

Твердотельная электроника

УДК 621.316.54:621.314.632

П.Г. Мережаний, Л.Н. Павлов, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Повышение сопротивления генератора тока

Исследована возможность повышения выходного сопротивления генератора тока, построенного на интегральных структурах горизонтальных р-п-р-транзисторах. Проведены экспериментальные исследования интегральных структур р-п-р-транзисторов с разными вариантами конструкций, влияющих на процессы переноса носителей. На основе экспериментальных данных установлена необходимость модификации генератора тока. Из нескольких вариантов исполнения в ходе усовершенствования конструкции базовой интегральной структуры отобрано оптимальное решение. Проведено сравнение параметров исходного и модифицированного генератора тока. Библиограф. 5, рис. 5, табл. 5.

Ключевые слова: генераторы постоянного тока, интегральные микросхемы, токовое зеркало, выходное сопротивление генератора тока, интегральная структура, операционный усилитель

Введение

Такая характеристика, как зависимость тока потребления от величины напряжения питания представляет собой важнейшую характеристику операционного усилителя (ОУ). В явном виде ограничения на ток потребления указываются также в таблице норм параметров с указаниями «не больше» [1-3]. Уровень зависимости тока потребления от напряжения питания определяется специализированными элементами интегральной схемотехники – генераторами тока. Как правило, от качества генераторов тока зависит точность режимов работы практически всех узлов интегральных микросхем, чем, в конечном счете, определяется и общая зависимость тока потребления от вариации напряжения питания.

В современных операционных усилителях различают в основном два типа ГТ: стартовые (опорные, эталонные) ГТ и внутриузловые – ра-

бочие ГТ. Опорные ГТ предназначены для выработки первичного (пускового) тока, который с помощью токового зеркала передается на внутриузловые ГТ с требуемым коэффициентом отражения. Построение стартовых генераторов составляет отдельную область исследований и не рассматривается в данной работе.

Наиболее часто рабочие ГТ строятся на основе так называемых отражателей тока. Точность работы таких ГТ определяется в первую очередь отклонением его вольт-амперной характеристики (ВАХ) от идеализированной, в которой ток не зависит от напряжения на выходе генератора. В этом случае качество ОУ будет определяться в первую очередь величиной выходного сопротивления генераторов тока и при разработке учитывается также и тот факт, насколько точно отраженный ток соответствует исходному току по абсолютной величине. Далее. В данной работе исследуются только те генераторы тока, которые построены на горизонтальных р-п-р-транзисторах. С одной стороны этот класс генераторов тока приближенно рассмотрен практически в каждой монографии по аналоговой интегральной схемотехнике, например [4]. Но ужесточение требований к параметрам современных интегральных микросхем требует щепетильного подхода к этим узлам, с учетом реальной конструкции интегральных элементов, особенности исполнения которых также существенно влияют на характер работы ГТ в типовом диапазоне изменения питающего напряжения V_{cc} от $\pm 2,5$ В до ± 18 В. При униполярном питании этот же диапазон составляет соответственно от 5 В до 36 В. Минимальная граница этого диапазона ($\pm 2,5$ В) представляет достаточно жесткое условие, исключаящее, как правило, возможность использования в микросхемах ОУ токового зеркала Уильсона. По этим причинам в данной работе будут исследоваться только те ГТ, которые построены на двух горизонтальных р-п-р-транзисторах, рис.1, где обозначены:

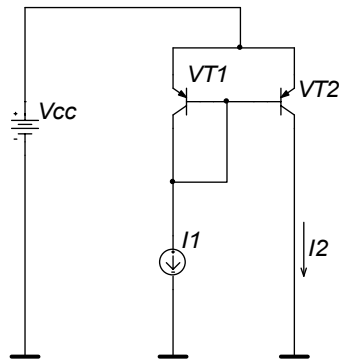


Рис. 1. Схема генератора тока

$I1$ – стартовый ГТ, $VT1$ – формирователь потенциала база-эмиттер, $VT2$ – отражатель тока $I1$. Несмотря на то, что в транзисторе $VT1$ коллектор подключен к базе, он в целом сохраняет свои усилительные свойства, но некоторая деградация усиления все же отмечается [5]. Для чистоты исследований каждый транзистор схемы, рис.1, был выполнен в отдельном кармане интегральной структуры, разрез которой приведен на рис.2.

