

温度・電源電圧に依存しない改良永田穰電流ミラー回路とDA変換器への応用

細野 貴司*, 平野 繭, 井田 貴士, 串田 弥音, 柴崎 有祈子

築地 伸和, 桑名 杏奈, 小林 春夫 (群馬大学)

鈴木 彰, 轟 祐吉, 柿木 利彦, 小野 信任, 三浦 一広 (ジータット (株))

Improved Nagata Current Mirror Insensitive to Temperature as well as Supply Voltage and its Application to DAC Design

Takashi Hosono*, Mayu Hirano, Takashi Ida, Nene Kushita, Yukiko Shibasaki, Nobukazu Tsukiji

Anna Kuwana, Haruo Kobayashi (Gunma University)

Akira Suzuki, Yukichi Todoroki, Toshihiko Kakinoki, Nobuto Ono, Kazuhiro Miura (JEDAT)

キーワード : 基準電流源, 永田電流ミラー回路, MOS アナログ回路, 電源電圧変動, 温度変動, DA 変換器
(Reference Current Source, Nagata Current Mirror, MOS Analog Circuit, Supply Voltage Variation, Temperature Variation, DAC)

1. はじめに

この論文で提案する改良永田穰電流回路は、簡単、小チップ面積で、電源電圧変動および温度変動によらず一定の基準電流源として用いることを目的としている。

永田穰電流回路は永田穰氏により提案された電流ミラー回路である。[1, 2] この回路は入力電流変化に対して出力電流がピークを持つ特性を実現している。そのピーク付近で用いると、入力電流変化に対して出力電流変化はわずかである。入力電流を電源電圧と抵抗で実現すると電源電圧変動によらず一定の出力電流が得られる。この構成は起動回路不要でシンプルではあるが、電源電圧の変動に対する出力電流の変動が一定となる範囲が非常に狭いという問題点がある。そこで、我々はオリジナル永田電流ミラー回路を基に、複数のミラー回路を用いて異なる入力電流でピークを持つ構成で、総出力電流が一定かつ広い電源電圧変動に対して出力が一定である改良回路を提案した。[3, 4]

しかしながら温度が上昇すると出力電流が増加するという問題がある。そこで内部で使用している抵抗の温度係数が正、負、ゼロであってもその値が既知であればその値をもとに内部の MOSFET のサイズを適切に設計することで温度変動によらない電流を出力する改良回路を考案し、

シミュレーションで動作を確認し、DA 変換器設計への応用および AnaCell 実現を検討したので報告する。

2. 永田穰電流ミラー回路

永田穰電流ミラー回路の構成を図1に示す。ここで、永田電流ミラー回路がピークを持つ理由を考察する。

入力電流 I_{IN} が小さな値から増加するとそれに追従して出力電流 I_{OUT} も増加していく。 I_{IN} がある値を超えると、 R で発生する電圧降下により V_{GS2} が減少し、 $M2$ のドレイン電流 I_{OUT} が減少していく。入力電流 I_{IN} が増加すると、抵抗 R での電圧降下 RI_{IN} が発生し、これにより $M1$ のゲート・ソース間電圧 V_{GS1} より $M2$ のゲート・ソース間電圧 V_{GS2} が減少する。

永田電流ミラー回路の特性のシミュレーション結果を図2に示す。これからわかるように、永田電流ミラー回路は電源電圧に対して出力電流がピークを持つ構成になっており、電源電圧の変動に対する出力電流の変動が一定となる範囲が狭い。

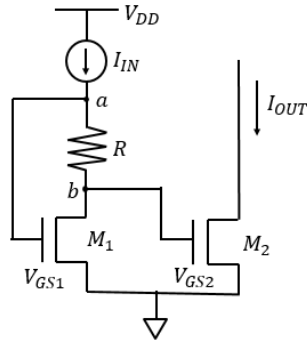


図1 永田電流ミラー回路
Fig.1 Nagata current mirror circuit

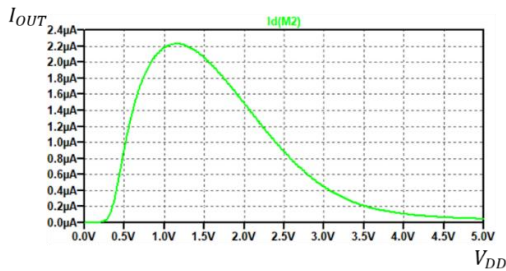


図2 永田電流ミラー回路の特性
Fig.2 Characteristics of Nagata current mirror

3. MOSFET の温度特性

次に MOSFET の温度特性を示す。MOSFET の閾値における温度特性では以下の式が成り立つ。

$$\frac{dV_{th}}{dT} = -1 \sim -3 [mV/^{\circ}C] \quad (14)$$

実際に MOSFET の温度特性についてシミュレーションを行うと図4の波形が得られる。

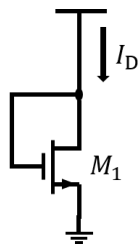


図3 MOSFET 温度特性の確認のための基本回路
Fig.3 Circuit for MOSFET temperature characteristics check

