

Générateurs de tension et courant de référence dans les technologies CMOS

Dimitri Galayko, Jacky Porte
dimitri.galayko@lip6.fr, porte@asim.lip6.fr

LIP6
University of Paris-VI
France

Cours IP-AMS
SESI M2
Décembre 2009

Outline

- 1 Générateurs de référence: introduction et généralités
- 2 Sources de courant à Gm constant
- 3 Sources PTAT
- 4 Sources QPVT
- 5 Sources Bandegap

Principes de base

Les éléments utilisés sont :

- non-linéaires
 - possèdent des caractéristiques dépendant de la température.
- La non-linéarité permet de réaliser des circuits auto-polarisés indépendants de la tension d'alimentation

La dépendance de température permet de *mesurer* la température et de concevoir des circuits avec les propriétés souhaitées (indépendantes de température, proportionnelles à la température, etc..)

Les éléments utilisés :

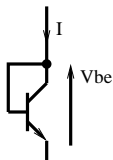
- les transistors MOS
- les transistors bipolaires (transistors parasites réalisés dans les technologies MOS)
- les résistances

Rappel des relations de dispositifs [2][3]

On possède deux tensions directement liées à la température : la tension des jonctions p-n et la tension V_t .

Pour un transistor bipolaire (souvent utilisé monté en diode):

$$I_C = I_{SS} \exp\left(\frac{V_{be}}{V_t}\right), \quad (1)$$



où $V_t = k_b T / q$, T est la température absolue, k est la constante de Boltzmann, q est la charge élémentaire. I_{SS} dépend de la température et est proportionnel à l'aire de l'émetteur.

La dépendance de la tension V_{be} en température est décrite par la formule suivante (analytique, très précise) :

$$V_{be}(T) = K_3 - (K_3 - V_{be}(T_0)) \frac{T}{T_0} - (\gamma - K_1 \frac{q}{k_b} - \alpha) V_t \text{Log} \frac{T}{T_0}, \quad (2)$$

où $K_1 = -8.459 \cdot 10^{-5} \text{V/K}$, $K_3 = 1.1774 \text{V}$, $\alpha = 7.021 \cdot 10^{-4} \text{V/K}$ [1], γ est un paramètre technologique, $\text{Log } x$ est le logarithme sur la base e .

Rappel des relations de dispositifs (2)

Pour un transistor MOS en régime de faible inversion (sous le seuil):

$$I_d = I_{dx} \frac{W}{L} \exp\left(\frac{V_{gs} - V_{th}}{\eta V_t}\right) \exp\left(\frac{\eta - 1}{\eta V_t} V_{bs}\right), \quad (3)$$

où η est le facteur de pente de la faible inversion, sensible à la température (2.2...3.4 pour la plage -40...110 °C), I_{dx} est le courant de saturation qui vaut $I_{dx} = \mu_0 C_{ox} \frac{\eta}{m} V_t^2$, m est compris entre 1 et 3, V_t est la tension thermique, $V_t = q/kT$.

Pour une résistance, la dépendance est polynomiale ou exponentielle, selon le modèle :

$$R = R(T_0)(1 + \beta_1(T - T_0) + \beta_2(T - T_0)^2), \quad (4)$$

où T_0 est la température ambiante.

On utilise également une relation exponentielle:

$$R = R(T_0)(T/T_0)^{-\alpha_R}, \quad \alpha_R \approx -3... + 3. \quad (5)$$

Coefficients thermiques de résistance en technologie $0.8 \mu\text{m}$

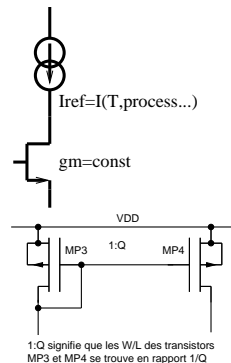
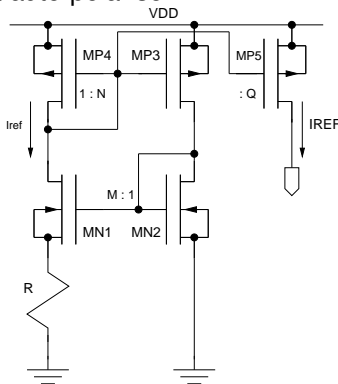
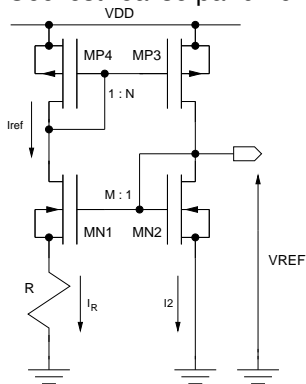
	$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ en ppm/K	α_R
poly	+750	-0.225
Hpoly*	-1000	+0.300
caisson N	+6600	-1.98
diffusion N	+1800	-0.54
diffusion P	+1650	-0.495

