



(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(21) Numéro de dépôt : **92403026.5**

(51) Int. Cl.⁵ : **G05F 3/26**

(22) Date de dépôt : **10.11.92**

(30) Priorité : **22.11.91 FR 9114405**

(43) Date de publication de la demande :
30.06.93 Bulletin 93/26

(84) Etats contractants désignés :
BE DE GB IT NL

(71) Demandeur : **THOMSON COMPOSANTS
MILITAIRES ET SPATIAUX
50, rue J.P. Timbaud
F-92402 Courbevoie (FR)**

(72) Inventeur : **Grasset, Jean-Charles
THOMSON-CSF, SCPI, 50, rue J.P. Timbaud
F-92402 Courbevoie Cedex (FR)**

(74) Mandataire : **Taboureau, James et al
THOMSON-CSF, SCPI, B.P. 329, 50, rue
Jean-Pierre Timbaud
F-92402 Courbevoie Cédex (FR)**

(54) **Miroir de courant à faible erreur de recopie.**

(57) L'invention concerne les miroirs de courant dans lesquels une forte erreur de recopie peut provenir de l'effondrement du gain de transistors.

Le miroir comprend dans sa branche de sortie (I_0) un amplificateur dit "Darlington" (10+11), contre-réactionné par un miroir buffé-risé (2 à 6). L'erreur s'annule pour un gain $\beta = 1$. Un second Darlington (12+13) monté symétriquement au premier permet d'équilibrer les V_{CE} des transistors (2,5).

Application aux miroirs de courant lorsque les transistors ont un gain faible (≈ 1).

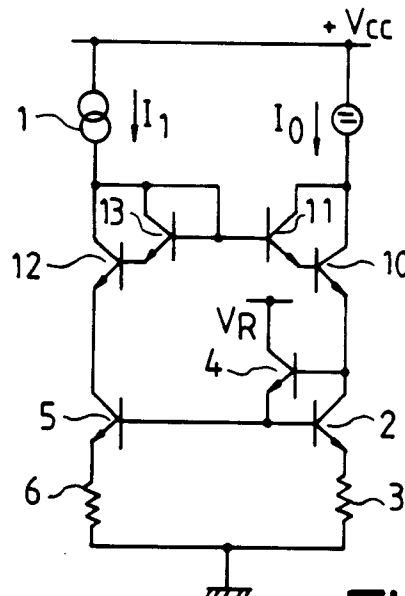


FIG. 4

La présente invention concerne un miroir de courant à transistors bipolaires, fonctionnant avec une bonne précision même si les transistors sont à très faible gain.

On sait que les transistors bipolaires ont des caractéristiques qui évoluent avec les conditions d'utilisation, ou même en cours de fabrication. En particulier, le gain, en courant, décroît lorsque la température diminue, ou sous l'effet d'un rayonnement lumineux ou particulaire. La perte de gain entraîne une erreur intrinsèque de recopie dans les miroirs de courant.

Un miroir de courant est un montage, tel que représenté en figure 1, qui permet de forcer à travers une seconde branche un courant I_o qui est, aux erreurs près, identique au courant I_1 qui circule à travers une première branche. La première branche comprend une source en courant 1, un transistor 2, dont le collecteur est réuni à la base, et une résistance 3 de contre-réaction. La seconde branche comprend un transistor 5 et une résistance 6 de contre-réaction. Les bases des deux transistors 2 et 5 sont réunies, de sorte que le courant I_1 qui circule dans la première branche commande le courant I_o forcé à travers une charge d'utilisation 7 dans la seconde branche.

