

# 0.1A~8A 高稳定性恒流器件研究

吕品桢 范雅俊 洪云翔 吴荣权 徐信业 魏海波

(杭州大学电子工程系 杭州 310028)

**摘要** 提高温度稳定性和展宽恒定电流范围是当前恒流器件应用中的两个突出问题。现有根据长沟道场效应原理制备的两端恒流器件,由于工作机理限制已难指望在上述问题上取得有效的进展。本文介绍一种恒流源电路的模块设计思路,新近研制了在很宽电流范围内连续可调的新恒流器件。测试结果表明,该器件样管的输出电流可达0.1A~8A,电流温度系数低达 $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ — $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ,起始电压低于0.4V,是一种输出电流范围又宽、稳定性又高的高性能器件。

**关键词** 恒流器件,恒流电路,模块,电流温度系数,起始电压

## 1 前言

由 R. M. Warnar 等最先提出和发展的场效应恒流二极管<sup>[1,2]</sup> (CRD) 已在不少电子技术领域获得应用。但由于电流值偏小,温度性能也不够理想( $\alpha$  值一般为 $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 量级),使它只能用于性能指标要求不高的小电流范围。随着现代技术的发展,恒流源的应用日益广泛,提高电流容量和降低电流温度系数已成为当前恒流器件应用中的两个至关重要的研究课题。

国内外商品化恒流器件已有十多个系列产品,但其电流上限值只51mA。更大电流的恒流源虽可采用双极型晶体管或集成电路与元器件组成各种结构和组态的电子线路<sup>[3]</sup>、电子仪器,以满足专用的需要。然而,大电流通用恒流器件的研制和开发仍是电子应用技术所需要和期待的。

本文提出一种优化设计的恒流模块,已研制成的恒流源器件,最大输出电流可达8A以上,且电流可从零开始连续可调。它不仅电流容量大,而且在电流稳定度、温度系数以及起始电压等主要指标上均具有优异性能,可广泛用于传统的恒流器件所未能涉足的技术领域,有效地拓宽了恒流器件应用范围。

## 2 原理

恒流模块系根据带有放大环节的反馈调整型恒流电路原理制成,其工作原理框图如图1所示。它由基准电压源、比较放大器、调整单元和采样单元等几部分构成。直流电源的电压扰动所引起输出电流的变化通过内部负反馈得到抑制。比较放大器需选用低漂

1993-05-12 收到,1993-11-05 定稿

吕品桢 男,1935年生,副教授,一直从事半导体物理和半导体器件的教学和科学研究工作。

范雅俊 男,1941年生,副教授,一直从事无线电专业方面的教学工作和电子线路设计方面的研究工作。

移高增益运算放大器。调整单元决定模块的输出电流容量和主要电性能,通常采用低频大功率管或达林顿管,亦可采用 MOST 或 IGT 等功率器件,可视不同使用要求具体选取。本文以短沟道增强型 N 沟 VDMOS FET 作调整管进行分析讨论。

### 2.1 MOST 的饱和区静态特性

根据 MOSFET 的热电子模型,在同时计及电场  $E_x$  和  $E_y$  对沟道载流子影响的情况下,可求得饱和区静态漏特性的精确表达式<sup>[4]</sup>:

$$I_{DS} = \frac{C_{ox} \bar{\mu}_{n0} Z E_{cy}}{1 + \theta (V_{GS} - V_T)} \{ [E_{cy}^2 L^2 (1 + \gamma)^2 + (V_{GS} - V_T)^2]^{1/2} - E_{cy} L (1 + \gamma) \}, \quad (1)$$

$$V_{DSat} = \frac{(V_{GS} - V_T)}{1 + \gamma} + E_{cy} L - \left[ \left( \frac{V_{GS} - V_T}{1 + \gamma} \right)^2 + E_{cy}^2 L^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中

$$\gamma = \frac{1}{C_{ox}} \left[ \frac{q N_A \epsilon_s \epsilon_0}{2(2|\phi_F| + |V_{BS}|)} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\theta = \frac{C_{ox}}{2 \epsilon_s \epsilon_0 E_{cx}}, \quad (4)$$

分别表示耗尽层电荷  $Q_B$  的二级近似和横向电场  $E_x$  对电子迁移率的影响。参数  $L, Z$  为 MOST 的沟道长度和宽度。

为简化讨论,令  $\gamma = 0$  (将  $Q_B$  取一级近似), 并设  $\theta(V_{GS} - V_T) \ll 1$  (即只考虑  $E_x$  对电子迁移率的影响)。当沟道长度很短,满足条件

$$(E_{cy} L)^2 \ll (V_{GS} - V_T)^2$$

时,可从(1),(2)式求得简化公式:

$$I_{DS} \approx C_{ox} Z \bar{\mu}_{n0} (V_{GS} - V_T), \quad (5)$$

$$V_{DSat} \approx E_{cy} L, \quad (6)$$

并得饱和区跨导

$$g_{ms} \approx C_{ox} Z \bar{\mu}_{n0}. \quad (7)$$

由此可见,短沟道 MOS 管的跨导是近似与  $L, V_{GS}$  无关的常数。饱和漏电流与栅源电压  $V_{GS}$  成正比关系。所以,短沟道 MOS 功率器件比长沟道 MOST ( $I_{DS}-V_{GS}$  成平方律关系)和双极型功率晶体管更具优势。

