

可调恒流管温度特性的研究

吕品桢 单郑生 汤子康

(杭州大学物理系)

1984年5月23日收到

提高温度稳定性是恒流器件的一个重要而比较困难的问题。本文通过对一种含 CRD 恒流源的分析,给出温度系数和零温度系数点电流的基本表达式,从而提出解决温度稳定性问题的一种简单而有效的途径。

根据上述原理设计的可调恒流管已作了实验观测。测试结果与理论曲线基本一致。实验表明:该器件的电流温度系数可低于 $5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,较一般场效应恒流管降低二个数量级;并且,具有低温度系数区比较宽、零温度系数电流可调节等优点。

一、问题的提出

一个高性能恒流源,应当提供基本上不随输入电压、工作温度、负载以及其他外界因素而变化的恒定电流。由于它处于直流工作状态,热效应所引起的温度变化与慢漂移问题显得突出。所以,低温度系数指标对优质恒流源具有特殊意义。

目前,数毫安以下的小电流恒流源已愈来愈普遍地采用场效应恒流二极管(简称 CRD)。它具有动态电阻高、使用方便等诸多优点,但温度性能不理想,在电流标称值 0.1—7mA 范围内,温度系数一般为 $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 量级,因而限制了它在精密电路中的应用。图 1 给出 CRD 的标准系列产品(1N5283-5314)温度系数随电流的变化关系。中间曲线为典型值,上下两条曲线表示离散范围。国内 2DH 系列产品也给出大致相同的结果。目前国外采用精细版图结构,通过增大导电沟道宽长比发展了低温度系数的 CRD 系列。例如美国 Siliconix 公司的 CR022~470 系列产品,其温度系数已降到 $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 量级。



图 1 C_T-I_H 关系曲线
 $T = +25^{\circ}\text{C} \rightarrow 150^{\circ}\text{C}$, $V = 15\text{V}$

要进一步降低温度系数已受到 CRD 物理机构^[1,2]本身的限制。因此,需从机理上探索获得低温度系数电流的其他可能性。例如根据带隙基准原理^[3,4]组成的恒流源电路,现已受到日益广泛的关注。本文通过对一种含 CRD 的恒流电路进行分析讨论,导出温度系数和零温度系数电流的基本表达式,从而提出设计一种电流可连续调节的恒流器件——

可调恒流管。它具有恒定电流大、稳定性高、电流连续可调等特点,同时,结构简单、调试很方便。数值计算表明:该器件不仅温度系数低,而且,温度系数随电流变化缓慢,因而低温度系数的电流区域相当宽。上述结果已为实验测试所证实。

二、基本原理

可调恒流管的工作原理如图2所示。 Q_z 为集成化稳压管， D_H 为场效应恒流管， Q 、 R_G 分别为晶体管及其射极电阻。由于这一恒流电路^[5,6]采用CRD与稳压管串联所得的高稳定度基准电压来稳定晶体管基极电位，从而获得恒定的输出电流，所以电流稳定性远比一般晶体管恒流电路好；并且，通过改变 R_G 阻值可使电流在相当宽的范围内连续调节，这就是本电路用作可调恒流源的基本出发点。

若以 I 表示通过恒流电路的总电流， V 表示其两端的电压，并用 I_H 表示通过CRD的电流，则可得：

$$I = I_H + \frac{\beta}{\beta + 1} \left(\frac{V_z - V_{BE}}{R_G} \right) + I_{CBO}. \quad (1)$$

由于硅晶体管的反向饱和电流很小， I_{CBO} 与前两项相比可以忽略不计。

$$I = I_H + \frac{\beta}{\beta + 1} \left(\frac{V_z - V_{BE}}{R_G} \right). \quad (2)$$

上式中， V_z 、 V_{BE} 、 I_H 对电压的变化都是很不敏感的，所以电流 I 对电压变动的稳定性相当好。但它们都是温度的函数，因此，我们从(2)式出发推导电流温度系数的基本表达式，然后进行分析讨论。

将(2)式对温度求偏导数，得

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial T} &= \frac{\partial I_H}{\partial T} + \frac{\beta}{\beta + 1} \frac{1}{R_G} \left(\frac{\partial V_z}{\partial T} - \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \right) \\ &\quad - \frac{\beta}{\beta + 1} \left(\frac{V_z - V_{BE}}{R_G^2} \right) \frac{\partial R_G}{\partial T} + \frac{V_z - V_{BE}}{R_G(\beta + 1)^2} \frac{\partial \beta}{\partial T}, \end{aligned} \quad (3)$$