Ce type de miroir de courant, simple, souffre d'une erreur intrinsèque de recopie, qui dépend du gain des transistors. En effet, pour un miroir de gain unité, dont les transistors 2 et 5 sont appariés en V_{BE} (tension base-émetteur) et les résistances 3 et 6 de contre-réaction sont appariées, l'erreur sur le gain du miroir s'exprime à travers l'équation :

$$I_o = I_1 [1 - 2/(\beta + 2)]$$

β étant le gain des transistors, le même pour les deux transistors puisqu'ils sont supposés identiques et dans les mêmes conditions de polarisation. L'erreur relative de recopie est égale à $-2/(\beta+2)$ et, dans la plupart des applications, avec des transistors dont le gain est de beaucoup supérieur à 1, cette erreur n'est pas la cause principale d'imprécision observée et elle reste masquée par la tension d'offset de la paire de transistors ou le désappariement des résistances de contre-réaction 3 et 6. Mais dès que le gain des transistors décroît, pour des raisons quelconques, l'erreur due au gain faible ($\beta < 1$) devient prédominante. En effet, on voit que le gain β intervient au premier degré et au dénominateur de l'équation, de sorte que, lorsque le gain tend vers zéro, l'erreur tend vers - 100 %.

Les applications actuelles de l'électronique nécessitent cependant des précisions de recopie de miroir supérieures à 10 % que l'on peut atteindre avec des transistors ayant subi des contraintes, et dont le gain est faible, par exemple compris entre 1 et 10.

Une première solution connue est présentée par le miroir Wilson, représenté en figure 2. C'est l'équivalent d'un miroir classique, dans lequel un transistor amplificateur 8 est contre-réactionné par le miroir constitué par les transistors 2 et 5. Sur cette figure comme sur les figures suivants la charge 7 n'est plus

représentée, puisqu'elle n'intervient pas dans la compréhension de l'invention.

En supposant que les trois transistors ont le même gain β , l'erreur de gain du miroir Wilson s'exprime par une relation quadratique :

$$I_o = I_1 [1 - 2/(\beta^2 + 2\beta + 2)]$$

Une deuxième solution connue réside dans le miroir bufférisé, représenté en figure 3. Dans ce montage, les transistors des branches maitresses et de recopie, respectivement 2 et 5, ont leurs courants de bases non pas prélevés directement sur la source I_1 comme dans le cas de la figure 1 mais au travers d'un transistor amplificateur 9 dont la base est connectée à la source I_1 et l'émetteur aux deux bases des transistors 2 et 5, le collecteur de ce transistor 9 est alimenté par une tension de rappel V_R . L'erreur est donnée par :

$$I_o \approx I_1 [1 - 2/(\beta^2 + \beta + 2)]$$

Pour des gains de transistors très supérieurs à 1, l'erreur introduite par ces miroirs de Wilson et bufférisé est de la forme $-2/\beta^2$ et procure une amélioration très sensible du miroir simple : pour $\beta = 100$, l'erreur passe de - 2% à - 0,02 %, qui devient négligeable. Mais l'effet de la loi quadratique diminue lorsque le gain des transistors devient proche ou inférieur à 1 : par exemple, le miroir de Wilson a une erreur de l'ordre de - 8% pour un gain des transistors $\beta = 4$.

L'invention apporte une solution à ce problème en proposant un montage tel que l'équation du courant de recopie I_o comprend un terme qui s'annule au numérateur, de telle façon que l'erreur s'annule pour une valeur faible de gain des transistors. Selon l'invention, un miroir de courant à faible erreur de recopie est caractérisé en ce que sa sortie (I_o) est constituée par les collecteurs réunis de deux transistors montés en amplificateur de courant de type "Darlington", son entrée (I_1) est constituée par la base du même amplificateur, cet amplificateur étant polarisé grâce à une contre-réaction de type courant-parallèle opérée entre son émetteur et sa base par un miroir de type bufférisé muni de résistances de contre-réaction.

