

На рис. 2 и 3 приведены экспериментальные (сплошные линии) и рассчитанные по (2) (пунктирные линии) выходные ВАХ полевых транзисторов. При стоковых напряжениях больших V_{ds} для заданного затворного напряжения V_g ток стока полагался постоянным и равным I_{dmax} (прерывистые линии) [3]. Тестовый транзистор (рис. 2) изготовлен на кремниевой подложке p -типа, ориентированной в направлении (111), глубина n^+ -областей истока и стока $\approx 0,5$ мкм, электрод затвора из алюминия. Как видно из рис. 2, 3, напряжение насыщения тока стока совмещается с напряжением, рассчитанным по формуле (3) при заданных конструктивно-технологических параметрах прибора и напряжении затвора V_g . Рассчитанные по (3) и полученные из эксперимента зависимости V_{ds} от затворного напряжения близки к линейным и хорошо согласуются между собой.

Таким образом, полученные экспериментальные и расчетные данные показывают, что подвижность электронов в проводящем канале слабо зависит от напряжения на стоке при $v_d < v_{ds} < 2\phi_f$ для заданного затворного напряжения и ее изменение можно не учитывать при идентификации начального участка ВАХ. Предлагаемая формула (2) дает возможность оценить величину тока и напряжение на начальном участке ВАХ и при переходе в режим насыщения у транзисторов, для которых выполнено условие $V_d < 2\phi_f + V_b$.

1. Маллер Р., Кейминс Г. Элементы интегральных схем. М., 1989.
2. Андреев А.Д., Бельский А.М., Валиев А.А. // Вестн. Белорус. ун-та Сер. 1. 1996. № 1. С. 26.
3. Они же // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. 1997. № 1. С. 26.
4. Vanna M. // Int. J. Electron. 1994. Vol. 77. № 1. P. 49.
5. Toriumi Akira, Iwase Masao, Yoshimi Makoto // IEEE Trans. electron dev. 1988. Vol. 35. № 7. P. 999.

Поступила в редакцию 28.12.2000.

Андреев Альберт Данилович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники БГУ.

Бельский Александр Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической оптики БГУ.

Валиев Александр Анатольевич – программист РОУДП «Торговый Дом Горизонт».

УДК 621.382.33-185.4: 621.382.323-085.4

А.И. БЕЛОУС, С.А. ЕФИМЕНКО, В.В. ПОНАРЯДОВ, А.В. ПРИБЫЛЬСКИЙ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ БИПОЛЯРНОГО И МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

The article is dedicated to investigation of key characteristics of bipolar and MOS-transistors, determining their high speed as parts of Bi-CMOS LSIC. Fly-over time spaces through active structure in "source-drain" and "emitter-collector" are compared, slope, current density and geometrical dimensions of n - p - n - and n -MOS-transistors are defined. Demands to boundary frequency of bipolar transistor in Bi-CMOS LSIC are specified. The results of experimental investigation are provided.

Целью данного исследования явился сопоставительный анализ основных характеристик биполярного и МОП-транзисторов, определяющих их быстродействие в составе БиКМОП БИС. Совершенствование технологии КМОП, выразившееся, в частности, в уменьшении длины канала, привело к тому, что эта технология в применении к СБИС успешно вытесняет биполярные технологии. В этой связи представляет практический интерес во-

прос о нахождении тех режимов работы биполярных транзисторов, при которых можно наиболее полно использовать их преимущества при проектировании БиКМОП СБИС.

1. *Оценка времени пролета носителями заряда участков структуры «исток–сток» и «эмиттер–коллектор»*

Минимальное время задержки переключения МОП- и биполярного транзистора определяется временем пролета участков структуры соответственно «исток–сток» и «эмиттер–коллектор». В биполярном *n-p-n*-транзисторе при высоких уровнях инжекции неосновных носителей время пролета ими базы есть [1]:

$$\tau_B = \frac{W_B^2}{4D_n}, \quad (1)$$

где W_B – ширина активной квазиоднородной базы, $D_n = 34,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент диффузии электронов в базе *n-p-n*-транзистора при комнатной температуре.