*Hpoly : High Resistivity Poly

Sources de courant à Gm constant: motivation

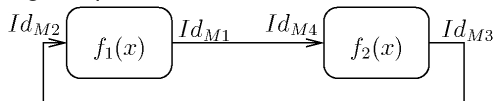
L'idée est d'avoir un courant de polarisation indépendant de la tension d'alimentation et qui assure une transconductance de grille constante.

Ceci est réalisé par un circuit auto-polarisé :



Sources à gm constant : analyse grand signal

Pour analyser ce circuit, on peut la représenter comme deux blocs algébriques cascades et mis en contre-réaction



Si les transistors sont en régime de forte inversion:

$$f_2(x) = Nx, \text{ (Mirroir de courant avec facteur M)} \quad (6)$$

pour trouver $f_2(x)$: il faut considérer la maille R- S_{M1} - G_{M2} -GND.

Sources à gm constant : analyse grand signal

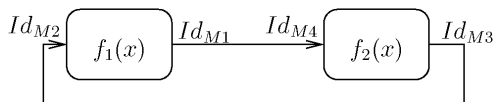
Nous avons :

$$I_d^{M1} = I_R = (V_{gs}^{M2} - V_{gs}^{M1})/R = \left(\sqrt{\frac{I_d^{M2}}{K_2}} - \sqrt{\frac{I_d^{M1}}{K_1}} \right) / R; \quad (7)$$

En résolvant cette équation comme équation quadratique (on pose $x = \sqrt{I_d^{M1}}$, nous avons :

$$I_d^{M1} = f_1(I_d^{M2}) = \left(-\frac{1}{2R\sqrt{K_1}} + \sqrt{\frac{1}{4R^2K_1} + \sqrt{\frac{I_d^{M2}}{R^2K_2}}} \right)^2 \quad (8)$$

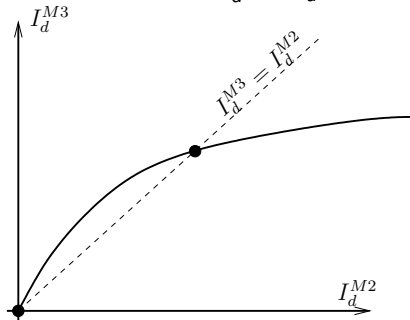
Sources à gm constant : analyse grand signal



Ainsi, la fonction de transfert totale est:

$$I_d^{M3} = f_2(I_d^{M4}) = f_2(f_1(I_d^{M2})).$$

Le graphique liant I_d^{M3} et I_d^{M2} est le suivant :



Sources à gm constant : analyse grand signal

Cependant, en supposant que M1 et M2, M3 et M4 sont appariés (avec les rapports des longueurs comme montré sur le schéma), on trouve I_R directement en considérant la maille G_1 - G_2 - S_2 - R - S_1 et en supposant que $V_{th}^{M1} = V_{th}^{M2}$.

$$I_R = (V_{gs}^{M2} - V_{gs}^{M1})/R = \left(\sqrt{\frac{I_d^{M2}}{K_2}} - \sqrt{\frac{I_d^{M1}}{K_1}} \right) = \left(\sqrt{\frac{I_R/N}{K_2}} - \sqrt{\frac{I_R}{K_1}} \right) \quad (9)$$

On constate que $I_R = 0$ est une racine; en cherchant une racine non-nulle, on divise par $\sqrt{I_R}$, et on obtient, sachant $K_1/K_2 = M$:

$$I_R = \frac{1}{R^2 K_1} (\sqrt{MN} - 1)^2. \quad (10)$$

I_R obtenu ne dépend pas de la tension d'alimentation, mais est sensible à la température et au process (K dépend de la mobilité, R est sensible à la température).