在 β 值不是很小的情况下，(3)式末项可以忽略。此外，由于 Q_z 的稳定电压 V_z 为一复合变量函数，即

$$V_z = f(I_z, T), \text{ 又 } I_z = \phi(T)$$

因而可得

$$\frac{\partial V_z}{\partial T} = \frac{\partial f(I_z, T)}{\partial I_z} \cdot \frac{\partial I_z}{\partial I_H} \cdot \frac{\partial I_H}{\partial T} + \frac{\partial f(I_z, T)}{\partial T}, \quad (4)$$

不难证明

$$\frac{\partial I_z}{\partial I_H} = 1.$$

又根据CRD温度系数的定义

$$C_{TH} = \frac{1}{I_H} \cdot \frac{\partial I_H}{\partial T},$$

$$\therefore \frac{\partial V_z}{\partial T} = r_z \cdot C_{TH} \cdot I_H + C_{TV} \cdot V_{z*}. \quad (5)$$

故得恒流电路电流温度系数的基本表达式：

$$C_T = \frac{\beta}{(\beta + 1)} \cdot \frac{1}{I \cdot R_G} \left[C_{TH} \cdot I_H \left(\frac{\beta + 1}{\beta} R_G + r_z \right) \right]$$

$$+ C_{TV} \cdot V_z - \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} - (V_z - V_{BE}) C_{TR} \Big]. \quad (6)$$

为简化讨论, R_G 选用低温度系数精密电阻, 可忽略其温度效应。因此

$$\begin{aligned} C_T \approx & \frac{\beta}{(\beta+1)} \cdot \frac{1}{I \cdot R_G} \left[C_{TH} \cdot I_H \left(\frac{\beta+1}{\beta} R_G + r_z \right) \right. \\ & \left. - \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} + C_{TV} \cdot V_z \right], \end{aligned} \quad (7)$$

若令

$$C_T = 0$$

则得零温度系数 (ZTC) 点电流的表达式

$$I_0 = \left\{ I_H - \frac{C_{TH} \cdot I_H \cdot (V_z - V_{BE})}{\left[C_{TH} \cdot I_H \cdot r_z - \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} + C_{TV} \cdot V_z \right]} \right\}. \quad (8)$$

式中 C_{TV} 、 r_z 为稳压管电压温度系数和动态电阻。下面我们针对 (7) 式进行分析讨论。

1. 首先对第一项中与温度密切相关的参数 C_{TH} 作具体分析。众所周知, CRD 是一种长沟道结型场效应晶体管。场效应管饱和区漏极电流 I_{DSS} 随温度的变化是由迁移率 μ 和栅结自建电势差 ϕ 的温度效应所引起的^[2]。对于 N 型沟道, 在栅结为单边突变结、栅-源短路等条件下, 下列关系成立:

$$\Delta I_{DSS} = \left(\frac{I_{DSS}}{\mu_n} \frac{\partial \mu_n}{\partial T} - g_m \frac{\partial \phi}{\partial T} \right) \cdot \Delta T \quad (9)$$

或

$$C_{TH} = \left(\frac{1}{\mu_n} \cdot \frac{\partial \mu_n}{\partial T} \right) - \left(\frac{g_m}{I_H} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial T} \right). \quad (10)$$

其中

$$I_H = I_P \left[1 - 3 \frac{\phi}{(V_P + \phi)} + 2 \left(\frac{\phi}{V_P + \phi} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (11)$$

$$g_m = 3 \frac{I_P}{(V_P + \phi)} \left[1 - \left(\frac{\phi}{V_P + \phi} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (12)$$

$$I_P = \frac{2\mu_n q^2 N_D^2}{6\epsilon_s \epsilon_0} \cdot a^3 \cdot \frac{Z}{L}, \quad (13)$$

$$V_P = \frac{qN_D}{2\epsilon_s \epsilon_0} \cdot a^2 - \phi. \quad (14)$$

式中 I_P 、 V_P 通常叫做夹断电流和夹断电压。 N_D 是沟道区杂质浓度, L 、 Z 、 $2a$ 是沟道的长度、宽度和厚度。(10) 中两个独立的温度变化参数作用相反, 但随着沟道厚度和杂质浓度的增大, 后项对前项的温度补偿作用将越弱。因此, 电流为毫安级的 CRD 均为负温度系数。

2. 考察 (7) 式的第二、三项

由于

$$\frac{dV_{BE}}{dT} = - \left[\frac{E_{g0}/q - V_{BE}}{T} + \frac{3k}{q} \right], \quad (15)$$