В канале *n*-МОП-транзистора, т. е. в промежутке активной структуры между истоком и стоком, электроны движутся за счет дрейфа. В этом случае время пролета участка «исток–сток» электронами вычисляется по формуле [2]:

$$\tau_n = \frac{L_{eff}^2}{\mu_n V_D}, \quad (2)$$

где L_{eff} – эффективная длина канала, $\mu_n \approx 600 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ – подвижность электронов в поверхностной области кремния при суммарной концентрации примесей в кармане $\sim 3 \cdot 10^{19}$ [1, 2], $V_D = 5 \text{ В}$ – типичное напряжение на стоке.

Приравняв τ_B и τ_n из выражений (1) и (2), получаем:

$$W_B = \frac{L_{eff}}{4,655}. \quad (3)$$

Из формул (1–3) следует, например, что *n*-МОП-транзистор с $L_{eff} = 1,5 \text{ мкм}$ обеспечивает такое же быстродействие, что и биполярный транзистор с шириной базы $W_B = 0,32 \text{ мкм}$. Следует отметить, что этот вывод получен на основании упрощенного подхода, не учитывающего величин паразитных емкостей и сопротивлений элементов.

2. *Зависимость граничной частоты биполярного транзистора от длины канала МОП-транзистора в БиКМОП БИС*

Известно, что основным параметром, характеризующим быстродействие биполярного транзистора, является его граничная частота f_T . Быстродействие МОП-транзистора определяется главным образом длиной канала L_{eff} . В работе [1] показано, что для того, чтобы БиКМОП-технология обеспечивала более высокое быстродействие по сравнению с КМОП, необходимо, чтобы биполярный транзистор имел граничную частоту f_T , значительно превышающую предельную f_{TL} , определяемую по формуле [2]:

$$f_{TL} = \frac{3}{32\pi} \cdot \frac{\mu_n (V_D - V_T)}{(I_{cs} + 3I_{cv}) L_{cs}}, \quad (4)$$

где V_T – порог МОП-транзистора, L_{OV} – величина перекрытия затвором областей стока и истока.

Известно, что подвижность электронов и дырок в кремнии зависит от напряженности электрического поля и при больших полях имеет тенден-



цию к насыщению. В частности, зависимость подвижности электронов от напряженности поля определяется выражением [1, 2]:

$$\mu_n = \frac{\mu_{OS}}{\left[1 + \left|\frac{E}{E_{cm}}\right|^\alpha\right]^{\frac{1}{\alpha}}}, \quad (5)$$

где μ_{OS} – подвижность при малых электрических полях, E_{cm} – критическое поле, α – подгоночный параметр.

Расчет предельной частоты биполярного транзистора f_{TL} по формулам (4), (5) произведем для двух вариантов, определяющих типичные границы технологического разброса параметров для современных БиКМОП и МОП-процессов [1, 2]:

$$1) \alpha=1, \mu_{OS} = 650 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}, E_{cm} = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м},$$

$$2) \alpha=2, \mu_{OS} = 710 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}, E_{cm} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ В/м}.$$

Общие данные для обоих вариантов: $L_{OV}=0,13 L_{eff}$, $V_D=5 \text{ В}$, $V_T=0,8 \text{ В}$.