### 2.2 基准电压源

基准电压源是直接影响恒流模块性能指标的又一关键环节。输出电流的稳定度、温度系数、器件的起始电压无一不受基准电压源影响,特别是起始电压的降低几乎可以说主要受制于基准电压的最小可能值。经反复试验,我们发现并应用了可调恒流管潜在的特点,设计成甚低温度系数的低压基准源。基本上满足了模块设计的指标要求。

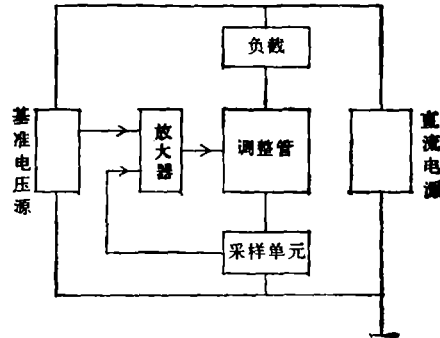


图1 恒流源框图

2.3 器件输出电流的基本表达式

图 2 给出恒流器件的基本电路。由低电流恒流管与电阻  $R_r$  构成基准源, 采样电阻

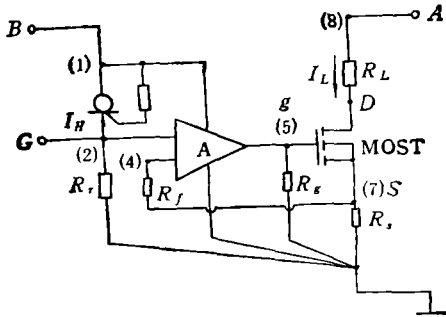


图 2 基本电路图

$R_r$  与  $R_f$  组成采样单元, 负载电阻  $R_L$  与 VMOST 和  $R_i$  串接成主回路。设  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_g$  和  $V_s$  分别为图 2 中 A, B, g, s 诸接点对地的电势差;  $V_{id}$ ,  $V_{ic}$  是运放差动输入电压和共模输入电压,  $A_d$  为开环增益,  $R_o$  为运放输出电阻; 则输出电流为

$$I_L = I_{DS} = g_{m1}[(V_g - V_s) - V_T] \quad (8)$$

若同时计及运算放大器的失调电压  $V_{o1}$ , 失调电流  $I_{o1}$  和 CMRR 的影响, 则

可导出  $I_L$  基本表达式:

$$I_L = \frac{C_1 R_{m1}}{1 + g_{m1} R_i [1 + C_1 (1 - C_1)]} \left\{ (1 + C_1) I_H R_r + V_{o1} - \frac{V_T}{C_1} + I_B \left( C_3 - C_2 C_4 + \frac{R_s}{C_1} \right) - \frac{1}{2} I_{o1} \left( C_2 - C_1 C_4 + \frac{R_i}{C_1} \right) \right\} \quad (9)$$

式中

$$C_1 = A_d \cdot R_s / (R_s + R_o), \quad C_2 = (R_s + R_f + R_r), \\ C_3 = R_s + R_f - R_r, \quad C_4 = 1/\text{CMRR}.$$

若选取低漂移高增益运放作比较放大器, 可近似视为理想运放, 并设定  $R_s \gg R_o$ , 则(9)式简化为

$$I_L \approx \frac{I_H R_r}{R_i} \quad (10)$$

可见输出电流基本上与 MOST 和运放参数无关, 且与  $R_r$  有简单的线性关系。(10)式是恒流模块调控和计算电流的基本公式。式中  $I_H$  是低压基准源的恒定工作电流。

3 电路静态特性的计算机模拟结果

恒流电路采用 SPICE 程序分析可得到输出特性曲线和各节点工作状态。分析结果可为电路优化设计提供判据。为便于分析电流特性, 令图 2 中的  $R_L = 0$ , 故  $V_A = V_D$ 。

3.1 输出特性曲线

我们以 4 A 的电路为例, 将实验电路的数据赋给 SPICE 程序中诸元器件模型参数。取其中基准源电流为 0.97 mA,  $R_r$  为 214  $\Omega$ , VMOST 开启电压  $V_T = 3.4$  V,  $g_{m1} =$