Sources à gm constant : analyse grand signal

La valeur du courant de référence a été obtenue par une analyse grand signal, car nous avons considéré les équations non-linéaires des transistors. Ainsi, un point de fonctionnement du circuit est défini. Pour ce point de fonctionnement, on peut définir des paramètres petit signal. C'est g_m du M2 qui nous intéresse. On a pour g_m^{M2} :

$$g_m^{M2} = 2\sqrt{I_2 K_2} = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{N}{M}} (\sqrt{MN} - 1). \quad (11)$$

Si R est stable et les transistors sont bien appariés, g_m^{M2} est constante.

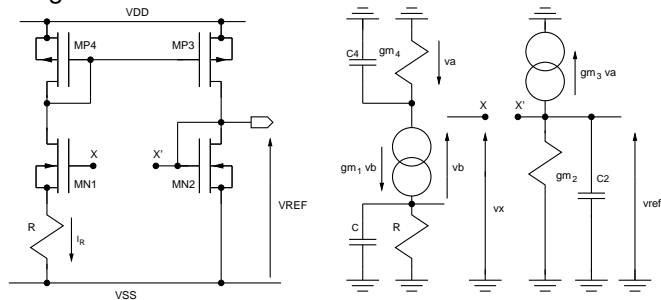
Le courant I_2 peut être utilisé pour polariser un transistor $nMOS$ de sorte à fixer son g_m .

Analyse petit signal du circuit

Pourquoi analyser en mode petit signal ?

- La stabilité du point de référence DC,
- L'absence d'auto-oscillations en fréquence,
- Sensibilité aux bruits d'alimentation

On étudie le circuit en boucle ouverte : on ouvre le circuit, par ex., sur les grilles des transistors M1 et M2:



Analyse petit signal du circuit (2)

On cherche la fonction de transfert en boucle ouverte v_{ref}/v_x :

avec $v_{ref} = -\frac{gm_3}{gm_2 + C_2p} v_a$, $v_a = -\frac{gm_1}{gm_4 + C_4p} v_b$ et
 $v_b = v_x - \frac{gm_1}{1/R + Cp} v_b$. On pose $G = 1/R$, on a :

$$\frac{v_{ref}}{v_x} = \frac{gm_1 gm_3 (G + Cp)}{(gm_2 + C_2p)(gm_4 + C_4p)(G + gm_1 + Cp)}. \quad (13)$$

– A $p = 0$, on a le gain DC A_0 :

$$A_0 = \frac{gm_1}{gm_2} \frac{gm_3}{gm_4} \frac{1}{G + gm_1} = \sqrt{MN} \frac{1}{2\sqrt{MN} - 1}. \quad (14)$$

La condition de stabilité DC $A_0 < 1$, ainsi, MN doit être grand.

Analyse petit signal du circuit (2)

– En fréquence non-nulle : les capacités C_2 et C_4 sont faibles, mais C peut être grand, si R est une résistance externe, : on a donc un pôle basse fréquence à $(G + gm_1)/C$ qui est associé à un zéro à G/C : un doublet pouvant conduire à l'instabilité.

Pour annuler le zéro, on peut augmenter la capacité C_2 en plaçant le premier pôle à la fréquence du zéro :

$$\frac{C_2}{gm_2} = CR; \quad C_2 = Cgm_2R = 2C\sqrt{\frac{N}{M}}(\sqrt{MN} - 1). \quad (15)$$

Propriétés de la tension générée: dépendance de la température

On a pour V_{ref} :

$$V_{ref} = V_{th2} + \sqrt{\frac{I_2}{K_2}} = V_{th2} + \frac{1}{RK_2} \sqrt{\frac{N}{M}} (\sqrt{MN} - 1). \quad (16)$$

$$\frac{\partial V_{ref}}{\partial T} = \frac{\partial V_{th2}}{\partial T} - \sqrt{\frac{N}{M}} (\sqrt{MN} - 1) \left(\frac{\partial R}{\partial T} \frac{1}{R^2 K_2} + \frac{\partial K_2}{\partial T} \frac{1}{RK_2^2} \right) \quad (17)$$

Pour le coefficient fractionnaire de tension

$$TC_F(V_{ref}) = \frac{1}{V_{ref}} \frac{\partial V_{ref}}{\partial T} = \frac{1}{V_{ref}} (-\alpha_{V_{th}} + \sqrt{\frac{N}{M}} (\sqrt{MN} - 1) \frac{1}{RK_2 T} (\alpha_{\mu N} - \alpha_R))$$