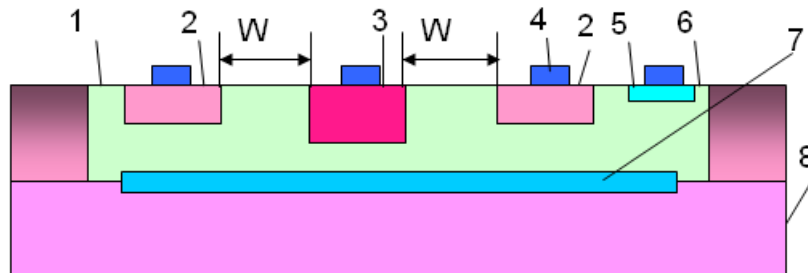


Рис. 2. Структура горизонтального p-n-p-транзистора: 1– N-эпитаксия; 2 – P-коллектор; 3 – P-эмиттер; 4 – контакт; 5 – N-база; 6 – P-разделение; 7 – N⁺-скрытый слой; 8 – P-подложка <111>

Для этой схемы при ширине базы $W=9$ мкм, токе $I1 = 100$ мкА получена следующая зависимость -

мощь выходного тока генератора при изменении напряжения на источнике V_{cc} :

Таблица 1. Зависимость тока генератора от напряжения V_{cc}

V_{cc} , В	5,0	10	15	20	25	30	35	40
$I2$	104,3	110,5	114,8	118,0	122,8	127,7	131,9	146,9

Эквивалентное выходное сопротивление, отсчитанное по уровням 10...40В составляет $R_{вых} = 30 / (146,9 - 110,5) = 30 / 36,4 = 824$ кОм. Низкое выходное сопротивление, или, по-другому, высокая зависимость тока $I2$ от напряжения V_{cc}

побудила к исследованию путей снижения крутизны функции $I2=f(V_{cc})$. В соответствии с традиционным подходом [4] ширина базы была увеличена до 12 мкм. Исследования ГТ с расширенной базой дало результаты, приведенные ниже в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость тока генератора от напряжения V_{cc}

V_{cc} , В	5,0	10	15	20	25	30	35	40
$I2$	106,3	111,5	115,8	119,3	122,8	125,7	127,9	132,1

Здесь эквивалентное выходное сопротивление по уровням 10-40В составляет $R_{вых} = 30 / (132,1 - 111,5) = 30 / 20,6 = 1,45$ мОм

Из этих данных следует, что выходное сопротивление ГТ возросло, но не достигает требуемого, которое должно быть хотя бы в 1,5 раза выше. Вместе с тем, возможности по расширению базы и, соответственно, увеличения

габаритных размеров интегральной структуры исчерпаны.

Поэтому цель работы состоит в том, чтобы исследовать возможность увеличения выходного сопротивления генераторов тока без дальнейшего увеличения их геометрических размеров.

Если учесть, что с целью унификации элементной базы рабочие ГТ строились на основе той же интегральной конструкции, что и усилительные элементы, то задача данной работы состоит в том, чтобы провести анализ интегральных структур и определить причины обнаруженного снижения выходного сопротивления ГТ и наметить пути для его повышения в 1,5 раза.

Исследование элементной базы

Для определения причин снижения выходного сопротивления исследуем интегральную структуру $VT1$. Для этого составим модель эксперимента с учетом паразитного вертикального р-п-р-транзистора, эмиттером которого выступает область эмиттера рабочего горизонтального транзистора, базой – область кармана, а в качестве коллектора – область разделения. В данном случае, когда база рабочего транзистора подключена к коллектору, нет смысла рассматривать случай, когда в качестве эмиттера паразитного транзистора следует учитывать области коллектора рабочего транзистора, так как в рабочем режиме для транзистора структура (рис. 2) не может входить в насыщение. С учетом этих оговорок схема эксперимента может быть представлена так, как это показано, на рис. 3.