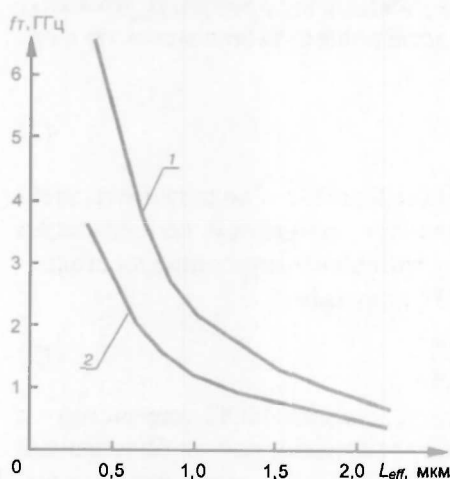


Рис. 1. Зависимость граничной частоты биполярного транзистора f_T от длины канала МОП-транзистора L_{eff} : 1 – вариант 1 параметров, 2 – вариант 2 параметров

Расчет граничной частоты биполярного транзистора, быстродействие которого равно быстродействию МОП-транзистора, представлен на рис. 1. Видно, что для того, чтобы биполярный транзистор имел преимущество в быстродействии перед n -МОП-транзистором, длина канала которого равна 1 мкм, его граничная частота f_T должна превышать 1,5–3 ГГц. При длине канала МОП-транзистора 0,5 мкм граничная частота биполярного транзистора должна превышать 3–5 ГГц. Для биполярных транзисторов с комбинированной изоляцией, имеющих базу, ограниченную стенками окисла, предельно достижимое значение f_T составляет 7–10 ГГц [3–5].

3. Сравнение крутизны вольт-амперной характеристики биполярного и МОП-транзисторов БиКМОП БИС

Основной тенденцией современных БИС и СБИС является уменьшение геометрических размеров элементов. Это позволяет уменьшить паразитные емкости, увеличить быстродействие, уменьшить размеры кристалла. Выходные каскады интерфейсных БИС должны выдерживать большие токовые нагрузки, поскольку они заряжают большие емкости. Следовательно, представляет интерес сравнение биполярного и МОП-транзисторов с точки зрения геометрических размеров, при которых они будут иметь одинаковую крутизну g_m вольт-амперной характеристики.

Крутизна биполярного транзистора вычисляется по формуле [1]:

$$g_{mbip} = \frac{I_c}{\Phi_T}, \quad (6)$$

где I_c – ток коллектора, $\Phi_T \sim 0,026$ В – температурный потенциал при $t = +20$ °С.

Кругизна МОП-транзистора [1, 6]:

$$g_{mMOS} = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} V_D, \quad (7)$$

где C_{OX} – удельная емкость подзатворного диэлектрика (для толщины окисла $d = 0,03$ мкм, $C_{OX} = 1,18 \cdot 10^{-3}$ Ф/м²), \bar{w} – ширина МОП-транзистора.

Приравняв g_{mbip} и g_{mMOS} из выражений (6) и (7), получим величину площади затвора:

$$S_g = \left(\frac{W}{L} \right) L^2 = \frac{I_c L^2}{\mu_n C_{OX} V_D \Phi_T}. \quad (8)$$

Выходные токи современных интерфейсных БИС при заряде–разряде емкости нагрузки могут достигать 100 мА и более. Результаты расчета для двух граничных вариантов значений параметров приведены в табл. 1.

Площадь эмиттера биполярного транзистора можно рассчитать по формуле:

$$S_E = \frac{I_c + I_B}{i_E}, \quad (9)$$

где $i_E = 30\text{--}50$ мкА/мкм² – плотность тока эмиттера, при котором возникают высокие уровни инжекции неосновных носителей заряда в базе транзистора (значения определены экспериментально по зависимости коэффициента усиления $n\text{-}p\text{-}n$ -транзистора β от тока эмиттера). При данной плотности тока численные значения площади эмиттера S_E будут находиться в диапазоне 2000–3333 мкм².

Таблица 1

Расчеты по формуле (8) площади затвора n -МОП-транзистора, имеющего кругизну, равную кругизне биполярного транзистора

Параметр	Вариант	Эффективная длина канала МОП-транзистора, L_{eff} , мкм		
		2	1	0,5
Подвижность, μ_n , м ² /В·с	1	464,3	382,4	242,8
	2	479,8	329,4	152,5
Отношение, $W/L_{eff} (\times 10^4)$	1	2,82	3,43	5,4
	2	2,73	3,98	8,6
Площадь затвора, S_g , мкм ² ($\times 10^3$)	1	56,4	34,26	13,5
	2	54,6	39,8	21,5

Расчеты по формулам (8), (9) показывают, что площадь затвора S_g полевого транзистора, имеющего кругизну g_{mMOS} , равную кругизне g_{mbip} биполярного транзистора, примерно на порядок превышает площадь эмиттера S_E последнего при длине канала L , лежащей в диапазоне 0,5–2,0 мкм.