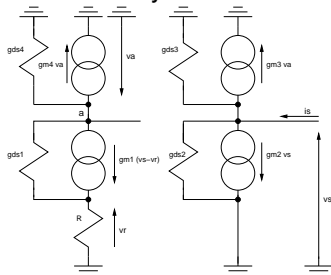
Les signes des coefficients : $\alpha_{\mu} \approx 1.5...2.5$, $\alpha_{V_{th}} = 1...2.5mV/K$. α_R dépend du matériau. Le signe de $\alpha_R > 0$ dépend du matériau. Ainsi, dans l'expression pour $TC_F(V_{ref})$, il y a une alternance de signe : cela signifie qu'il peut exister un jeu de valeur annulant $TC_F(V_{ref})$. Cela arrive pour la valeur "optimale" de V_{ref} (correspondant à certaines valeurs M et N) :

$$V_{ref\ OPT} = V_{th2} + \frac{\alpha_{V_{th}N}}{\alpha_{\mu}N - \alpha_R} T. \quad (19)$$

Bien sûr, V_{ref} doit être supérieur à V_{th2} afin d'assurer une forte inversion de MN2. Cela est également une condition suffisante pour une forte inversion de MN1.

Sensibilité à la tension d'alimentation

On doit analyser le schéma petit signal suivant:



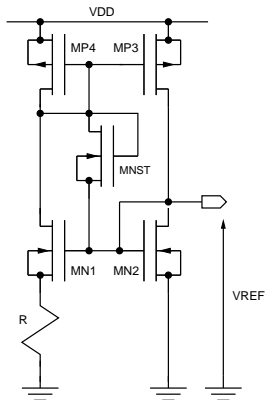
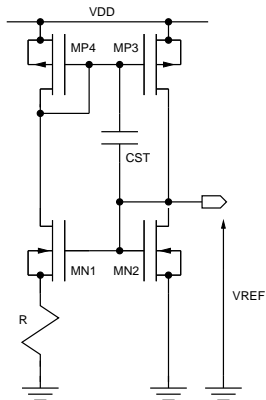
On obtient

$$\frac{V_{ref}}{v_{dd}} \approx \frac{g_{ds3}}{g_{m2} - \frac{g_{m3}}{g_{m4}} \cdot \frac{g_{m1}}{1+Rg_{m1}}} = \underbrace{\frac{g_{ds3}}{g_{m2}}}_{\text{gain intrinsèque}} \underbrace{\frac{\sqrt{2MN}-1}{\sqrt{MN}-1}}_{\approx 1} \quad (20)$$

Démarrage du circuit

Comme on a vu lors de la résolution de l'équation pour I_R , il y a deux valeurs possibles : l'une est nulle, l'autre est celle que l'on souhaite. D'après le modèle de calcul que nous avons utilisé, le point d'équilibre à $I_R = 0$ est instable, donc, moindre perturbation sur le courant déséquilibre le circuit pour l'amener dans le point stable. Cependant, le calcul a été fait sous hypothèse de saturation pour les deux transistors, i.e., $V_{gs} > V_{th}$. En considérant la possibilité pour tous les transistors d'être en régime bloqué ($|V_{gs}| < |V_{th}|$), on peut voir que l'ensemble de points de fonctionnement point correspondant à ($|V_{gs}| < |V_{th}|$) et à $I_d = 0$ pour tous les transistors sont possibles et sont stables. Ainsi, au démarrage, le circuit peut se mettre dans l'un de ces points, ce qui n'est pas un fonctionnement souhaité.

Un circuit de démarrage a pour but de "pousser" le système vers le bassin d'attraction correspondant à l'état stable souhaité.
Deux exemples simples : avec une capacité et avec un transistor de démarrage.



$$V_{th}^{MNST} > V_g^{M4} - V_g^{M1}$$

en fonctionnement.