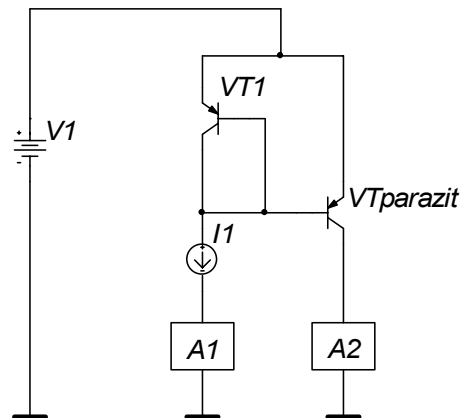


Рис. 3. Схема измерения параметров транзистора $VT1$ с учетом паразитного транзистора VT_{parazit} : $V1$ – источник напряжения, $I1$ – генератор стартового тока, $A1$, $A2$ – измерители тока

Для начала вернемся к транзистору $VT1$ с шириной базы $W = 9$ мкм.

Измерения токов паразитного транзистора при заданных токах рабочего транзистора, с вариацией напряжения питания представлены в таблице 3.

Таблица 3. Зависимость тока генератора от напряжения V_{cc}

V_{cc} , В	5					
$A1$, μA	20	40	80	160	320	640
$A2$, μA	0,251	0,508	1,071	2,452	5,741	11,10
V_{cc} , В	10					
$A2$, μA	0,267	0,550	1,180	2,611	6,104	15,32
V_{cc} , В	20					
$A2$, μA	0,322	0,665	1,421	3,134	7,274	17,79
V_{cc} , В	40					
$A2$, μA	0,385	0,791	1,652	3,623	8,319	20,028

Из этих результатов следует, что ток паразитного транзистора составляет существенную величину, до 3,2% от тока коллектора. Этот ток не фиксируется в исходном транзисторе, но, благодаря работе отражателя, будет входить в зеркальный ток. Таким образом, одна из причин уменьшения выходного сопротивления состоит в образовании тока в паразитной структуре. Причина столь существенного тока может быть в том, что с целью повышения коэффициента усиления (а структура формировалась в первую

очередь исходя из требований по усилению) в область эмиттера проводилось дополнительное легирование бора и встраивалась P^+ -область. В итоге в область эмиттера попал слой глубокого залегания. Уровень этого слоя оказалась ниже, чем области коллектора, что способствовало свободному перемещению части носителей на область разделения. При высоком уровне инжекции за счет высоколегированной области это пагубно сказалось на выходном сопротивлении ГТ.

Модификация элементной базы

Так как для ГТ коэффициент усиления – параметр не принципиальный, то исключение повторного легирования в область эмиттера по-

зволяет исключить слой глубокого залегания в области эмиттера и изменить профиль интегральной структуры, как это показано на рис. 4, вследствие чего можно ожидать увеличения выходного сопротивления.

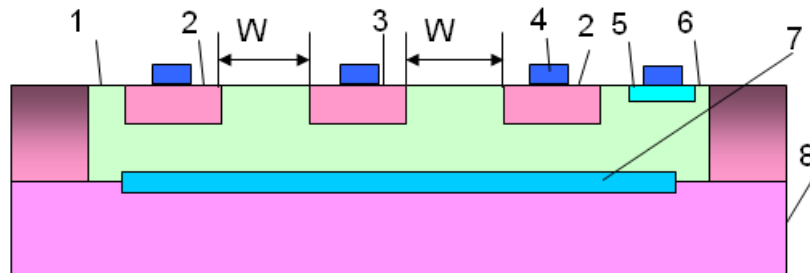


Рис. 4. Структура генераторного р-п-р-транзистора: 1 – N-эпитаксия; 2 – P-коллектор; 3 – P-эмиттер; 4 – контакт; 5 – N-база; 6 – P-разделение; 7 – N⁺-скрытый слой; 8 – P-подложка <111>

Действительно, при измерении параметров ГТ по схеме (рис.1) получены результаты, представленные в таблице 4. При этом габаритные размеры интегральной структуры не претерпели изменения.