在常温条件下, 硅晶体管发射结正向压降随温度的变化率约为 $-2mV/^\circ C$ 。第三项中的

C_{TV} 系与击穿机构有关, 如果设计合理, 可使 $C_{TV} > 0$, 且满足 $C_{TV} \cdot V_z \ll \left| \frac{dV_{BE}}{dT} \right|$ 。

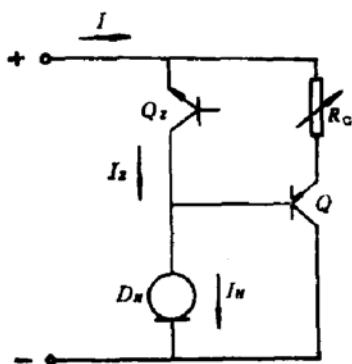


图 2

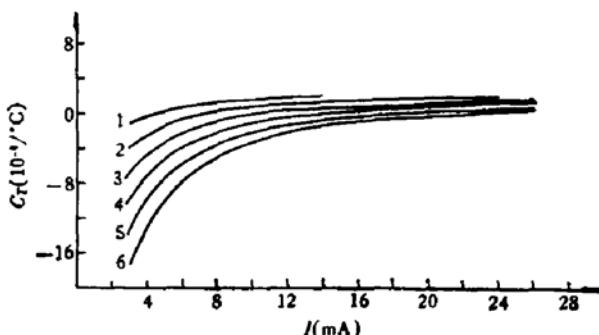


图 3

3. 从上述分析可见, 利用(7)式后两项可对首项的负温度系数进行有效的温度补偿, 这正是我们所期待的。由于 $\frac{dV_{BE}}{dT}$ 与器件的结构参数无关, 而首项与 a 、 R_G 有关, 这就提供了通过器件内部参数的设计和 R_G 阻值的调节获得最佳温度补偿的可能性。

为更清晰地阐明上述论点, 我们结合具体设计方案对(7)式所表示的关系式进行了数值计算。本文图 3 给出几组典型的计算结果, 曲线 1—曲线 6 是 C_{TH} 取六个不同数值时的 C_T-I 关系曲线, 它们所对应的 C_{TH} 值分别为 -1.9×10^{-3} 、 -2.4×10^{-3} 、 -2.8×10^{-3} 、 -3.1×10^{-3} 、 -3.4×10^{-3} 和 -3.6×10^{-3} 。

从图 3 可见, 诸曲线的零温度系数点是递变的。而且, 在 ZTC 点附近曲线比较平坦, 正符合实用要求。

ZTC 点的电流 I_0 可用(8)式进行计算, 根据我们所给的条件, I_0 值小可达 4.5 mA, 大可至 100 mA 以上。

三、实验结果和讨论

1. 样管

根据图 2 所示的基本原理以及实用需要而设计的可调恒流管是一种三端器件。其三端分别称为阳极(A)、阴极(C)和控制极(G)。电阻 R_G 我们选用精密可调电阻, 外接于可调恒流管的阳极与控制极之间。通过改变它的阻值实现恒定电流值的连续调节。

我们已对数百支样管进行了常温区温度特性的测试。实验样管的电流范围为 3—50 mA (分别取自 3DH01、3DH02 两种型号)。测试数据表明与数值计算结果基本相符。此外, 还从多批样管中各选取少量样管进行了宽温区的特性测试, 实验结果如后所述。

2. 测试电原理图

测试原理如图 4 所示。虚线框内的图形符号代表可调恒流管。测试时将它的 A 极、C 极与直流电源、负载 R_L 作串联连接。 V_1 为一般数字电压表, 用以监测 A、C 两极间的工作电压。 V_2 为 6 位数字电压表, 通过测量 R_L (选用标准电阻) 两端的电压得可调恒流管恒定电流。用高、低温恒温箱改变温度, 本实验的温度变化范围为 -50°C — $+70^{\circ}\text{C}$, 温度计分辨率为 $1/10^{\circ}\text{C}$, 基本上满足实验要求。测试方法见部标准(SJ2151-82)。