Sources PTAT: Motivation

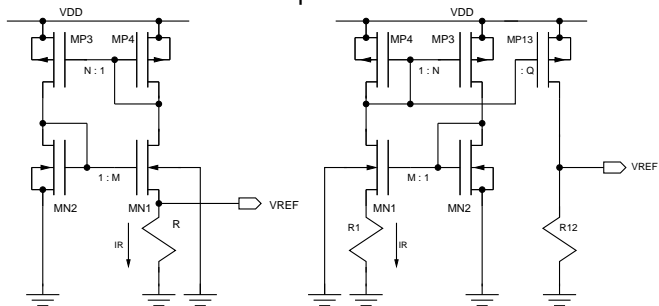
PTAT : Proportional To Absolute Temperature. Peuvent être utilisés dans les capteurs, dans les circuits bandgap (cf. la suite), dans différents circuits de compensation thermiques.

$$V_{ref} \sim T.$$

Note : en électronique, comme en physique en général, on doit toujours considérer la température absolue, même si Spice affiche la température en degré de Celsius !

Source PTAT CMOS

Le schéma est identique à celui pour gm constante, mais les transistors M1 et M2 sont polarisés en faible inversion (sous le seuil), le substrat de MN1 est relié au potentiel inférieur (à la masse) et la tension de référence est prélevée sur la résistance.



Source PTAT CMOS : analyse grand signal

$$I_{ds}^{M1} = I_R = I_{DX} \left(\frac{W}{L} \right)_1 \exp \left(\frac{V_{gs}^{M1} - V_{th}^{M1}}{\eta V_t} \right) \exp \left(\frac{\eta - 1}{\eta V_t} V_{bs}^{M1} \right). \quad (21)$$

soit

$$V_{gs}^{M1} = \eta V_t \text{Log} \left(\frac{I_R}{I_{DX} \left(\frac{W}{L} \right)_1} \right) + (\eta - 1) V_{bs}^{M1} + V_{th}^{M1}, \quad (22)$$

Avec

$$V_{ref} = V_{gs}^{M2} - V_{gs}^{M1} = \eta V_t \text{Log} \left(\frac{I_{ds}^{M2} \left(\frac{W/L \right)_1}{I_R \left(\frac{W/L \right)_2} \right) + (1 - \eta) V_{ref} + V_{th}^{M2} - V_{th}^{M1}, \quad (23)$$

on détermine :

$$V_{ref} = V_t \text{Log}(NM) + (V_{th}^{M2} - V_{th}^{M1})/\eta. \quad (24)$$

Source PTAT CMOS: notes

Ainsi, à l'erreur d'appariement sur les V_{th} près, on obtient :

$$V_{ref} = V_t \text{Log}(NM) = \frac{kT}{q} \text{Log}NM. \quad (25)$$

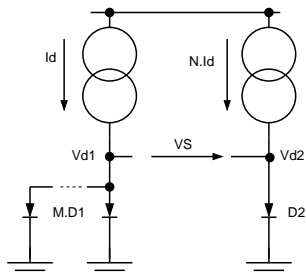
Les conditions suivantes doivent être respectées :

- MN1 et MN2 doivent être en faible inversion à la température maximum (125 degrés),
- Les courants de fuite de jonctions de drain et de source de MN1 et MN2 doivent être minimisés (sinon erreurs à hautes températures)
- Les transistors doivent être suffisamment longs, sup. à $5 \mu\text{m}$ pour minimiser les erreurs d'appariement et les effets de canal courts...
- La valeur de la tension de référence est de quelques $V_t = 0.025V$, ainsi, on peut vouloir amplifier le courant (circuit de droite) :

$$V_{ref} = QI_R R_{12} = \frac{R_{12}}{R_1} QV_t \text{Log}(NM). \quad (26)$$

Sources PTAT BiCMOS: principe

Deux transistors bipolaires montés en diodes, appariés, avec rapport de dimension M, sont branchées en série avec des sources de courant MOS.



On a pour les tensions des diodes:

$$V_{d1} = V_t \text{Log} \frac{I_d}{M I_s}, \quad (27)$$

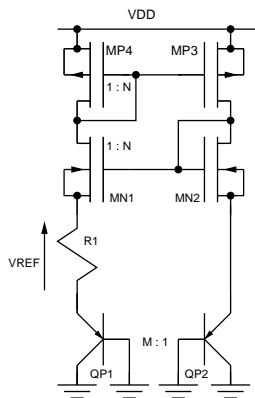
$$V_{d2} = V_t \text{Log} \frac{N I_d}{I_s}. \quad (28)$$