De façon plus précise, l'invention concerne un miroir de courant à faible erreur de recopie comportant une branche d'entrée et une branche de sortie, ainsi qu'un miroir de courant de type "bufférisé" constitué lui-même par une première branche maitresse et par une deuxième branche de recopie, ce miroir de courant à faible erreur de recopie étant caractérisé en ce qu'il comporte dans sa branche de sortie un premier amplificateur de courant de type Darlington dont le collecteur constitue la sortie du miroir, et dont la base est réunie à la branche d'entrée, cet amplificateur étant contre-réactionné en mode de courant-parallèle par le miroir de courant de type bufférisé dont la branche maitresse est réunie à l'émetteur du Darlington et dont la branche de recopie est réunie à la base du Darlington.

L'invention sera mieux comprise par la descrip-

tion qui suit maintenant d'un exemple d'application, en liaison avec les figures jointes en annexe, qui représentent :

- figures 1,2 et 3 : schémas de miroirs de courant selon l'art connu, précédemment exposés,
- figure 4 : schéma d'un miroir de courant selon l'invention
- figure 5 : schéma d'une version du miroir précédent, dans le cas d'une technologie haute tension,
- figure 6 : courbes d'erreur sur le gain, comparées entre l'art connu et l'invention.

Pour simplifier, l'invention sera décrite en s'appuyant sur des transistors NPN, ce qui ne limite nullement la portée de l'invention.

La figure 4 représente un miroir de courant à transistors faible gain selon l'invention. Ce miroir selon l'invention comporte entre autres les éléments d'un miroir bufférisé selon l'art connu, dans lequel :

- une première branche maîtresse insérée en série dans la branche de sortie du miroir de l'invention, et qui comprend un transistor 2 et une résistance de contre-réaction 3.
- une deuxième branche de recopie insérée en série dans la branche d'entrée du miroir de l'invention et qui comprend un transistor 5 et une résistance de contre réaction 6.

Les bases des deux transistors 2 et 5 sont réunies et un transistor 4 alimenté par une tension de rappel V_R est monté en amplificateur entre le collecteur et la base de 2.

L'invention consiste à utiliser ce miroir bufférisé pour contre-réactionner en mode courant-parallèle un amplificateur de courant de type Darlington dont la sortie (ou le collecteur) constitue la sortie du miroir selon l'invention, et l'entrée (la base) constitue l'entrée du miroir selon l'invention. Ce "Darlington" comprend :

- un transistor 10 dont le collecteur est réuni à la source de tension VCC et dont l'émetteur est réuni au collecteur de 2
- un transistor 11 dont le collecteur est réuni à la source de tension VCC et dont la base est commandée par la branche d'entrée du miroir selon l'invention (source I_1).

Comme dans les miroirs classiques, des résistances de contre-réaction d'émetteur 3 et 6 permettent de s'affranchir de l'erreur d'offset des transistors à concurrence de leur appariement si la dégénérescence - c'est à dire le produit de la valeur de la résistance de contre-réaction par le courant qui la traverse - vaut quelques $kT/q \approx 26 \text{ mV}$ à 300° K , avec k = constante de Boltzmann, T = température absolue, q = charge de l'électron.

Dans le cas d'une technologie rapide, dans laquelle le gain dépend fortement de la tension V_{CE} il est avantageux de compléter le miroir selon l'invention par deux transistors 12 et 13, montés en symétrie

du Darlington 10 + 11, les bases des transistors 13 sur la branche d'entrée et 11 sur la branche de sortie étant interconnectées et reliées aux collecteurs des transistors 12 et 13. Les transistors 12 et 13 ont un rôle d'équilibrage des tensions V_{CE} des transistors 2 et 5 du miroir bufférisé, afin d'éliminer l'erreur due à l'effet Early des transistors. Toujours dans ce cas de faible tension, la tension de rappel V_R du collecteur du transistor 9 est choisie de façon à apparier les V_{CE} , de telle sorte que $V_{CE9} \approx V_{CE11}$.