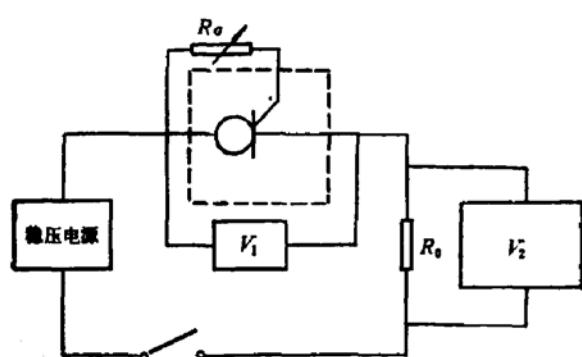


图 4

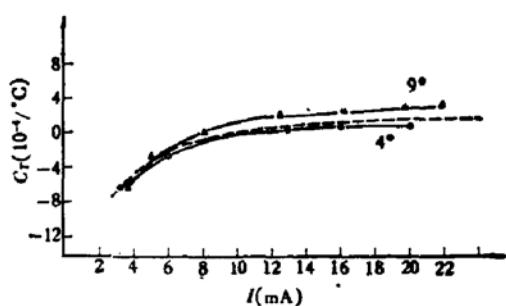


图 5

3. 实验测试结果

我们在不同的测试设备与仪器条件下进行了 C_T-I 和 C_T-T 关系的精密测量。兹例举主要实验测试结果如下。

(1) C_T-I 关系曲线

图 5 给出 4#、9# 样管的 C_T-I 实验曲线。它表明可调恒流管存在零温度系数点。当 $I > I_0$ 时, 温度系数为正; 当 $I < I_0$ 时, 温度系数为负。图中虚线是理论计算结果。图 5 表明实验曲线和理论结果基本相符。

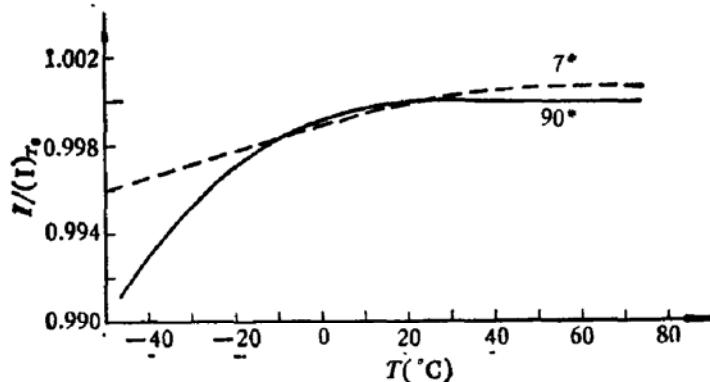


图 6

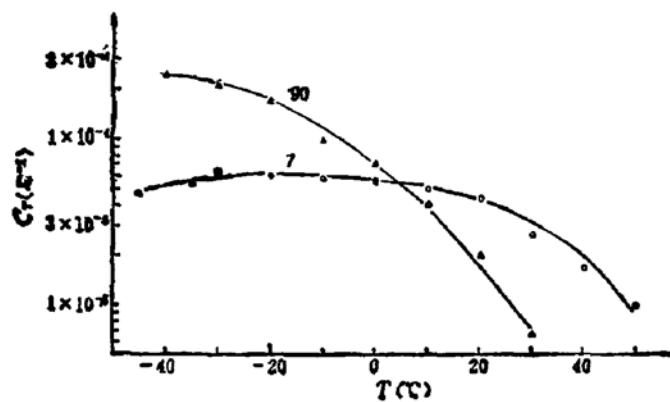


图 7

值得指出的是大于 I_0 的电流区域, 曲线比较平坦, 温度特性相当好; 而低于 I_0 的电流

区域，温度系数随电流变化比较快， $|C_T|$ 值比较大，温度特性比较差。

我们在表1、表2中具体给出4#以及10#样管的实验测试数据。从所列的典型数据和图5都可看到：在ZTC点附近低温度系数电流区域相当宽。满足 $|C_T| < 1 \times 10^{-4}/\text{℃}$ 设定要求的电流区宽度在5mA以上，有的样管超过10mA，比CRD的低温度系数电流区（一般都小于0.3mA）要宽得多。

(2) C_T-T 关系曲线

为阐明可调恒流管的宽温区特性，我们选取在常温条件下处于低温度系数运用状态的一批样管，用稳态法测量 I 随 T 的变化关系。环境温度从-50℃—+70℃，两次测量的温度间隔为2℃。图6给出7#、90#样管的实验曲线，其纵坐标用室温(24℃)电流作归一化处理。图7所示 C_T-T 曲线是根据图6作出的。其他样管的测试也给出基本一致的结果。

图6、图7表明：常温时处于低温度系数运用状态的样管若在高温区使用，其温度系数仍相当小；如若在低温区使用，其温度系数明显增大，表明低温区的温度特性变差，但一般仍可满足 $|C_T| < 5 \times 10^{-4}/\text{℃}$ 的设定要求。