図4より、MOSFETには電流電圧特性において温度特性を持たないポイントが存在する。また温度特性を持つポイントに対してゲート電圧が低いときには高温でドレイン

電流が大きくなり（リーク電流が大きくなる）、高電圧では低温でドレイン電流が大きくなる。[6]

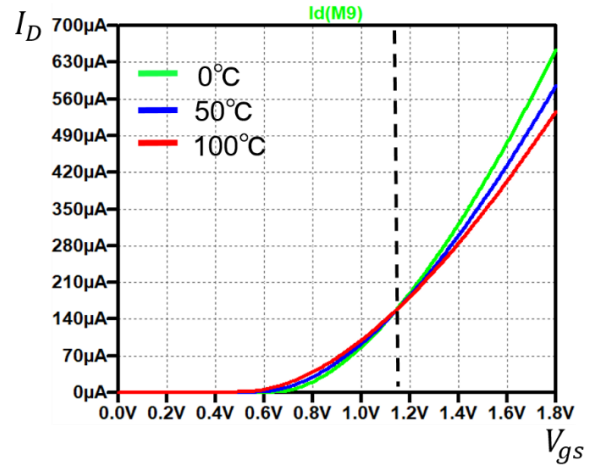


図4 MOSFET ドレイン電流の温度特性
Fig.4 MOSFET drain current temperature characteristics

4. 本論文での温度不感特性の提案回路

図5に MOS 永田電流ミラー回路を改良した基準電流源を示す。この回路は複数の MOS 永田電流ミラー回路を用いて異なるピークを持ちその電流の和をとる構成で、電源電圧及び温度が変動しても一定電流 I_{OUT_total} を出力できる。

図5の回路では温度が上昇すると I_{out2} は減少し、 I_{out5} は増加することに気が付き、抵抗の温度係数に基づき、各 MOS のデバイスサイズ、抵抗値を適切に設計して I_{out_total} を（電源電圧 V_{DD} 不感とともに）温度不感にすることが今回のポイントである。すなわち MOSFET ドレイン電流の温度特性がゲート電圧に依存することを積極利用する。[6]

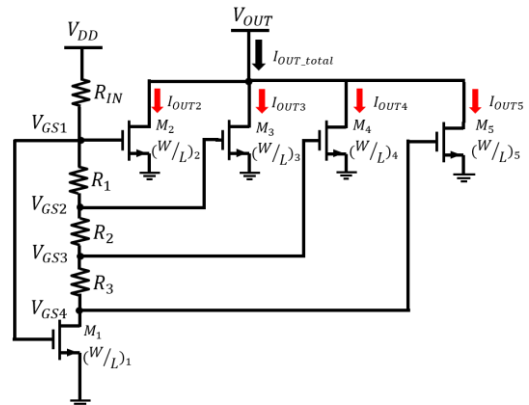


図5 MOS 永田電流ミラー回路を用いた基準電流源
Fig.5 Proposed reference current source using improved Nagata current mirror

5. 提案回路のシミュレーション結果

LTspiceを用いてシミュレーションをした回路を図6に、図7にその提案回路のシミュレーション結果を示す。TSMC社0.18 μm CMOSパラメータを使用した。電源電圧 V_{DD} を0Vから5Vまで変化させ横軸に示し、変化させた時の出力電流の変化を縦軸に示す。

続いて温度を-40 $^{\circ}\text{C}$,0 $^{\circ}\text{C}$,27 $^{\circ}\text{C}$,80 $^{\circ}\text{C}$ と変化させたときの総出力電流の変化の結果を図8に示す。

図7から総出力電流 I_{OUT_total} が90 μA 付近でほぼ一定となっていることがわかる。図6のシミュレーション回路では、4つのピークを用いて出力電流を一定とした。図8から温度変動に対し電流のばらつきが小さく電源電圧2.5V付近で温度特性を持たないポイントがあることがわかる。