4. Сравнение биполярного и МОП-транзисторов по плотности тока

Скорость переключения транзистора зависит от паразитных емкостей прибора, а величины емкостей – от размеров элементов. Необходимо отметить, что выходные каскады интерфейсных БИС управляют большими емкостными нагрузками. Следовательно, представляет интерес сравнение биполярного и полевого транзисторов по плотности выходного тока и определение длины канала МОП-транзистора, при которой плотность тока полевого транзистора равна плотности тока биполярного транзистора.

Ток коллектора биполярного транзистора определяется выражением [1]:

$$I_C = -I_{CS} \left[\exp \left(\frac{U_{BC}}{\Phi_T} \right) - 1 \right] + \alpha_f I_{ES} \left[\exp \left(\frac{U_{BE}}{\Phi_T} \right) - 1 \right], \quad (10)$$



где I_{CS}, I_{ES} – обратные токи насыщения переходов «база – коллектор», «база–эмиттер» соответственно; U_{BC}, U_{BE} – напряжение на переходах «база–коллектор», «база–эмиттер» соответственно; α_f – коэффициент усиления по току в схеме с общей базой ($\alpha_f = 0,99$).

При $U_{BC} = 0$ и учитывая, что $\exp\left(\frac{U_{BE}}{\Phi_T}\right) \gg 1$, из (10) получаем выражение для плотности тока коллектора в виде:

$$i_C = \frac{I_C}{S_E} = \alpha_f i_{ES} \exp\left(\frac{U_{BE}}{\Phi_T}\right). \quad (11)$$

, v_{Dsat} , [1]:

$$i_D = I_D / S_g = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L_{eff} S_g} \left[(V_g - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right], \quad (12)$$

где V_{DS} – напряжение «сток–исток», V_g – напряжение на затворе.

Из выражений (11) и (12) с учетом (5) для $\alpha = 1$ получим:

$$L_{eff}^2 + \frac{V_{DS}}{E_{cm}} L_{eff} - \frac{K_4 \mu_{OS}}{K_3} = 0, \quad (13)$$

где $K_3 = \alpha_f i_{ES} \exp\left(\frac{U_{BE}}{\Phi_T}\right)$, $K_4 = C_{OX} \left[(V_g - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$.

Положительный корень уравнения (13) есть:

$$L_{eff} = -\frac{V_{DS}}{2E} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_{DS}^2}{E_{cm}^2} + \frac{4K_4 \mu_{OS}}{K_3} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Из выражений (11) и (12) с учетом (5) для $\alpha = 2$ получим:

$$L_{eff}^4 + \left(\frac{v_{DS}}{E_{cm}} L_{eff} \right)^2 - \left(\frac{K_4 \mu_{OS}}{K_3} \right) = 0. \quad (15)$$

Положительный корень уравнения (15) есть:

$$L_{eff} = \left[-\frac{V_{DS}^2}{2E_{cm}^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_{DS}^4}{E_{cm}^4} + \frac{4K_4^2 \mu_{OS}^2}{K_3^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Расчет по формулам (14), (16) приведен в табл. 2 при двух вариантах параметров и при $C_{OX} = 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ Ф/м}^2$, $V_{DS} = 2,5 \text{ В}$, $V_T = 0,8 \text{ В}$, $V_g = 5 \text{ В}$, $\alpha_f = 0,99$, $i_{ES} = 5,9 \cdot 10^{-17} \text{ А/м}^2$. Из таблицы видно, что плотности токов биполярного и полевого транзисторов сравниваются для эффективной длины канала последнего в диапазоне значений $L_{eff} = 0,3\text{--}4,3 \text{ мкм}$ при напряжениях $U_{BE} = 0,79\text{--}0,70 \text{ В}$. Это значит, что площадь затвора МОП-транзистора, рассчитанного на номинальный ток, будет равна площади эмиттера биполярного транзистора. Для $U_{BE} = 0,76 \text{ В}$ биполярный и полевой транзисторы будут сравнимы по размерам при $L_{eff} = 0,88\text{--}1,04 \text{ мкм}$.