Dans le cas d'une technologie haute tension, soit quelques centaines de volts, l'effet Early est plus négligeable que dans le cas d'une technologie rapide, l'équilibrage des tensions V_{CE} du miroir bufférisé peut être supprimé, et par voie de conséquence les transistors 12 et 13 sont supprimés, comme le montre la figure 5, qui est la simplification de la figure 4.

L'intérêt de la structure de miroir de courant selon l'invention réside dans l'existence d'une racine du numérateur, qui annule l'erreur, dans la fonction de l'erreur due au gain, fonction qui s'écrit :

$$I_0 \approx I_1 [1 + (2\beta - 2)/(\beta^4 + 3\beta^3 + 4\beta^2 + 2\beta + 2)]$$

Dans cette équation, on a supposé que tous les transistors du miroir ont le même gain, ce qui justifie le signe \approx .

Dans les miroirs de courant selon l'art connu, l'erreur est de signe constant, toujours négatif, et elle croît en valeur absolue lorsque le gain β des transistors diminue : elle vaut entre - 40 % et - 70 % lorsque $\beta = 1$, comme le montre la courbe 14 sur la figure 6. Sur cette figure, le gain β aux faibles valeurs (0-14) est donné en abscisse, l'erreur correspondante $\varepsilon = (I_0 - I_1)/I_1$ est donnée en ordonnées, et la courbe 14 est relative à une structure Wilson.

Au contraire, dans le miroir selon l'invention, l'erreur s'annule pour $(2\beta - 2) = 0$, soit $\beta = 1$, et elle change de signe selon que le gain est supérieur ou inférieur à 1. Une courbe type est représentée en 15 sur la figure 6, ce qui permet de la comparer avec la courbe 14 d'un miroir Wilson. La bosse d'erreur positive observée pour les gains faiblement supérieurs à 1 ne vaut que + 2 à + 3% et elle reste négligeable dans cette zone pour laquelle un miroir classique est affecté d'une erreur de l'ordre de - 40 %. Pour $\beta = 1$, l'erreur est strictement nulle ($2\beta - 2 = 0$) et pour $\beta < 1$ l'erreur observée reste moins importante que celle atteinte avec un miroir connu.

Sur la figure 6 a été tracée une droite en pointillés au niveau d'une erreur de gain du miroir égale à - 10 %, ce qui est un exemple d'erreur pratiquement acceptable. Cette droite montre que le miroir selon l'invention tolère des transistors dont le gain est d'environ 0,75, soit 5 fois plus faible que le gain 3,5 des transistors nécessaire pour un miroir Wilson, à même perte de -10 %.

Par ailleurs, l'intérêt de la fonction de transfert, qui comporte une zone dans laquelle $\beta < 1$, n'est affecté ni par des problèmes d'appariement de gains

des transistors utilisés ni par des problèmes d'appariement des résistances de contre-réaction 3 et 6.

Par exemple, sur la figure 6, les courbes 15, 16, 17 illustrent l'influence (minimum, typique, maximum) d'un désappariement des résistances de contre-réaction de $\pm 2\%$ lorsque la tension de dégénérescence est fixée à une valeur pratique d'environ 250 mV. La courbe supérieure 16 correspond à un désappariement

$$\frac{\Delta (R_1 / R_2)}{R_1 / R_2} = + 2\%$$

et la courbe inférieure 17 correspond à -2% . Les variations de la courbe d'erreur autour de sa position nominale sont très acceptables.

Outre l'intérêt de pouvoir travailler avec des gains de transistors très faibles, le miroir de courant selon l'invention à l'avantage d'avoir une très haute impédance de sortie en basse fréquence. Par rapport au miroir de Wilson, réputé pour avoir une impédance de sortie élevée, l'amélioration porte typiquement sur un facteur 100.

L'invention est précisée par les revendications suivantes.