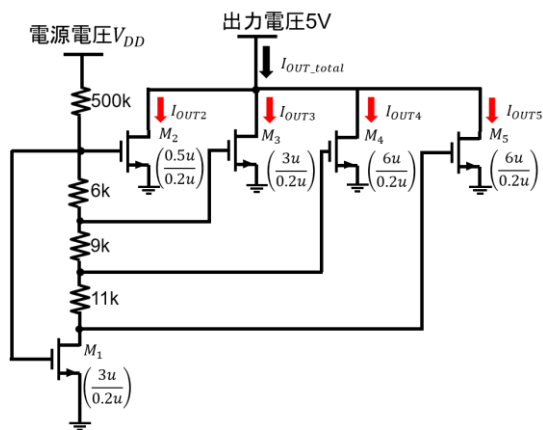


図6 シミュレーション回路

Fig.6 Simulation circuit of the proposed current mirror

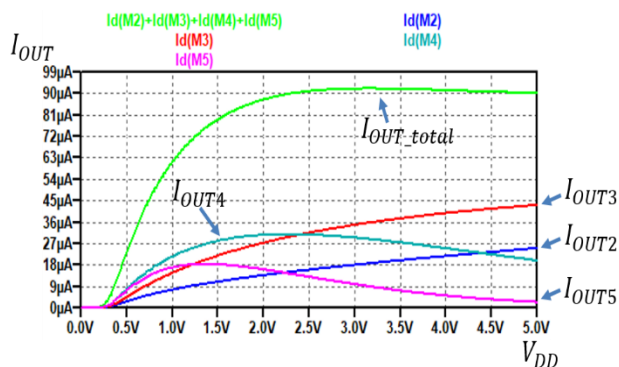


図7 図6の回路のシミュレーション結果

Fig.7 Simulation results of the proposed circuit in Fig.6

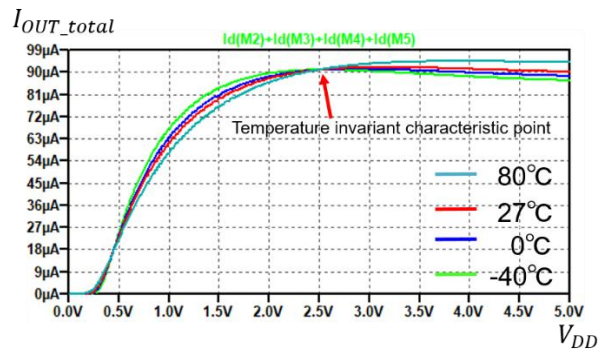


図8 温度を変化させたときの総出力電流の変化

Fig.8 Change in the total output current when the temperature is changed

次に図6の回路におけるM2、M3、M4、M5それぞれに流れる出力電流の温度特性を図9-図12に示す。

図9、図10、図11、図12それぞれのグラフからM2及びM3では低温になるにつれてドレイン電流が増加すなわち負の温度特性を持ち、M4及びM5では主に高電圧側で高温になるにつれてドレイン電流が増加すなわち正の温度特性を持っている。

