

Особенности проектирования и производства многоразрядных высокоскоростных КМОП АЦП с конвейерной архитектурой

Владимир КОНОНОВ,
к. т. н.

В статье анализируются зарубежные технологии, обеспечившие бурный рост номенклатуры многоразрядных (12–16 бит) высокоскоростных (0,5–2 ГГц) конвейерных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Показаны концептуальные различия в развитии аналоговых и цифровых технологий. Определены базовые требования к характеристикам МОП-транзисторов по крутизне, выходному сопротивлению в области насыщения и паразитным емкостям. Сформулирован подход к увеличению выходного сопротивления МОП-транзисторов в КМОП КНИ-структурах с примыканием сток-истоковых областей к скрытому диэлектрику.

В наше время трудно найти специалиста по микроэлектронике, который, как когда-то в 80-х годах XX в., будет утверждать, что эра аналоговых технологий и микросхем, доставивших немалую головную боль разработчикам того времени, уходит в прошлое под напором бурного прогресса в цифровой технике. Уже давно всем стало понятно, что существует ряд приложений, которые без аналоговой техники,

а точнее — без АЦП и других преобразователей, в принципе не могут быть реализованы. Наиболее важными из них являются [1]: обработка сигналов естественной природы; передача данных на большие расстояния; преобразование магнитных, механических, акустических и видеосигналов в электрический ток; фильтрация шумов и др.

В итоге за последние годы мир стал свидетелем ускоренного развития аналого-

вых технологий и, как следствие, расширения номенклатуры выпускаемых АЦП. Особенно впечатляют достижения зарубежных изготовителей 12–16-разрядных АЦП с частотой преобразования 0,5–2 ГГц, которые стали возможными благодаря созданию аналоговых КМОП-технологий с проектными нормами 45–60 нм и высокой воспроизводимостью, характеризующейся технологическими разбросами не более 2–4% (рис. 1).

На этом фоне возможности отечественных аналоговых технологий выглядят пока достаточно скромно. Поэтому вполне естественным стало появление в России двух школ по созданию аппаратуры с использованием АЦП (рис. 2).

Сторонники первой школы считают, что для построения современной аппаратуры достаточно использовать АЦП с частотой преобразования до 150–200 МГц. Это умеренно-консервативная школа, которая ориентируется на реальные возможности отечественного кристалльного производства, справедливо полагая, что, в случае чего, можно за относительно короткое время предпринять определенные усилия и организовать производство АЦП внутри страны. Пока