Revendications

1. Miroir de courant à faible erreur de recopie, comportant une branche d'entrée et une branche de sortie, ainsi qu'un miroir de courant de type "bufférisé" constitué lui-même par une première branche maitresse (2,3,4) et par une deuxième branche de recopie (5,6), ce miroir de courant à faible erreur de recopie étant caractérisé en ce qu'il comporte dans sa branche de sortie un premier amplificateur de courant de type Darlington (10+11) dont le collecteur constitue la sortie du miroir, et dont la base est réunie à la branche d'entrée, cet amplificateur (10+11) étant contre-réactionné en mode courant-parallèle par le miroir de courant de type bufférisé dont la branche maitresse (2,3) est réunie à l'émetteur du Darlington (10) et dont la branche de recopie (5,6) est réunie à la base du Darlington (11).
2. Miroir de courant selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'un second amplificateur de courant dit "Darlington" (12 + 13) dont la base et le collecteur sont court-circuités est monté sur la branche d'entrée symétriquement au premier Darlington (10+11), afin d'équilibrer les tensions V_{CE} collecteur/émetteur des transistors (2,5) du miroir "bufférisé".
3. Miroir de courant selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il est réalisé en transistors bipolaires à faible gain (β).

4. Miroir de courant selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que l'erreur de recopie de la branche d'entrée (I_1) par la branche de sortie (I_o) dépend peu du gain (β) des transistors pour de faibles gains ($\beta < 2$) et est nulle pour un gain des transistors $\beta = 1$.

5. Miroir de courant selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que l'erreur de recopie de la branche d'entrée (I_1) par la branche de sortie (I_o) dépend peu de l'appariement des résistances (3,6) de contre-réaction et de l'appariement du gain (β) des transistors (2,4,5,10,11).