La tension de sortie est définie comme une différence entre les tensions des diodes :

$$V_s = V_{d2} - V_{d1} = V_t \text{Log}(MN) = (29)$$

$$\llcorner \square \triangleright \llcorner \square \triangleright kT/q \text{Log}(MN). \quad (30)$$

Solution 1: PTAT BiCMOS autopolarisée



Ce quad à miroirs de courant assure l'indépendance de la tension d'alimentation. De plus, grâce au rapport identique entre les dimensions de transistors des deux branches (comparer avec 1:N et M:1 sur le transp. 7), il assure que $V_{gs1} = V_{gs2}$: on a donc nécessairement $V_r = V_{d2} - V_{d1}$.

$$V_{ref} = V_{eb2} + V_{gs2} - V_{gs1} - V_{eb1} = \quad (31)$$

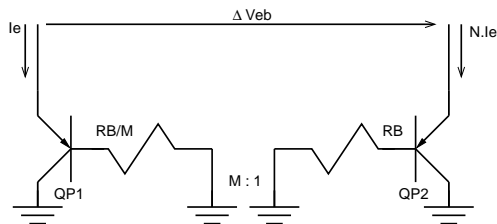
$$V_{eb2} - V_{eb1} + V_{th2} - V_{th1} \approx V_t \text{Log}(NM). \quad (32)$$

L'inconvénient : ce générateur nécessite une tension d'alimentation importante :

$$V_{dd} > V_{eb2} + V_{th2} + V_{eg2} + V_{dsat3} \approx 1.5V \quad (33)$$

Egalement, cette topologie nécessite une technologie à double caisson pouvoir polariser indépendemment les bulks de M1 et M2.

De l'implémentation des transistors bipolaires...



$$\Delta V_{be} = V_t \text{Log}(MN) + V_t \text{Log} \left(\frac{1 + 1/\beta_1}{1 + 1/\beta_2} \right) + I_e R_B \left(\frac{N}{1 + \beta_1} - \frac{1}{M(1 + \beta_2)} \right). \quad (3)$$

Cette formule peut être obtenue à partir du schéma ci-dessus sachant que $V_{be} = V_t \text{Log}(I_c/I_s)$, $I_c = \beta I_b$ et $I_e = I_c + I_b$.

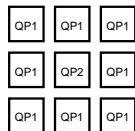
On peut minimiser deuxième terme en appariant les transistors, et le troisième en égalisant les résistances de base par ajout en série à la base de Q1 une résistance $RB' = RB(N - 1/N)$.

De l'implémentation des transistors bipolaires... (2)

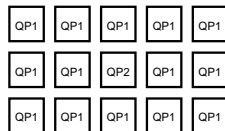
Pour minimiser le troisième terme, il faut appairer les transistors bipolaires (égaliser les β). Pour cela on utilise un placement à géométrie centrée matricielle. Pour Q1, le nombre optimal de dispositifs vaut :

$$M = (2n - 1)^2 - 1, \quad n = 2, 3, \dots \quad (36)$$

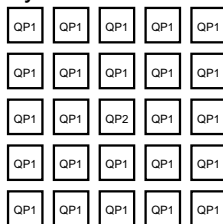
Quelques exemples de schémas de layout :



VPTAT = 51mV



VPTAT=65mV



VPTAT=79mV

Sources QPVT: principe

QPVT : Quasi invariant Process, supply Voltage, Temperature.
Une source QPVT génère un courant de référence proportionnel au coefficient de transconductance K du transistor MOS ($0.5(W/L)Cox$) et au carré de la tension thermique V_t :

$$I_{ref} \propto KV_t^2. \quad (37)$$

En résulte un certain nombre de propriétés remarquables.

Sources QPVT : principe et motivation

1) Quasi invariance process et température des courants :

$$I_{ref} \propto K(T_0)(T/T_0)^{-\alpha_\mu} \cdot T^2 = T^{2-\alpha_\mu}. \quad (38)$$

vu que $\alpha_\mu \approx 1.5 \dots 2.5$, $\Delta K/K \approx \pm 10\%$, les courants sont peu dépendants des dispersions technologiques et de la température.