ридные размеры интегральной структуры не претерпели изменения.

Таблица 4. Зависимость тока генератора от напряжения Vcc

Vcc, В	5,0	10	15	20	25	30	35	40
I ₂	105,0	110,0	112,5	115,0	118,1	122,1	125,5	128,2

Из таблицы эквивалентное выходное сопротивление по уровням 10-40В составляет $R_{\text{вых}}=30/(128,8-10,0)=30/18,2=1,64$ МОм. Сопротивление ГТ существенно возросло, благодаря уменьшению эффекта Эрли. Но и такие данные не позволяют получить высококачественный рабочий ГТ с учетом возможных разбросов в условиях серийного производства. Анализ таблицы 4 и экспериментальное исследование структуры (рис. 4) показало, что в данном случае доминирующим фактором в уменьшении

выходного сопротивления выступают уже не паразитные токи структуры, а влияние области пространственного заряда, существенно уменьшающее напряжение Эрли. Для минимизации этого эффекта в область между эмиттером и коллектором была имплантирована N⁻-область, рис.5. Результаты измерения окончательного варианта ГТ сведены в таблицу 5. Из таблицы эквивалентное выходное сопротивление по уровням 10-40В составляет $R_{\text{вых}}=30/(121,0-108,0)=30/13,0=2,3$ МОм.

Таблица 5. Зависимость тока генератора от напряжения Vcc

Vcc, В	5,0	10	15	20	25	30	35	40
I ₂	103,9	108,0	110,1	112,2	114,9	117,1	119,2	121,0

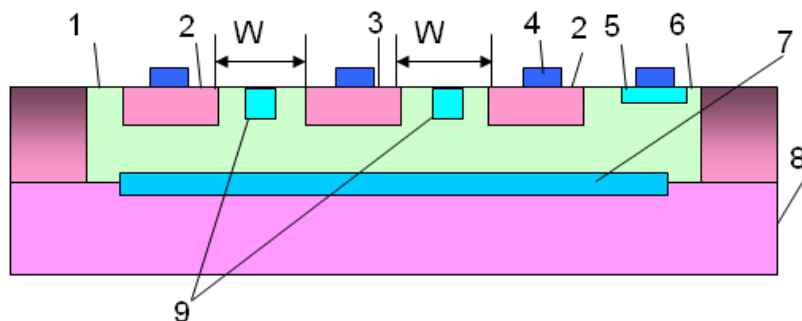


Рис. 5. Структура генераторного р-п-р-транзистора с N⁻-областями: 1 – n-эпитаксия; 2 – P-коллектор; 3 – P-эмиттер; 4 – контакт; 5 – n-база; 6 – p-разделение; 7 – n⁺-скрытый слой; 8 – p-подложка <111>; 9 – N⁻-области

Контроль ВАХ транзисторов показал, что удаление P^+ -областей из эмиттера и введение N^- -областей между эмиттером и коллектором снизило коэффициент усиления генераторного транзистора в схеме с общим эмиттером с 600 до 80, но это не привело ни к каким нежелательным последствиям с точки зрения функционирования ОУ в целом.

В целом, в результате анализа и целенаправленного поиска за счет создания специализированного транзистора для генератора тока удалось повысить выходное сопротивление рабочего генератора тока почти в четыре раза по сравнению с первоначальным уровнем. При этом топологические размеры транзисторов не претерпели существенного увеличения в габаритных размерах.

Выводы

- Увеличение выходного сопротивления генератора тока возможно за счет увеличения расстояния между эмиттером и базой, но это увеличивает топологические размеры транзисторов.
- Дальнейшее повышение выходного сопротивления возможно за счет создания транзисторов, специально предназначенных для генераторов тока.
- В генераторных транзисторах в области эмиттера не должны находиться слои глубокого залегания.

