

Источники опорного напряжения на дифференциальных парах полевых транзисторов с управляющим рп-переходом

Е.И. Старченко, И.В. Барилов, Д.Ю. Чернышов

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, star@sssu.ru

Аннотация — Рассматриваются варианты построения источников опорного напряжения (ИОН) на основе дифференциальных пар полевых транзисторов с управляющим рп-переходом. Показана возможность получения как положительного, так и отрицательного опорного напряжения с высокой температурной стабильностью.

Ключевые слова — источник опорного напряжения, температурный дрейф, моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

В 1997 Analog Devices выпустила первое поколение интегральных ИОН под торговой маркой XFET (*Extra Implant FET* - «полевой транзистор с дополнительной имплантацией затвора») [1]. Принципиальная схема ядра этого ИОН (рис. 1) напоминает схему ИОН Броккау с операционным усилителем [2], но принцип действия XFET совершенно иной. СТАТ-элемент (источник тока с отрицательным температурным дрейфом) XFET образован двумя истоковыми повторителями на р-канальных транзисторах с управляющим р-п-переходом.

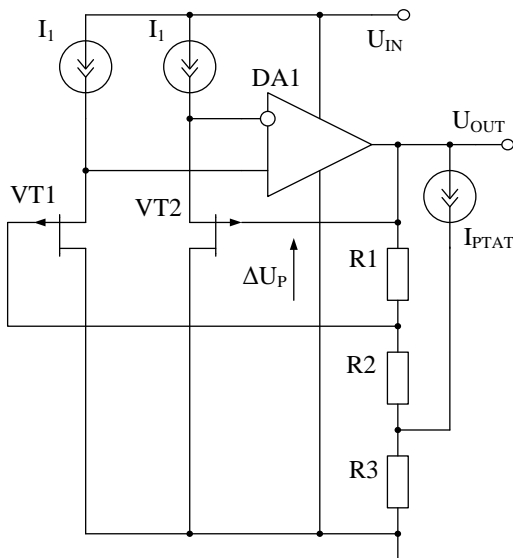


Рис. 1. Схема ИОН типа XFET

Один из двух транзисторов - обычный, а в канал второго транзистора имплантирован второй, дополнительный, затвор. Активные источники тока и операционный усилитель, управляющий напряжениями на затворах транзисторов, задают равные токи и равные напряжения сток-исток обоих транзисторов. Равенство токов и напряжений возможно только тогда, когда напряжения затвор-исток двух транзисторов различаются на величину ΔU_P , составляющую около 0,5 В. Температурный коэффициент ΔU_P , около -120 ppm/K , определяется диэлектрической проницаемостью кремния в дополнительном канале второго транзистора и практически не зависит от температуры. Стабильное напряжение U_{OUT} формируется сложением СТАТ-напряжения ΔU_P с падением РТАТ-тока (ток с положительным температурным дрейфом) на образцовом резисторе R_3 , а точная подстройка температурного коэффициента напряжения осуществляется лазерной подгонкой сопротивления резистора R_1 :

$$U_{OUT} = \Delta U_P \left(\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \right) + I_{PTAT} R_3$$

Несмотря на очень высокие эксплуатационные характеристики такого ИОН, на взгляд авторов, недостаток его заключается в схемотехнической сложности и требует дополнительных технологических операций (имплантации).

II. ТЕМПЕРАТУРНО-СТАБИЛЬНЫЙ ИОН ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

Предлагаемый вариант построения схемы ИОН с использованием полевых транзисторов с управляющим рп-переходом и каналом р-типа, приведен на рис. 2.

Работу данного ИОН можно пояснить следующим образом. Для выходного напряжения ИОН (без учета полярности) можно записать:

$$U_{OUT} = U_P \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \right) + U_{БЭ,8}, \quad (1)$$

где U_P – падение напряжения на резисторе R_2 ; $U_{БЭ,8}$ – напряжение база-эмиттер транзистора VT_8 .

Если выполнить условие:

$$\frac{\partial U_{OUT}}{\partial T} = \frac{\partial U_P}{\partial T} \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \right) + \frac{\partial U_{БЭ.8}}{\partial T} = 0, \quad (2)$$

то, по крайней мере, в одной точке в диапазоне температур температурный дрейф выходного напряжения будет равен нулю.