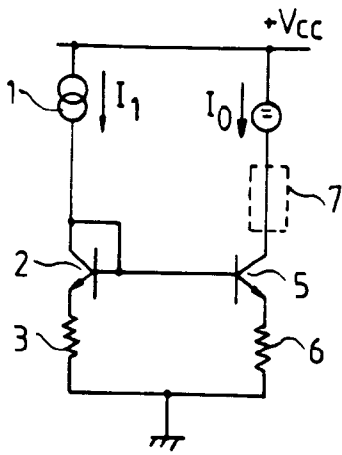


FIG. 1

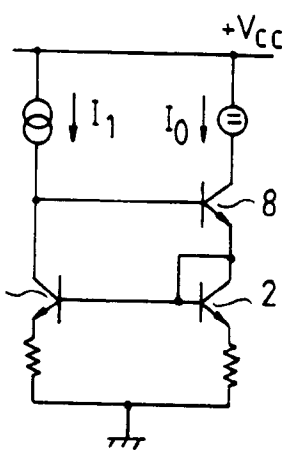


FIG. 2

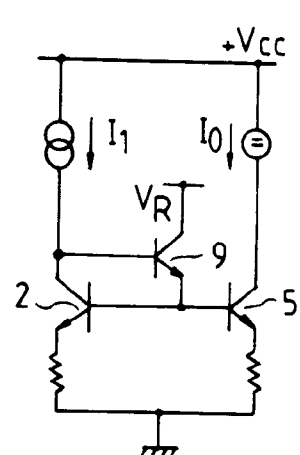


FIG. 3

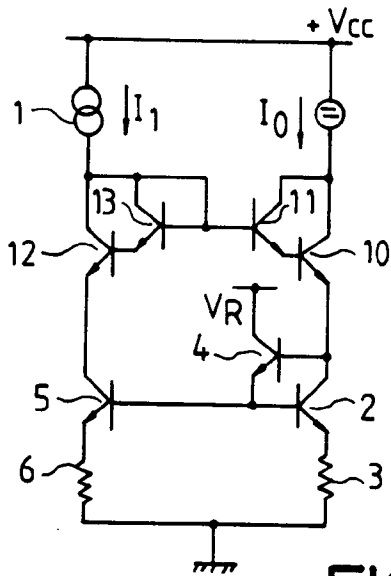


FIG. 4

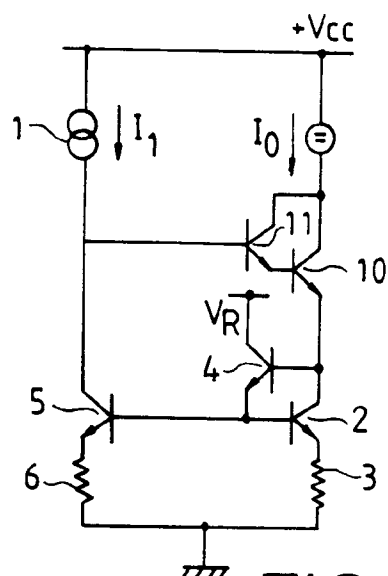


FIG. 5

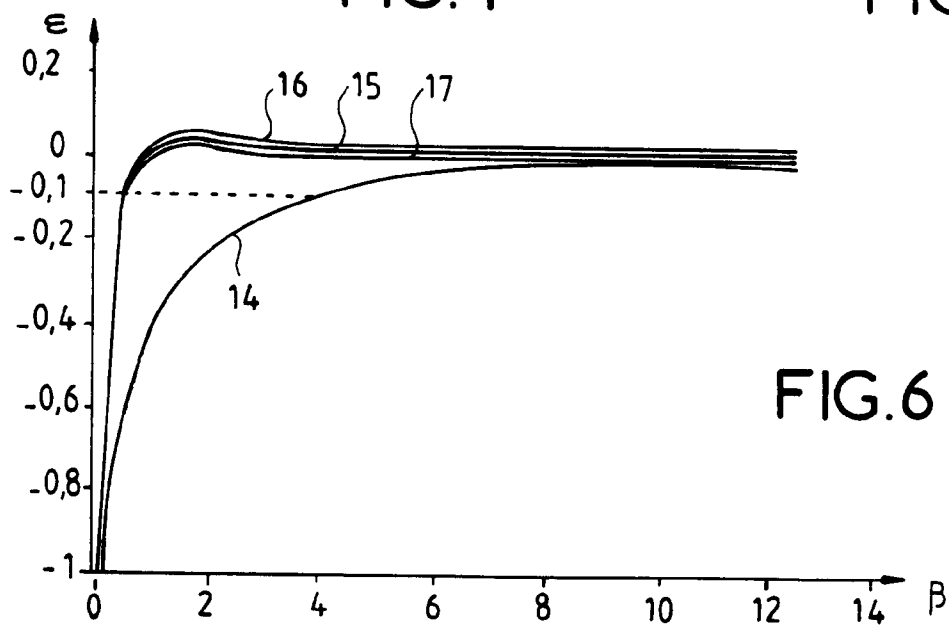


FIG. 6



Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numero de la demande

EP 92 40 3026

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int. Cl.5)
X	US-A-4 237 414 (STEIN) * colonne 2, ligne 29 - colonne 3, ligne 37; figure *	1,5	G05F3/26
Y	---	2-4	
Y	RCA TECHNICAL NOTES no. 949, 31 Décembre 1973, PRINCETON, NEW JERSEY, US JONATHAN S. RADOVSKY 'Current-Mirror Amplifiers Having Current Gains Less Influenced By the Base Currents of Component Transistors' * page 3, alinéa 2; figure 5; tableau *	3,4	
A	---	1	
Y	US-A-3 843 933 (AHMED) * colonne 5, ligne 5 - ligne 17; figure 6 *	2	
A	EP-A-0 419 819 (MOTOROLA INC.) * page 3, ligne 42 - page 5, ligne 17; figures *	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.5)
A	DE-A-2 738 205 (SONY K.K.) -----		G05F
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lien de la recherche LA HAYE		Date d'achèvement de la recherche 22 AVRIL 1993	Examineur SAAW L.J.
<p>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>			

EPO FORM 1503 03.82 (P0402)