5. Экспериментальное исследование биполярного и МОП-транзисторов

Таблица 2
Расчеты эффективной длины канала n -МОП-транзистора, при которой его плотность тока равна плотности тока биполярного транзистора

Напряжение $U_{вс}$, В	Длина канала МОП-транзистора, $L_{эф}$, мкм	
	Формула (14), вариант 1 параметров	Формула (16), вариант 2 параметров
0,7	4,04	9,37
0,74	1,68	1,644
0,76	1,04	0,877
0,79	0,472	0,294

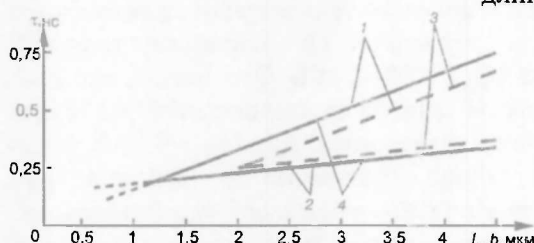


Рис. 2. Зависимость времени задержки переключения n -МОП- и n - p - n -транзисторов от длины канала L и ширины эмиттера b соответственно:
1 - n -МОП-транзистор; 2 - n - p - n -транзистор; 3 - топологические размеры элементов; 4 - размеры элементов с учетом технологических уходов

лярного n - p - n - и полевого n -МОП-транзисторов становятся равными при эффективной длине канала последнего $\sim 1,18$ мкм.

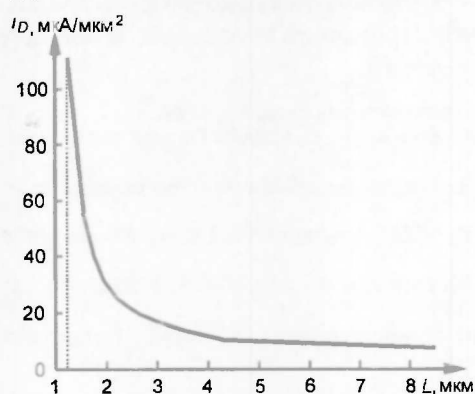


Рис. 3. Зависимость плотности тока i_D n -МОП-транзистора от длины канала L

С целью проверки правильности расчетов была разработана тестовая матрица, в которой были заложены конструкции n -МОП- и n - p - n -транзисторов и кольцевых генераторов на их основе. Тестовая матрица изготавливалась по БикМОП-технологии. Длина канала МОП-транзисторов изменялась в пределах 1,6–16 мкм, что соответствует эффективной длине канала 1,18–15,58 мкм. Топологические ширина и длина эмиттера биполярного транзистора были равны ширине и длине затвора МОП-транзистора.

На рис. 2 приведена зависимость задержки переключения τ транзисторов от длины канала МОП-транзистора L и ширины эмиттера b n - p - n -транзистора при токе 1 мА на один каскад кольцевого генератора. Величина тока выбрана произвольно. Относительная картина сделанных ниже выводов не изменяется в диапазоне токов 0,4–1,5 мА на каскад. Как видно из рис. 2, задержки переключения бипо-

На рис. 3 приведена зависимость плотности тока i_D n -МОП-транзистора от длины канала L при $V_g=5$ В. Поскольку плотность тока n - p - n -транзистора с площадью эмиттера 2×4 мкм² при токе эмиттера 1 мА равна 125 мкА/мкм², то можно сделать вывод, что размеры активной области n -МОП- и n - p - n -транзисторов, рассчитанных на номинальный ток, становятся равными при $L_{эф} < 1,2$ мкм.