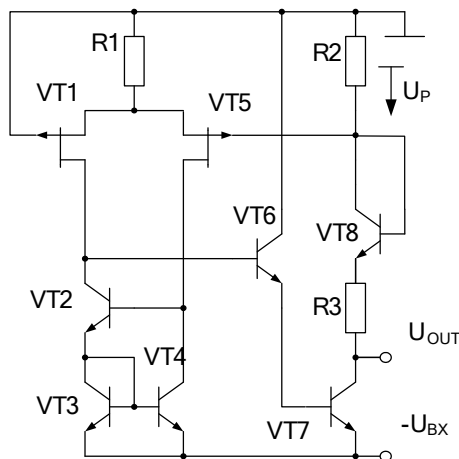


Рис. 2. Схем ИОН отрицательной полярности

Определим напряжение U_P из следующих соображений. Полевые транзисторы VT1 и VT5 работают при разных плотностях токов. Этого можно добиться, в частности, рассогласованием площадей полевых транзисторов. Например, если площадь транзистора VT1 в n раз больше, чем транзистора VT5, а коэффициент передачи повторителя тока на транзисторах VT2 – VT4 равен единице, то а счет действия отрицательной обратной связи токи полевых транзисторов будут равны.

Поскольку

$$I_{C.1} = nI_{C.НАЧ} \left(1 - \frac{U_{ЗН}}{U_{ОТС}} \right)^2; \quad (3)$$

$$I_{C.5} = I_{C.НАЧ} \left(1 - \frac{U_{ЗН} - U_0}{U_{ОТС}} \right)^2, \quad (4)$$

где $I_{C.НАЧ}$ – начальный ток стока полевого транзистора; $U_{ОТС}$ – напряжение отсечки; $U_{ЗН}$ – напряжение затвористок, то приравнивая правые части выражений (3) и (4), находим:

$$U_P = (\sqrt{n} - 1) (U_{ОТС} - U_{ЗН}). \quad (5)$$

Известно [3], что напряжение $U_{ОТС}$ с ростом температуры растет по абсолютной величине, а напряжение $U_{ЗН}$ с ростом температуры падает, так как снижается начальный ток стока, результирующий температурный дрейф напряжения U_P будет положительным.

В этом случае выражение (1) можно представить следующим образом:

$$U_{OUT} = (\sqrt{n} - 1) (U_{ОТС} - U_{ЗН}) \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \right) + U_{БЭ.8}. \quad (6)$$

Возможен и другой вариант построения ИОН на рассматриваемом принципе - когда транзисторы VT1 и VT5 одинаковы, а коэффициент передачи повторителя тока на транзисторах VT2 – VT4 меньше единицы. В этом случае выражение для U_P приобретает вид:

$$U_P = (U_{ОТС} - U_{ЗН}) \left(\frac{1 - \sqrt{K}}{\sqrt{K}} \right), \quad (7)$$

где $K < 1$ – коэффициент передачи повторителя тока.

В частности, при $K=1/n$ выражения (5) и (7) совпадают.

Таким образом, выбором отношения сопротивлений резисторов R3 и R2 (рис. 2) осуществляется выравнивание температурного дрейфа напряжения база-эмиттер и $(U_{ОТС} - U_{ЗН})$.

Результаты моделирования схемы ИОН приведены на рисунках 3 и 4.