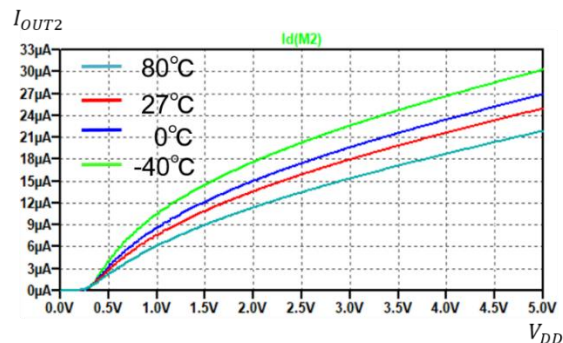


図9 出力電流 I_{OUT2} の変化

Fig.9 Change in the output current I_{OUT2}

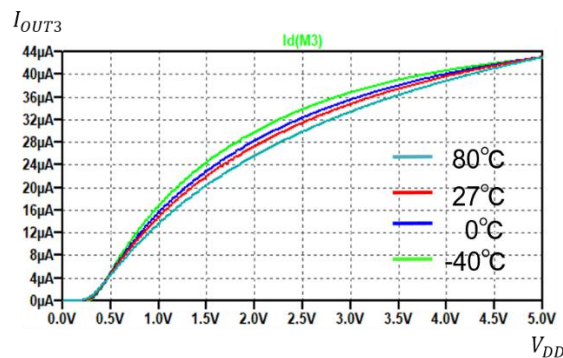


図 10 出力電流 I_{OUT3} の変化

Fig.10 Change in the output current I_{OUT3}

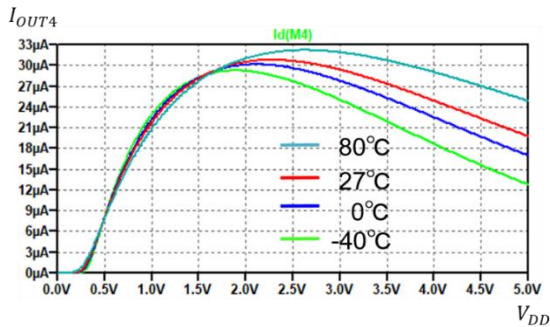


図 11 出力電流 I_{OUT4} の変化

Fig.11 Change in the output current I_{OUT4}

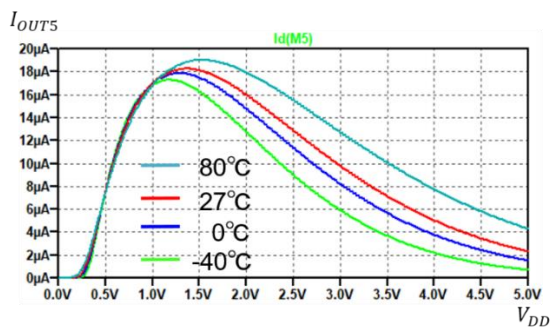


図 12 出力電流 I_{OUT5} の変化

Fig.12 Change in the output current I_{OUT5}

図 8 で正と負の温度特性の電流が足しあわされて温度補償が行われ、全体回路の温度不感特性が向上した。

温度上昇にともない M_2, M_3 のドレイン電流は減少し、 M_4, M_5 のドレイン電流は増加する。MOS の温度特性により抵抗に流れる電流 (M_1 ドレイン電流) が温度によって変化し、 M_2, M_3, M_4, M_5 にかかるゲート電圧が温度特性を持つことで、それぞれのドレイン電流が正または負の温度特性をもち、それらを加え合わせて全体として温度不感の出力電流を得る。

6. まとめ

この論文では異なる複数ピークを持つ永田電流源を用いて、電源電圧変動だけでなく温度変動に対しても出力電流が一定となる基準電流源の構成を提案し、SPICE シミュレーションで効果を確認した。

永田電流ミラー回路温度特性補償のための従来手法は「正の温度係数を持つ抵抗を使用する」ものが多いが [7]、ここでの提案手法は抵抗の温度係数は正でも負でも既知

であればデバイスサイズの適切な選択で対応できる。

現在、提案した回路を用いてバイアス電流が電源電圧・温度不感の電流型 DA 変換器の設計を検討している (図 13)。

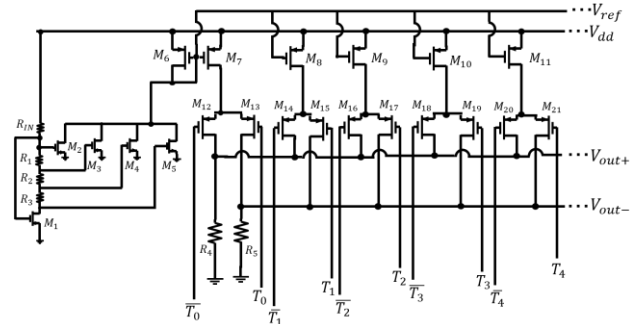


図 13 DA 変換器の回路図

Fig.13 Digital-to-analog converter circuit diagram

有益なコメントをいただきました北見工大名誉教授 谷本洋先生に感謝します。

参考文献

- (1) 特許公報 発明者 永田穰 出願日 1966 年 12 月 12 日
- (2) P. R. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, R. G. Meyer, Analysis and Design of Analog Integrated Circuits, John Wiley & Sons Inc., 2009
- (3) M. Hirano, N. Tsukiji, H. Kobayashi "Simple Reference Current Source Insensitive to Power Supply Voltage Variation - Improved Minoru Nagata Current Source", IEEE 13th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Hangzhou, China (Oct. 2016)
- (4) M. Hirano, N. Kushita, Y. Moroshima, H. Harakawa, T. Oikawa, N. Tsukiji, T. Ida, Y. Shibasaki, H. Kobayashi, "Silicon Verification of Improved Nagata Current Mirrors", IEEE 14th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Qingdao, China (Nov. 2018)
- (5) T. Hosono, N. Kushita, Y. Shibasaki, T. Ida, M. Hirano, N. Tsukiji, A. Kuwana, H. Kobayashi, Y. Moroshima, H. Harakawa, T. Oikawa "Improved Nagata Current Mirror Insensitive to Temperature as well as Supply Voltage", Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems, Nikko, Japan (Aug. 2019)
- (6) 井田貴士, 築地伸和, 小林春夫 "温度変動に依存しない MOS 定電流源の検討" 第 8 回 電気学会東京支部 栃木・群馬支所 合同研究発表会 (2018 年 3 月)
- (7) T. Abe, H. Tanimoto, S. Yoshizawa, "A Simple Current Reference with Low Sensitivity to Supply Voltage and Temperature", 24th International