J]. 现代电子技术, 2007 (11): 168-171.

[3] 孙泳, 来逢昌. 电流模ADC发展概况与趋势[J]. 电子技术应用, 2008, (7): 6-9.

[4] Stephan Gift, Brent Maundy. New Configuration for the Measurement of Small Resistance Changes. IEEE Transaction on Circuits and Systems- Express Briefs, Volume. 53, NO.3, March 2006.

作者简介：

苏丽华(1968-), 女, 汉族, 黑龙江鸡西人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为电子及自动控制技术。Email: sulihua68@126.com

赵可萍(1960-), 女, 汉族, 天津人, 高级实验师, 主要从事实验教学和电子技术应用的研究。Email: kepingzhao6@126.com

收稿日期 2008-11-13

(常会敏 编发)