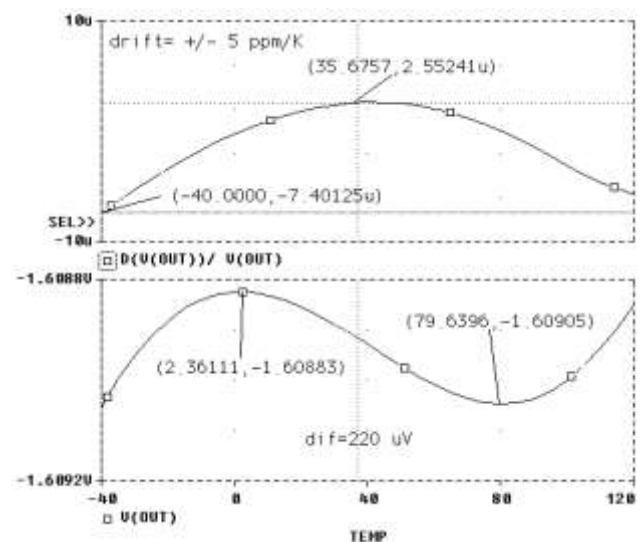


Рис. 3. Результаты моделирования схемы ИОН рис. 2 при $n=2$ и $K=1$

При рассогласовании толщины канала полевого транзистора (при $n = 2$) максимальное отклонение выходного напряжения в диапазоне температур от -40°C до 120°C не превышает 220 мкВ. Для коммерческой оценки температурного дрейфа с помощью выражения

$$TKH = \frac{|U_{ВЫХ.МАКС} - U_{ВЫХ.МИН}|}{U_{ВЫХ} \Delta T}$$

получаем, что ТКН составляет 0,85 ppm/K. Верхний график рисунка 3 предоставляет возможность определить ТКН в любой точке диапазона: при отрицательных температурах он не превышает -7,5 ppm/K, а при положительных - +2,6 ppm/K.

Результаты для случая, когда $n=2/2=1$, а $K = 0,5$, приведены на рисунке 4. Эти результаты несколько лучше, так как площади транзисторов увеличены вдвое при сохранении отношения, равного единице, что приводит к повышению начальной крутизны полевых

транзисторов и увеличению напряжения затвор-исток. Именно поэтому выходное напряжение несколько меньше по абсолютной величине, а точность несколько выше.

Температурный коэффициент в этом случае составляет 0,26 ppm/K, а температурный дрейф в области отрицательных температур не превышает 4 ppm/K, в области положительных температур – не более 1 ppm/K.

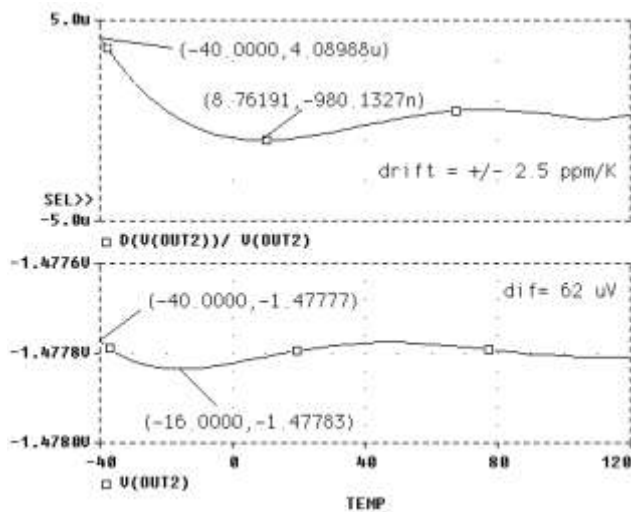


Рис. 4. Результаты моделирования схемы ИОН рис. 2 при $n=1$ и $K=0,5$

На рисунке 5 приведена модифицированная схема ИОН рисунка 2 в среде PSpice. Необходимо отметить, что выбор резистора R1 (рис. 2) не может быть произвольным. Для получения лучших результатов необходимо выбирать резистор R1 так, чтобы ток стока транзистора VT5 был близок к $I_{C,нач}$, тогда этот транзистор работает с максимальной крутизной.

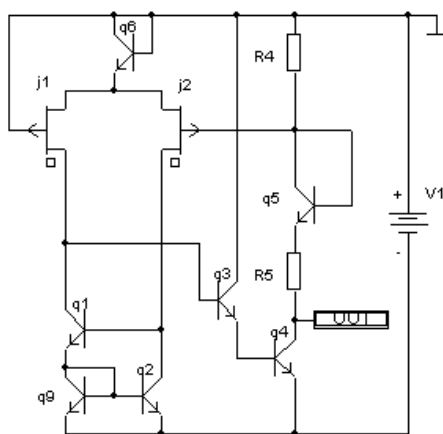


Рис. 5. Модифицированная схема ИОН при $n=2$ и $K=1$

Возможно это некоторая «случайность», обусловленная типом применяемых полевых транзисторов, но замена резистора R1 на транзистор в диодном включении упрощает технологичность схемы и не требует дополнительной подстройки резистора R1.