2) Invariance Process des tensions effectives de grille

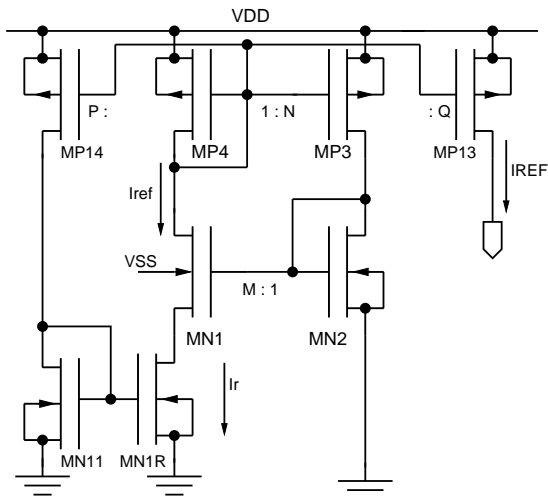
$$V_{eg_i} = \sqrt{\frac{I_{ref}}{K_i}} \propto V_t \quad (39)$$

Les tensions effectives de grille sont indépendantes des dispersions technologiques et PTAT en température.

3) Quasi invariance Process et Température des transconductances:

$$g_{m_i} \approx 2\sqrt{I_{ref}K_i} \propto \sqrt{KK_i}V_t \propto \sqrt{K(T_0)K_i(T_0)}T^{1-\alpha_\mu}. \quad (40)$$

Source QPVT: implémentation CMOS



- Quad CMOS PTAT
- M1-M4 : indépendance de Vdd
- Le miroir de type N (M1,M2) en faible inversion
- La résistance R1 est modélisée par un transistor MOS en régime ohmique en forte inversion (MN1R): commandée par V_g imposée par le courant généré, élévation au carré de V_t

Source QPVT: analyse grand signal

Le quad CMOS est un quad PTAT déjà connu. La tension aux bornes de la résistance (DS du trans. MN1R) vaut :

$$V_R = V_{ds}^{MN1R} \approx V_t \text{Log}(MN) + V_{th1} - V_{th2} \approx V_t \text{Log}(MN). \quad (41)$$

Le courant de transistor MN1R vaut :

$$I_r = 2K_{1R}(V_{gs1R} - V_{th1R} - V_R/2)V_R. \quad (42)$$

et,

$$V_{gs1r} = V_{gs11} = \sqrt{P \frac{I_R}{K_{11}}} + V_{th11} \quad (43)$$

et $V_{th11} \approx V_{th1R}$.

On arrive à l'équation pour I_r :

$$I_R = 2K_{1R} \left(\sqrt{P \frac{I_R}{K_{11}}} - \frac{V_R}{2} \right) V_R. \quad (44)$$

Source QPVT: analyse grand signal (2)

$$\sqrt{I_R} = K_{1R} V_R \sqrt{\frac{P}{K_{11}}} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{K_{11}}{PK_{1R}}} \right) \quad (45)$$

On voit que c'est un système algébrique non-linéaire qui peut avoir zéro, (un) ou deux points d'équilibre. Il faut que le déterminant soit non-négative, i.e.,

$$V_R < \frac{V_{gs11} - V_{th11}}{2P} \quad (46)$$

Si il y a plusieurs points d'équilibre possibles, il faut utiliser un circuit de démarrage.

On arrive à

$$I_{ref} \approx P \frac{K_{1R}^2}{K_{11}} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{K_{11}}{PK_{1R}}} \right)^2 (V_t \text{Log}(MN))^2 \quad (47)$$

Source QPVT : commentaires

Pour obtenir une proportionnalité à K_{11} : $K_{11} = K_{1R}$.

$$I_{ref} \approx PK_{11} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{1}{P}} \right)^2 (V_t \text{Log}(MN))^2 \quad (48)$$

Source d'erreur : l'hypothèse sur l'égalité des tensions des seuils de ces deux transistors (leurs V_{ds} sont différentes).

Source bandgap: principe et motivation

Motivation : avoir une tension invariante en température.

Approche: utiliser deux sources avec coefficients thermiques opposés.