- Для подавления эффекта Эрли и увеличения выходного сопротивления генератора тока в пространство между эмиттером и коллектором целесообразно встраивать N^- -область, что позволяет существенно увеличить выходное сопротивление без изменения габаритных размеров интегральной структуры.

Список использованных источников

1. *Single Supply, Rail-to-Rail, Low Power, FET Input Op Amp. AD820.* Analog Devices. Data Sheet. Rev. H, 2011, pp. 1–24.
2. *Single Supply, Rail-to-Rail, Low Power, FET Input Op Amp. AD822.* Analog Devices. Data Sheet. Rev. H, 2011, pp. 1–24.
3. *Dual, 16 MHz, Rail-to-Rail, FET Input Amplifier. AD823.* Analog Devices. Data Sheet. Rev. D, 2010, pp. 1–20.
4. *J. Huijsing. Operational Amplifiers. Theory and Design.* Springer. ISBN-10: 9400705956 | ISBN-13: 978-9400705951 | Publication Date: May 25, 2011 | Edition: 2nd Edition, pp. 1–435.
5. *Гусев В.А., Борисов О.В., Яганов П.О., Павлов Л.Н.* Микроэлектронные сенсоры для контроля температуры интегральных микросхем. *Электроника и связь.* №1(54), 2010г., с. 5 – 11.

Поступила в редакцию 12 февраля 2014 г.

УДК 621.316.54:621.314.632

П.Г. Мережаний, Л.М. Павлов, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Україна.

Підвищення опору генератора струму

Досліджена можливість підвищення вихідного опору генератора струму, побудованого на інтегральних структурах горизонтальних р-п-р-транзисторів. Проведені експериментальні дослідження інтегральних структур горизонтальних р-п-р-транзисторів з різними варіантами констукцій, що впливає на процеси переносу носіїв. На основі експериментальних даних визначена необхідність модифікації генератора струму. З декількох варіантів виконання в процесі удосконалення констукції базової структури відібрано оптимальне рішення. Проведено порівняння параметрів початкового та модифікованого генератора струму. Бібл. 5, рис. 5, табл. 5.

Ключові слова: генератори постійного струму, інтегральні мікросхеми, дзеркалу струму, вихідний опір генератора струму, операційний підсилювач.

UDK 621.316.54:621.314.632

P.G. Merejany, L.N.Pavlov, Ph.D.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

Current Source Impedance Rising

Possibility of rising of output resistance of generator of the current built on the integral structures of horizontal p is investigational - n - p- transistors. Experimental studies of integral structures of p - n - p- transistors are undertaken with the different variants of constructions influencing on the processes of transfer of carriers. On the basis of experimental data the necessity of modification of generator of current is set. From a few variants of execution during the improvement of construction of base integral structure an optimal decision is selected. Comparison of parameters of initial and modified generator of current is done. Bibl. 5, fig. 5, table. 5.

Keywords: . generator of the current, integral structures, current mirror, output resistance of current mirror, opamp.

References

1. *Single Supply, Rail-to-Rail, Low Power.* (2011), "FET Input Op Amp. AD820. Analog Devices". Data Sheet. Rev. H, Pp. 1–24.
2. *Single Supply, Rail-to-Rail, Low Power.* (2011), "FET Input Op Amp. AD822. Analog Devices". Data Sheet. Rev. H, Pp. 1–24.
3. *Dual, 16 MHz, Rail-to-Rail, FET Input Amplifier.* AD823. Analog Devices. Data Sheet. Rev. D, 2010, pp. 1–20.
4. *J. Huijsing.* (2011), "Operational Amplifiers. Theory and Design. Springer". ISBN-10: 9400705956 | ISBN-13: 978-9400705951 | Publication Date: May 25, 2011 | Edition: 2nd Edition, pp. 1–435.
5. *V.A. Gusev, A.V. Borisov, P.A. Yaganov.* (2010), "Microelectronic Sensors for IC temperature control". Electronics and Communications, №1(54), Pp. 5 – 11.