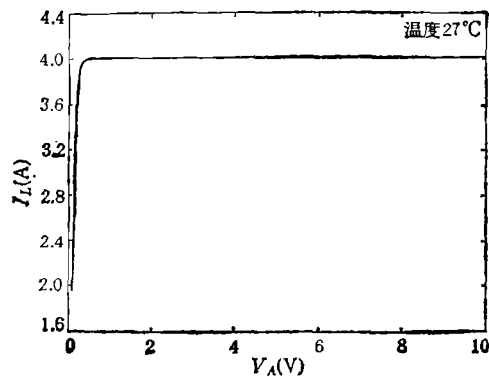


图 3

22S,  $R_{0s} = 0.028\Omega$ , 令偏置电压  $V_B = 7V$ , 取  $V_A$  变动范围从 0~10 V, 步长 0.1 V, 运行结果绘制出图 3 的曲线, 并给出诸节点电势如表 1 所示。

表 1

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	
模拟值(V)	9.0000	0.2075	0.2072	0.2071	4.2042	2.5000	0.20005	2.5000	$I_L = 4.009A$
实测值(V)	8.985	0.2065	0.2061	0.2080	4.210	2.5000	0.1930	2.5000	$I_L = 4.00A$

从图 3 可见, 当  $V_A$  达 0.3 V 后输出电流就达到恒定值。模拟所得的特性曲线、节点电势和起始电压值均与实测数据基本一致。连续改变  $I_H$  或  $R_r$  值所得的一系列特性曲线, 也都与实验测试结果相符。模拟结果还表明  $I_L$  从 1 A 变化到 8 A, 对应的起始电压差别不多。

### 3.2 $I_L$ - $V_r$ 关系曲线

为分析输出电流  $I_L$  随基准电压  $V_r$  的变化关系, 只需将 SPICE 程序中的循环变量  $V_A$  改变为  $V_r$  即可。运行结果得到图 4 所示的曲线。它表明  $I_L, V_r$  两者呈线性关系。求得其斜率为 19.972, 与实验直接测试结果符合得很好 ( $I_L$  值相当小的区域除外)。

此外, 若从理论表达式(9)式出发进行计算机数值模拟, 计算输出电流随每一参数值和温度的变化关系, 可给出各元器件参数的最佳范围和允许偏差。对此, 作者已在文献[5]中作了论述, 本文不再重复。

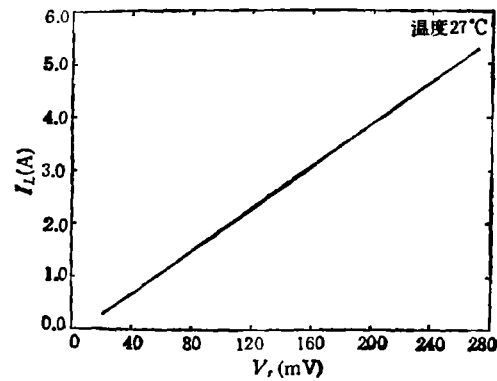


图 4

## 4 器件实验测试结果

### 4.1 样管

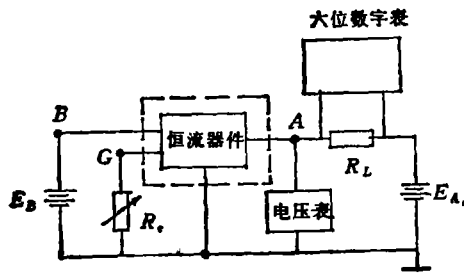


图 5

出电流可在 0.1~2A, 0.1~4A, 0.1~8A 范围内取任意值, 电流精密可调。

图 5 为器件测试线路连接图。根据百多只样管测试的统计结果, 达到下述主要技术

根据恒流源电路的模拟计算和诸元器件参数、外界条件对输出特性的影响确定优化设计方案。重点解决低压基准源和优质调整管, 并采用小型化集总元件; 在工艺上采取隔热和提高可靠性的措施, 以及消除低频干扰等方面攻克了不少技术难关, 制成模块结构的小型化安培级恒流器件样管。它在偏置电压 7~12V, 偏置电流 2~3 mA 条件下, 输

指标:

$$V_L: \leq 0.4V$$

$$\alpha (\text{定义为 } \Delta I / (I \Delta T)): 10^{-4}/^{\circ}\text{C} \sim 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$$

$$S (\text{定义为 } \Delta I / (I \Delta V_A)): 0.2\%/V \sim 0.01\%/V$$

$$V_{\max}: \geq 50V$$

#### 4.2 伏-安特性测试数据。

伏安特性和输出电流的稳定度的测量结果分别示于表 2 和表 3。

表 2

样管 160\* 偏置电压 7 V 设定电流 4 A  $T_A = 25^{\circ}\text{C}$

$V_A(V)$	0.250	0.500	0.750	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50
$I_L(A)$	3.0541	3.9785	3.9829	3.9837	3.9840	3.9837	3.9837	3.9840	3.9842
$V_A(V)$	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$I_L(A)$	3.9812	3.9843	3.9840	3.9841	3.9840	3.9841	3.9842	3.9845	3.9843