1. Время пролета «эмиттер – коллектор» биполярного транзистора равно времени пролета «исток–сток» полевого транзистора при ширине базы $W_B=L_{эф}/4,655$.

Практически это означает, например, что n -МОП-транзистор с $L_{эф}=1,5$ мкм обеспечивает такое же быстродействие (без учета паразитных

емкостей и сопротивлений), что и биполярный транзистор с шириной базы $W_B=0,32$ мкм.

2. Для того чтобы биполярный транзистор имел преимущество в быстродействии перед МОП-транзистором с длиной канала $L_{eff}=1$ мкм, его граничная частота f_T должна превышать 1,5–3 ГГц. При длине канала МОП-транзистора 0,5 мкм граничная частота биполярного транзистора должна превышать 3–5 ГГц. Только в этом случае достигаются преимущества цифровых БиКМОП БИС перед КМОП. Экспериментально определено, что быстродействие биполярного $n-p-n$ -транзистора становится равным быстродействию n -МОП-транзистора при эффективной длине канала последнего 1,18 мкм.

3. Площадь затвора полевого транзистора с крутизной, равной крутизне биполярного транзистора, примерно на порядок превышает площадь эмиттера последнего при длине канала от 0,5 до 2,0 мкм.

4. Плотности токов биполярного и полевого транзисторов сравниваются для эффективной длины канала последнего в диапазоне значений $L_{eff}=0,3-4,3$ мкм при напряжениях $U_{BE}=0,79-0,70$ В. Это значит, что площадь затвора МОП-транзистора, рассчитанного на номинальный ток, будет равна площади эмиттера биполярного транзистора. Для $U_{BE}=0,76$ В биполярный и полевой транзисторы будут сравнимы по размерам при $L_{eff}=0,88-1,04$ мкм. Также экспериментально определено, что размеры активных областей n -МОП- и $n-p-n$ -транзисторов, рассчитанных на номинальный ток, сравнимы при значении длины затвора n -МОП-транзистора $L_{eff} < 1,2$ мкм.

Таким образом, биполярные $n-p-n$ -транзисторы имеют явные преимущества по быстродействию перед n -МОП-транзисторами при $L_{eff} > 1,2$ мкм. При длине канала n -МОП-транзистора, лежащей в диапазоне $L_{eff} 0,4-1,2$ мкм, к граничной частоте и геометрическим размерам биполярных транзисторов должны быть предъявлены жесткие требования. При длине канала n -МОП-транзистора $L_{eff} < 0,4$ мкм преимущество в быстродействии биполярного транзистора с комбинированной изоляцией, имеющего базу, ограниченную стенками окисла, теряется.

1. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М., 1989.
2. Rothermel A., Hosticka B. // IEEE Proceeding. G. Circuits Devices and Systems 1989. Vol. 136. № 2. P. 49.
3. Аваев Н. А., Наумов Ю. Е. Элементы сверхбольших интегральных схем. М., 1986.
4. Kuroda T., Sakata Y., Matsuo K. // IEEE Journal of Solid States Circuits. 1994. Vol. 29. № 5. P. 564.
5. Yamaguchi T., Archer T.M., Johnston R.E., Lee J.S. // IEEE Transactions on electron devices. 1994. Vol. 41. № 6. P. 1019.
6. Тилл У., Лаксон Д. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление. М., 1985.

Поступила в редакцию 19.02.2001.

Белоус Анатолий Иванович – доктор технических наук, заместитель директора УП «Белмикросистемы» НПО «Интеграл».

Ефименко Сергей Афанасьевич – начальник сектора УП «Белмикросистемы» НПО «Интеграл».

Понарядов Владимир Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель проректора БГУ по научной работе.

Прибыльский Александр Владимирович – кандидат технических наук, главный инженер УП «Белмикросистемы» НПО «Интеграл».