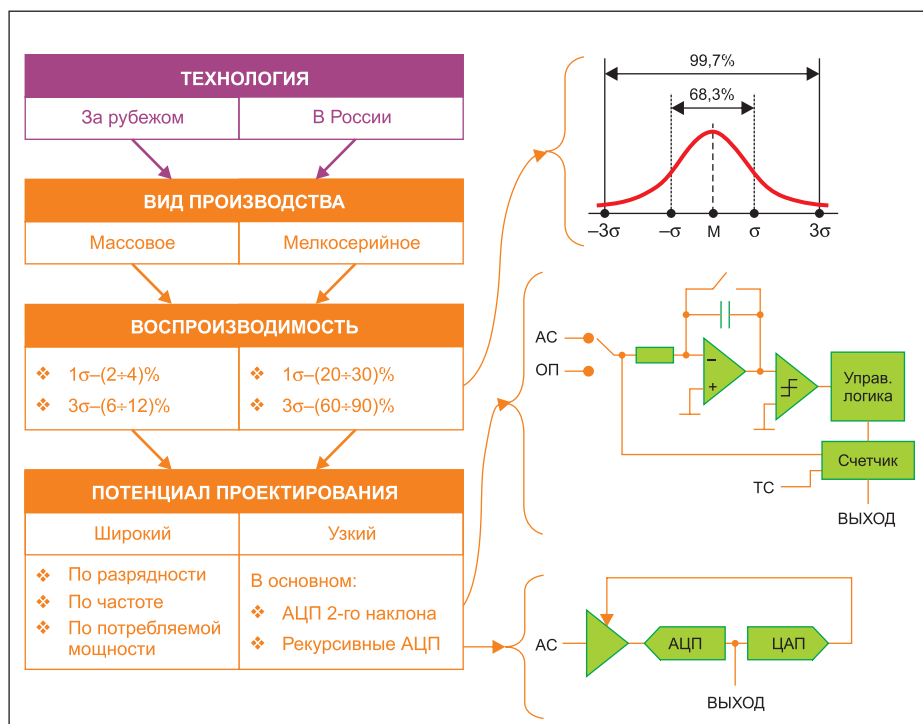


Рис. 1. Иллюстрация возможностей зарубежных и отечественных технологий

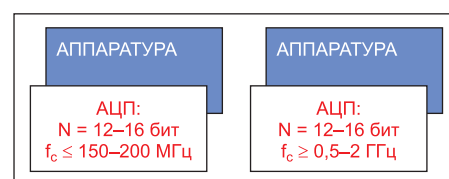


Рис. 2. Концептуальные подходы к проектированию аппаратуры

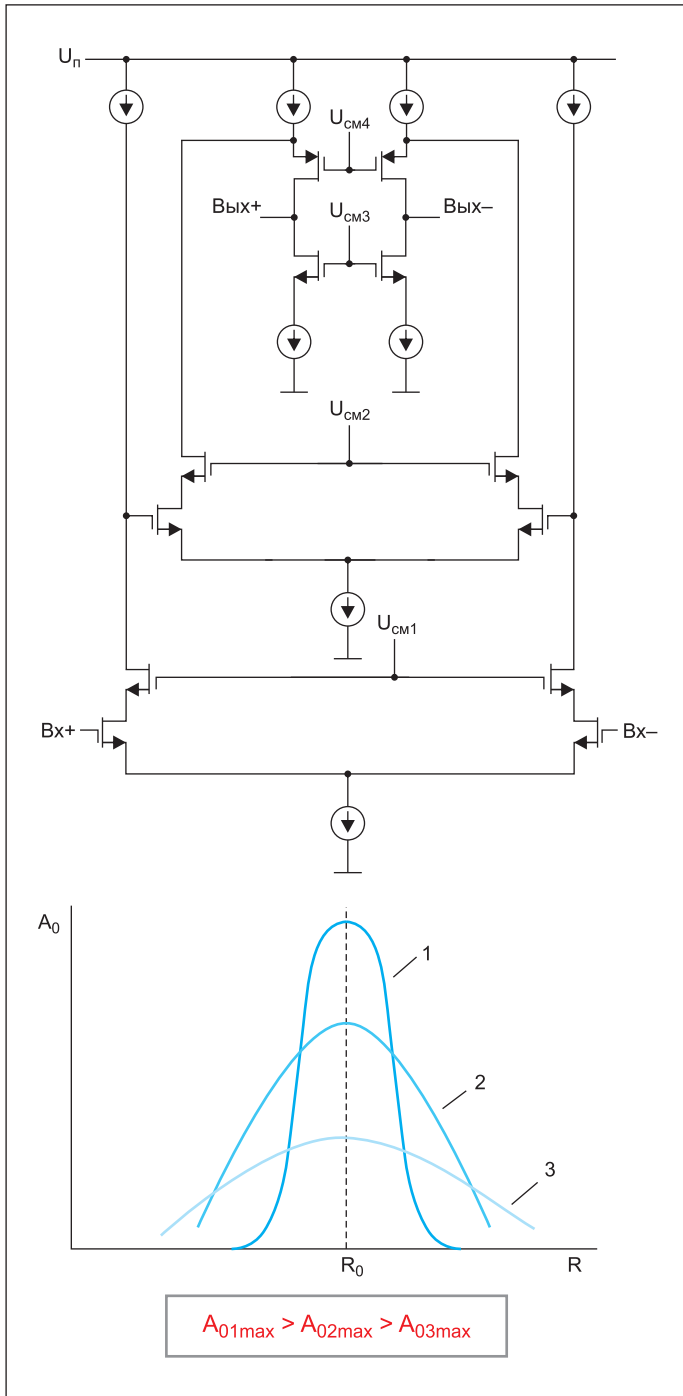


Рис. 3. Межсекционный усилитель: U_n — напряжение питания; A_{01max} , A_{02max} , A_{03max} — коэффициенты усиления без обратной связи; R — характеристический параметр токозадающего элемента, допустимое отклонение которого от номинального значения R_0 тем меньше, чем больше A_0

даже такие АЦП предпочитают по разным причинам изготавливать на зарубежных фабриках.

Сторонники второй школы во главу угла ставят достижение необходимых характеристик аппаратуры, ориентируясь на зарубежный опыт последних лет, когда ставка делается на применение 12–16-разрядных АЦП с частотой преобразования 0,5–2 ГГц. При этом разработчики аппаратуры не закидываются на том, как и где такие АЦП можно проектировать и производить, аргументируя свои доводы государственной важностью, с чем трудно спорить.