表 3

偏置电压=12 V,  $T_A = 25^{\circ}\text{C}$

$V(V)$		1.0	2.0	2.7	3.0	3.3	4.0	4.5	5.0
No. 467*	$I_L(A)$	5.9600	5.9622	5.9637	5.9648	5.9656	5.9677	5.9697	5.9710
	$S$	3.691	3.594	6.148	4.471	5.029	6.703	4.355	
No. 481*	$I_L(A)$	7.5549	7.5562		7.5585		7.5610		7.5695
	$S$	1.721		3.044		4.308		11.24	

注:  $S$  为输出电流稳定度 单位为  $(10^{-4}/V)$

表 4

样管 169\* 设定电流 4 A  $V_A = 2.00V$   $T_A = 25^{\circ}\text{C}$

$V_B(V)$	5.50	5.75	6.00	6.25	6.50	6.75	7.00	7.50	8.00
$I_L(A)$	0.4140	0.9532	1.81368	2.7825	3.9519	3.9565	3.9572	3.9586	3.9596
$V_B(V)$	8.50	9.00	9.50	10.0	10.50	11.00	11.50	12.00	
$I_L(A)$	3.9612	3.9621	3.9632	3.9644	3.9653	3.9662	3.9671	3.9682	

器件在良好散热的实验条件下,输出电流的稳定度一般可达  $10^{-4}/V$  量级。

#### 4.3 $I_L-V_B$ 关系的实验测试数据

仍以 4 A 的实验样管为例列出一组测试结果如表 4 所示。由此可见,在  $V_B = 7.0 \sim 12V$  范围内,可以认为输出电流不随偏置电压变化。

#### 4.4 起始电压的实测结果

起始电压  $V_L$  定义为器件输出电流从零上升到规定值 (一般规定为恒流值的 80%) 时, 器件 A-K 极间的正向压降。测量结果示于表 5。

表 5 起始电压  $V_L$  测试数据

样管编号	121*	126*	145*	160*	160*	164*	165*	182*	184*
$I_L(A)$	2	2	4	4	6	6	6	8	8
$V_L(V)$	0.37	0.40	0.31	0.31	0.32	0.35	0.33	0.35	0.32

#### 5 结束语

(1) 本项研究所制备的样管兼有输出电流大、电流稳定度高、温度性能比较好、调节简便等多项优势。它可与目前广为使用的场效应恒流管电流范围相衔接, 在电光源、电化学和微波功率电源等技术领域可望获得广泛应用。(2) 器件起始电压在 0.1A~8A 电流范围内都很低, 允许设置尽可能低的直流工作电压, 这对减小功率耗散具有积极意义, 随着输出电流的增大, 效果更加突出。(3) 鉴于器件输出电流可从零起调, 同时控制端电流仅为 2~3 mA, 从而提供了用微机或其他数字电路实现大电流自动调控的可能性。

**致谢** 本项研究的版图制备和投片工艺试验得到 871 厂与宁波无线电二厂的大力支持, 测试工作得到机电部 14 所浦善生和中国计量院于百江等同志的热情帮助, 谨此致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] Warnar R M, *et al.*, PIRE, 1959, 47(1): 44-56.
- [2] Sadahiro Aida. JEE, 1980, 17: 74-77.
- [3] 陈凯良, 竺树声编著. 恒流源及其应用电路, 杭州: 浙江科学技术出版社, 1992, 59-81.
- [4] 亢宝位编著. 场效应晶体管理论基础. 北京: 科学出版社, 1985, 243-253.
- [5] 徐信业, 吕品桢, 范雅俊, 杭州大学学报, 1993, 20 (增刊): 143-146.

### STUDY OF HIGH-STABILITY CURRENT REGULATORS FOR CURRENT FROM 0.1A TO 8A

Lu Pinzhen Fan Yajun Hong Yunxiang Wu Rongquan Xu Xinye Wei Haibo  
(Hangzhou University, Hangzhou 310008)

**Abstract** This paper introduces the designing thought of modular constant-current circuits and new-made current regulators with wide current range. Some data about the new device read as follows: current range is 0.1A~8A, current temperature coefficient is  $10^{-4} \sim 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ , limiting-voltage is lower than 0.4V. It is a kind of excellent device with both high stability and wide current range.

**Key words** Current regulator, Constant-current circuit, Modular, Current temperature coefficient, Limiting-voltage