(3) 表3、表4列出3DH02型样管20#、37#的实验测试数据。电流测量采用高精度的7½位7075型数字电压表。测得它们的 I_0 值在16—18mA之间。

表1 3DH01-4#样管的 C_T-I 关系($T_0 = 25^\circ\text{C}$, $T_1 = 60^\circ\text{C}$)

$I(\text{mA})$	1.8965	3.2942	4.0775	6.0030	13.0080	15.9820	20.1118
$C_T(10^{-4}/\text{℃})$	-14.07	-6.539	-5.174	-2.776	0.2385	0.4182	0.62131

表2 3DH01-10#样管的 C_T-I 关系($T_0 = 25^\circ\text{C}$, $T_1 = 60^\circ\text{C}$)

$I(\text{mA})$	3.4003	5.0082	7.5046	10.0130	12.4955	15.0628	17.5145	20.0346
$C_T(10^{-4}/\text{℃})$	-3.831	-1.499	-0.8799	-0.1298	0.1200	0.5841	0.6221	2.246

表3 3DH02-20#样管的 C_T-I 关系

$T(\text{℃})$	25	65	25	35	25	52
$I(\text{mA})$	15.2523	15.2393	16.0604	16.0603	17.5593	17.5675
$C_T(10^{-4}/\text{℃})$	-0.2131		-0.006226		0.1729	

$$\text{电流稳定性 } \frac{\Delta I}{I} \approx 6.5 \times 10^{-4} \quad (\text{当 } \frac{\Delta V}{V} = \pm 10\% \text{ 时})$$

表4 3DH02-37#样管的 C_T-I 关系

$T(\text{℃})$	25	48	25	55	25	45
$I(\text{mA})$	5.58256	5.50797	10.03034	9.96831	17.7491	17.7492
$C_T(10^{-4}/\text{℃})$	-5.809		-2.061		0.002817	

$$\text{电流稳定性 } \frac{\Delta I}{I} \approx 6.3 \times 10^{-4} \quad (\text{当 } \frac{\Delta V}{V} = \pm 10\% \text{ 时})$$

四、结语

根据上述的分析和论证可以作出判断，本文关于提高温度稳定性基本设想是可行的。由于可调恒流管改善了内部温度补偿，使温度系数降低到 $5 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 以下，并且低温度系数电流区相当宽。它为提高恒定电流的温度稳定性提供了一种可供选择的简单而有效的途径。

此外，根据(8)式计算，可调恒流管的零温度系数电流可以比 CRD 提高一至二个数量级。并且， I_0 是可以设计的，故可大幅度延伸恒定电流的范围。因此，可望该器件作为一种大电流恒流器件，与国内定型产品 2DH 系列相互衔接，互为补充。这对于扩展恒流器件的应用具有积极意义。

本项工作在实验测试过程中得到中国计量科学院于百江、上海电器科学研究所胡炜禾与杭州无线电二厂吴时君等同志的大力帮助，有的工作是在本教研室同志的大力支持帮助下进行的，谨此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] R. M. Warnar, W. H. Jackson, E. I. Doucette and H. A. Stone, *PIRE*, 47, 44(1959).
- [2] J. A. Hoerni and B. Weir, *PIEEE*, 51, 1058(1963).
- [3] R. J. Widlar, *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. SC-6, 2(1971).
- [4] A. P. Brokaw, *IEEE J. Solid-State Circuits*, SC-9, 388(1974).
- [5] R. M. Warnar, *Electron. Design*, 11, 54(1963).
- [6] P. Williams, *Ind. Electron.*, 6, 190(1968).

On the Temperature Characteristic of Adjustable Current Regulator

Lü Pinzhen, Shan Zhengsheng and Tang Zikang

(Department of Physics, Hangzhou University)

Abstract

To improve the temperature stability of current regulator diodes (CRD) is one of the most important and difficult problems in their design and production. Through the analysis of a constant-current regulator with CRD, fundamental formulas are derived for temperature coefficient and for current value at the operating point of zero temperature coefficient, thus giving a simple but effective method to solve the problem.

Experiments have been made on the adjustable current regulator based on the above mentioned principle, and the data agree with theoretical curves. The results indicate that the current temperature coefficient of such a device is lower by two orders of magnitude than the usual CRD, and that the device has such advantages as broad current range of low temperature coefficients and adjustability of current at the operating point of zero temperature coefficient.