Dans les technologies CMOS nous possédons deux tensions dépendantes de la température :

– tension base-émetteur d'un transistor bipolaire :

$$\frac{\partial V_{be}}{\partial T} \approx -1.8mV/K \quad (49)$$

– tension $V_t = k_b T/q$:

$$\frac{\partial V_t}{\partial T} \approx 0.087mV/K \quad (50)$$

Source bandgap : principe et motivation (2)

On pose donc V_{ref} comme une combinaison linéaire de ces deux tensions :

$$V_{ref} = k_1 V_{be} + k_2 V_t, \quad (51)$$

soit

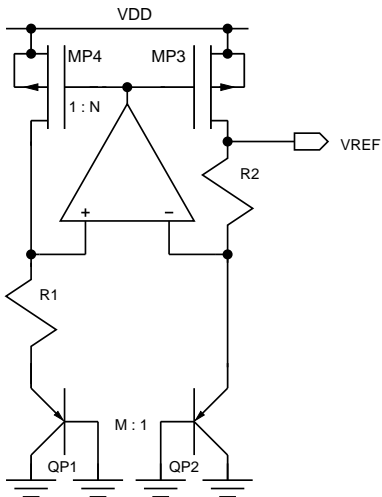
$$V_{ref} \approx k_1 (K_3 - (K_3 - V_{be}(T_0))T/T_0) + k_2 V_t. \quad (52)$$

Ici V_{be} est exprimée en fonction de la température comme présenté sur le transparent 4. Maintenant, on choisira k_1 et k_2 tels que la dérivée de V_{ref} par rapport à la température est nulle :

$$\frac{\partial V_{ref}}{\partial T} = k_1 \left(-\frac{K_3 - V_{be}(T_0)}{T_0} \right) + k_2 \frac{k_b}{q}. \quad (53)$$

A la température ambiante, la dérivée s'annule si $k_2/k_1 \approx 20$, ce qui correspond à la tension de référence de valeur 1.2 V à peu près - ce qui est proche de la largeur de la bande interdite du silicium, d'où le nom "bandgap".

Réalisation de bandgap



$$V_{ref} = R_2 N I_{R1} + V_{eb2}. \quad (54)$$

Or I_{R1} est défini comme :

$$I_{R1} = \frac{V_{R1}}{R_1} = \frac{V_{eb2} - V_{eb1}}{R_1}. \quad (55)$$

Ainsi,

$$V_{ref} = N \frac{R_2}{R_1} (V_{eb2} - V_{eb1}) + V_{eb2}, \quad (56)$$

soit

$$V_{ref} = N \frac{R_2}{R_1} V_t \text{Log}(MN) + V_{eb2} \quad (57)$$

Réalisation de bandgap

On arrive à l'expression finale :

$$V_{ref} = N \frac{R_2}{R_1} V_t \text{Log}(MN) + K_3 - (K_3 - V_{eb2}(T_0))T/T_0 - mV_t \text{Log}(T/T_0), \quad (58)$$

avec $m = \gamma - \alpha - K_1 \frac{q}{k_b}$ et $\alpha = 1 + \alpha_R$.

Pour trouver les valeurs appropriées des résistances, il faut annuler la dérivée de V_{ref} par rapport à T pour *une température T_{opt} choisie*.

On trouve

$$N \frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{\text{Log}(MN)} \left(\frac{K_3 - V_{eb2}(T_0)}{V_t(T_0)} + m \left(1 + \text{Log} \left(\frac{T_{opt}}{T_0} \right) \right) \right), \quad (59)$$

pour lequel




$$V_{ref} = K_3 + mV_t(T) \left(1 + \text{Log} \left(\frac{T_{opt}}{T} \right) \right). \quad (60)$$

Réalisation de bandgap (2)

La tension de référence est de forme "cloche concave". Si $T_{opt} = T_0$, le sommet de la cloche correspond à

$$V_{ref} = V_{G0} + mV_t(T_0) \approx 1.17 + 3 \cdot 0.0259 \approx 1.25V. \quad (61)$$

Tension d'alimentation minimale: $V_{ref} + V_{ds_{sat} MP3} \approx 1.5V$.
Cette topologie est donc irréalisable dans les technologies modernes.

-  Y. P. Tsvividis, “Accurate analysis of temperature effects in ic-vbe characteristics with application to bandgap referencessources,” *IEEE journal of solid-state circuits*, vol. SC-15, pp. 1076–1084, december 1980.
-  J. Porte, “Références de tension et de courant en technologie cmos standard,” *site web*
<http://comelec.enst.fr/oceane/doc/documents/ivref/>.
-  B. Razavi, *Design of Analog CMOS Integrated Circuis*. 2001.