Результат моделирования модифицированной схемы рисунка 5 приведен на рисунке 6.

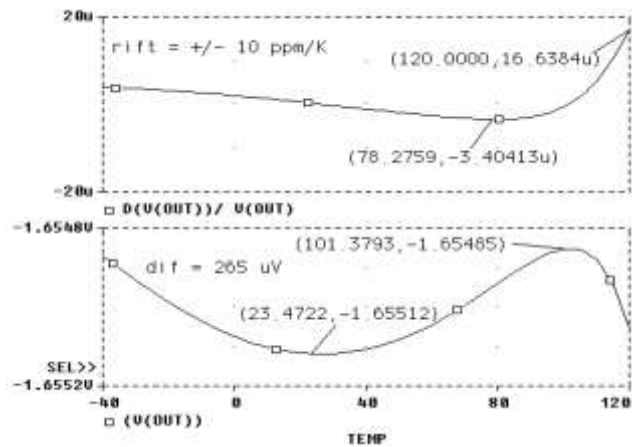


Рис. 6. Результаты моделирования схемы ИОН рис. 5 при $n=2$ и $K=1$

Таким образом, используя дифференциальную пару полевых транзисторов можно получить схемотехнические решения для построения прецизионных ИОН. Совершенно очевидно, что если в распоряжении разработчика будут, наряду с биполярными транзисторами, полевые транзисторы с каналом p-типа, удастся выполнить ИОН с положительной полярностью выходного напряжения, основываясь на этом же схемотехническом принципе.

III. ТЕМПЕРАТУРНО-СТАБИЛЬНЫЙ, РАДИАЦИОННО СТОЙКИЙ ИОН, НЕ СВЯЗАННЫЙ С ШИРИНОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ КРЕМНИЯ

Как правило, процесс проектирования температурно-стабильного ИОН связан с получением источника тока типа РТАТ, который выполняется на основе разности напряжений база-эмиттер биполярных транзисторов. Ниже рассмотрен схемотехнический способ построения источников тока типа РТАТ и типа СТАТ на основе одного дифференциального каскада.

Схема такого ИОН приведена на рис. 7. Работу этой схемы можно пояснить следующим образом. К затвору полевого транзистора VT3 приложено напряжение база-эмиттер транзистора VT1, имеющее отрицательный температурный дрейф. Поэтому с ростом температуры ток стока полевого транзистора VT3 будет уменьшаться. Поскольку транзисторы VT3 и VT4 включены как дифференциальная пара, ток стока полевого транзистора VT4 будет возрастать с ростом температуры.

К сожалению, приращение тока стока полевого транзистора VT4 не будет в точности совпадать с приращением тока стока VT3 [4], [5], поэтому суммирование токов осуществляется с помощью двух резисторов – R4 и R5, как показано на рисунке 7.

В этом случае для выходного напряжения ИОН можно записать:

$$I_4 R_4 + R_5 (I_3 + I_4) = U_2,$$

где I_3, I_4 – токи стоков соответствующих полевых транзисторов.

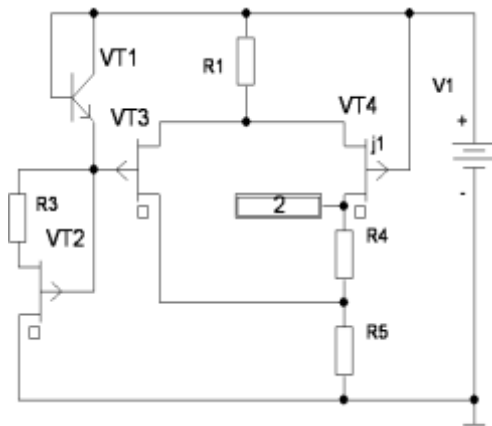


Рис. 7. Схема ИОН с выходным напряжением, не зависящим от ширины запрещенной зоны кремния

Анализ этой схемы достаточно сложен и позволяет получить окончательное решение только в численном виде, поэтому в данной работе приводятся только результаты моделирования (рис. 8). Следует только отметить, что начальные рабочие точки полевых транзисторов (при комнатной температуре) выбираются в окрестности температурно-стабильной точки проходной характеристики [3].