А между тем вопросы технологического обеспечения, отвечающие по большому счету интересам обеих школ, превратились в одну

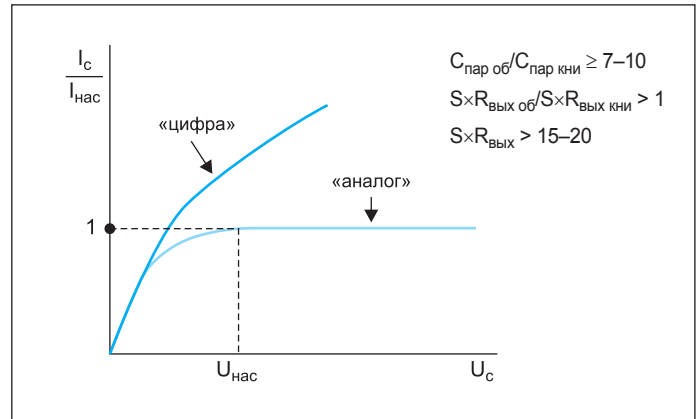


Рис. 4. Сравнительные характеристики аналоговых и цифровых МОП-транзисторов: I_c — ток стока; U_c — напряжение на стоке; $C_{пар}$ — паразитная емкость; «об» и «кни» — индексы, определяющие принадлежность к КМОП-структурам на объемном кремнии и КНИ-типа

из наиболее острых проблем, от решения которой зависит успешное выполнение программы по импортозамещению электронной компонентной базы (ЭКБ) [2, 3].

Существует ошибочное мнение, что закупка технологических линий на 45–180 нм снимет все проблемы. По отношению к цифровой ЭКБ это во многом так. Однако в случае аналого-цифровой ЭКБ это не совсем так. Необходимо, кроме того, наличие массового ритмичного производства, чтобы обеспечить устойчивую воспроизводимость, без которой невозможно создать высококачественные дизайн-киты с полным перечнем моделей компонентов, точность описания которых, с учетом влияния технологических разбросов, характеризуется соответствием основных параметров с отклонениями не более 1–2%.

Причем для успешного производства современных конвейерных АЦП, составляющих за рубежом основную долю многоразрядных (12–16 бит) высокоскоростных (0,5–2 ГГц) преобразователей, необходимо иметь разбросы не более 5%, а у нас в типичных условиях мелкосерийного производства эти разбросы составляют 20–40% (рис. 1).

Отмеченные требования по 5%-ным разбросам отражают схемотехническую особенность межсекционных усилителей, составляющих основу конвейерных АЦП, определяющую высокую чувствительность усилителей и в целом АЦП к этим разбросам (рис. 3). Существует закономерность: чем выше коэффициент усиления усилителя без обратной связи, тем меньше должны быть допустимые технологические разбросы. Однако требования по 5%-м разбросам не являются единственными.

Как показал анализ современных зарубежных технологий и дизайн-китов (шесть фабрик, 10 технологий, диапазон проектных норм 50–280 нм), существует разница в требованиях к характеристикам базовых элементов (в основном МОП-транзисторов) при создании цифровых и аналоговых технологий (рис. 4):

1. При создании МОП-транзисторов для цифровых технологий основное внимание обращается на крутизну S (она должна быть как можно более высокой), а выходное сопротивление транзисторов в области насыщения $R_{вых}$ воспринимается по факту (желательно, чтобы оно было как можно более низким).
2. При создании МОП-транзисторов для аналоговых технологий обращается повышенное внимание и на крутизну, и на выходное сопротивление. Причем оба этих параметра стремятся получить как можно более высокими.

В связи с этим унифицированный подход к созданию отечественных технологий, одинаково пригодных для производства цифровых и аналого-цифровых микросхем, нельзя считать правильным.

Замечено, что МОП-транзисторы в аналоговых блоках зарубежных гигагерцевых КМОП АЦП имеют $S \times R_{вых} > 15-20$.

Это соотношение, с учетом нормативного требования к 5%-ным разбросам, позволяет получить и удерживать с определенным запасом высокие значения коэффициента усиления межсекционного усилителя при изменении температуры и напряжения питания:

- ~80–90 дБ — для 12-разрядных АЦП;
- ~100–120 дБ — для 16-разрядных АЦП.