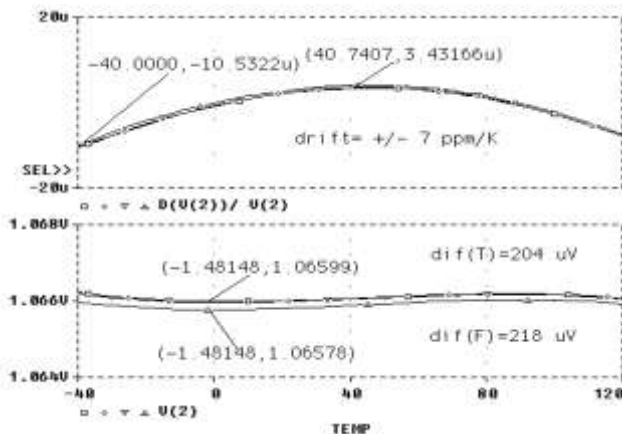


Рис. 8. Зависимость выходного напряжения схемы ИОН рис. 7 (нижний график) и относительной температурной нестабильности (верхний график) при воздействии температуры и потока нейтронов (\square - $F=0$; \diamond - $F=10^{12}$ н/см²; ∇ - $F=10^{13}$ н/см²; Δ - $F=10^{14}$ н/см²)

Важной особенностью данной схемы является возможность масштабирования выходного напряжения – изменяя сопротивления резисторов R_4 и R_5 , сохраняя их отношение, можно получить выходное напряжение, изменяющееся в достаточно широком диапазоне с сохранением температурной стабильности. Причем выходное напряжение может быть как меньше, так и больше ширины запрещенной зоны кремния.

Отметим, что полевые транзисторы, находящиеся в составе АБМК [6], практически нечувствительны к радиационному воздействию и вся радиационная нестабильность определяется биполярным транзистором VT_1 . В результате при одновременном воздействии температуры и потока нейтронов с плотностью вплоть до 10^{14} н/см² (кривая Δ), выходное напряжение меняется всего на 218 мкВ, а относительный температурный дрейф составляет ± 7 ppm/K. То, что в выходном напряжении ИОН доминирует составляющая температурной нестабильности третьего порядка, обусловлено одновременным влиянием собственной зависимости тока стока дифференциального каскада от температуры [3], [7], [8].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены схемотехнические приемы построения ИОН на основе дифференциальных пар полевых транзисторов. Проведенный анализ и результаты моделирования показывают эффективность предложенных способов построения ИОН, позволяющих получить температурно-стабильное выходное напряжение и обладающих повышенной радиационной стойкостью.

ПОДДЕРЖКА

Статья подготовлена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ № 2014/38, 2014 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Авербух В. Прецизионные источники опорного напряжения. Параметры и особенности применения. URL <http://www.cec-mc.ru/data/File/PDF/ion.pdf> (дата обращения 18.01.2014).
- [2] Brokaw A.P. Band-gap voltage reference with curvature correction / US patent No.: 4250445, Feb. 10, 1981.
- [3] Достал И. Операционные усилители: пер. с англ. М.: Мир, 1982. С. 60-66.
- [4] Prokopenko N.N., Budyakov P.S, and Serebryakov A.I. Architecture of the Microwave Differential Operating Amplifiers with Paraphrase Output // International Conference on Signals and Electronic Systems. 2010. P. 165-168.
- [5] Пат. №2452078 РФ. Двухканальный дифференциальный усилитель / Гавлицкий А.И., Малышев В.Г., Прокопенко Н.Н., Старченко Е.И. ; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 12.
- [6] Дворников, О.В., Чеховской В.А. Аналоговый биполярно-полевой БМК с расширенными функциональными возможностями // Chip News. 1999. № 2. С. 21-23.
- [7] Старченко Е.И., Кузнецов П.С. Способ компенсации квадратичных составляющих температурного дрейфа источников опорного напряжения // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2012. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИПИМ РАН, 2012. С. 344 - 349.
- [8] Пат. №2475807 РФ. Источник опорного напряжения / Старченко Е.И., Кузнецов П.С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС». № 2012108501 ; заявл. 06.03.2012 ; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.