Такие значения коэффициента усиления необходимы для обеспечения соответственно 12- и 16-разрядной точности преобразования.

При создании гигагерцовых АЦП большое внимание уделяется также паразитным емкостям МОП-транзисторов, которые стремятся сделать минимально возможными, чтобы получить широкую полосу частот. Желательно иметь некоторый запас по полосе частот, особенно в тех случаях, когда при достаточно больших S возникает необходимость в повышении $R_{\text{вых}}$ за счет увеличения длины канала МОП-транзистора, что неминуемо приводит к уменьшению этой полосы.

В этом смысле КМОП КНИ-структуры с примыканием сток-истоковых областей к скрытому и боковому диэлектрикам являются идеальными — выигрыш минимум в 7–10 раз по сравнению с КМОП-структурами на объемном кремнии. Однако КМОП КНИ-структуры имеют более низкое значение $S \times R_{\text{вых}}$, вероятно из-за меньшей подвижности носителей в эпитаксиальном слое, выращенном на скрытом диэлектрике, и, возможно, большей модуляции длины канала по сравнению со структурами на объемном кремнии, в которых из-за большей кривизны сток-истоковых областей происходит меньшее расширение области пространственного заряда в сторону канала.

В итоге по совокупности характеристик S , $R_{\text{вых}}$, $C_{\text{пар}}$ КМОП-структуры на объемном кремнии иногда дают больше преимуществ. Примером является технология фирмы

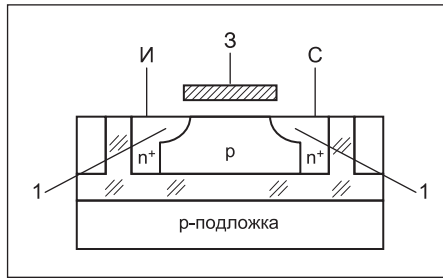


Рис. 5. НМОП-транзистор с дополнительными мелкозалегающими n^+ -областями (1)

TSMC с проектными нормами 60 нм. И все же в некоторых приложениях, в том числе специальных, желательно использовать КМОП КНИ-структуры.

Для повышения кривизны сток-истоковых областей в этих структурах можно добавить дополнительные мелкозалегающие диффузионные области, выступающие за пределы основных сток-истоковых областей и имеющие с ними тот же тип проводимости (рис. 5).

В целом для КМОП- и КМОП КНИ-технологий, ориентированных на производство многоразрядных (12–16 бит) высокоскоростных (0,5–2 ГГц) АЦП, необходимо иметь проектные нормы 50–60 нм для цифровых блоков и 100–280 нм для аналоговых.

Выводы

1. Наблюдаемый за рубежом прогресс в производстве современных конвейерных КМОП АЦП с разрядностью 12–16 бит и частотой преобразования 0,5–2 ГГц обусловлен появлением аналоговых технологий с проектными нормами 50–60 нм (для цифровых блоков) и 100–280 нм (для аналоговых блоков) и воспроизводимостью не хуже 5%.

2. Развитие зарубежных аналоговых технологий по сравнению с цифровыми отличается концептуальными требованиями, предъявляемыми к крутизне и выходному сопротивлению МОП-транзисторов в области насыщения. В первом случае обращается внимание на одновременное увеличение крутизны и выходного сопротивления, а во втором — только на увеличение крутизны при максимально возможном уменьшении выходного сопротивления.
3. Производство крутизны на выходное сопротивление МОП-транзисторов в аналоговых блоках зарубежных гигагерцовых АЦП составляет около 15–20 при ширине полосы единичного усиления до 7–10 ГГц.
4. Основной эффект по увеличению выходного сопротивления МОП-транзисторов достигается за счет высокой кривизны сток-истоковых областей в КМОП-структурах на объемном кремнии и в КМОП КНИ-структурах без соприкосновения этих областей со скрытым диэлектриком. В КМОП КНИ-структурах с примыканием сток-истоковых областей к скрытому диэлектрику для повышения их кривизны необходимо использовать дополнительные мелкозалегающие диффузионные области того же типа проводимости. ■

Литература

1. Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits // McGraw-Hill publishers. 2001.
2. Колмогоров Г., Шиллер В., Шпак В. Импортонезависимость России: необходима и возможна // Компоненты и технологии. 2017. № 4.
3. Кононов В., Боднар Д. Импортозамещение АЦП и ЦАП: ограничения и возможности // Компоненты и технологии. 2017. № 8.