

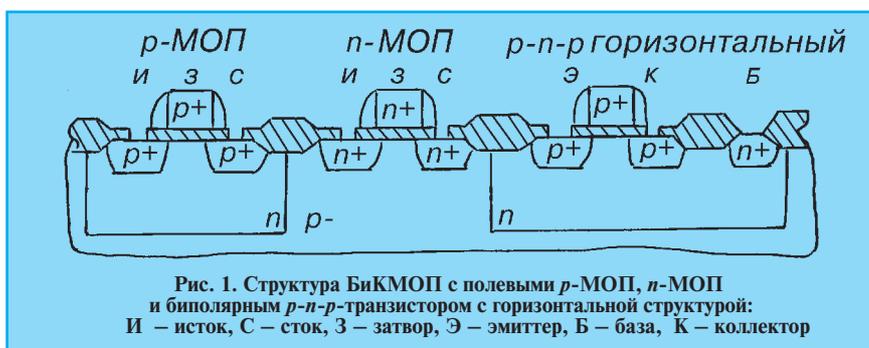
Г. Красников, М. Лукаевич

## БиКМОП БИС альтернатива зарубежным субмикронным КМОП БИС с самосовмещенной структурой

Стратегическое отставание отечественной микроэлектроники составляет 10–15 лет. Располагая в 1997–1999 годах производством БИС с минимальными размерами элементов 1,2–0,8 мкм, она не выдержит конкуренции в области “чистых” КМОП ИС, которые за рубежом уже производятся с минимальными размерами 0,5 мкм и менее. Вместе с тем минимальный размер 1,2–0,8 мкм позволяет выпускать БиКМОП ИС с самосовмещенной структурой. Благодаря способности саморегулирования минимальных размеров с 0,8 до 0,4 мкм по электрическим параметрам они вполне могут конкурировать с современными КМОП ИС.

**Р**езкое увеличение объема производства БиКМОП ИС – с 3% (2,76 млрд. долл.) в 1993 году до 8% (10,7 млрд. долл.) мирового производства микросхем в 1996-м – свидетельствует о наступлении периода “зрелости” технологии БиКМОП. Благодаря возможности изготавливать на одном кристалле как КМОП-, так и биполярные транзисторы, и тем самым выполнять наиболее сложные блоки ИС на базе ЭСЛ-устройств, а более простые с высокой плотностью размещения элементов – на базе КМОП-вентилей, БиКМОП-технология стала одним из лидеров новых технологий КМОП и преемником биполярных технологий. Преимущества БиКМОП СБИС в сравнении с биполярными цифровыми и КМОП-схемами приведены в табл 1 [1].

Ведущим фирмам мира удалось в полной мере реализовать сверхскоростные возможности биполярных транзисторов при работе на большую емкостную нагрузку. Не случайно БиКМОП-технология стала лидером в производстве скоростных СОЗУ больших объемов с рекорд-



ным временем выборки, микропроцессорных кристаллов персональных компьютеров с высоким быстродействием, цифроаналоговых устройств и телекоммуникационных схем. Так, по мнению потребителей, в электронике символом нового, более быстрого и качественного изделия стали микропроцессоры Pentium фирмы Intel, выполняемые по БиКМОП-технологии

Безусловно, основным недостатком БиКМОП-схем остается высокая стоимость из-за достаточно сложной технологии и большей продолжительности технологического цикла. Однако растущие возможности новых техно-

логий БиКМОП, большее быстродействие и функциональные возможности устройств на БиКМОП окупают дополнительные затраты потребителей. компромисс двух тенденций. Первая заключается в стремлении включить в БиКМОП ИС биполярные транзисторы с максимальным быстродействием, интеграцией, лучшими параметрами и усовершенствованной структурой. Вторая – максимальное упрощение комбинированной БиКМОП-структуры, приведение ее к простой “чистой” МОП-структуре, где определяющим является принцип “при нулевом приросте стоимости получать приборы ЭСЛ-качества”.

Первым удачным симбиозом этих тенденций стала технология КМОП-структур и биполярных транзисторов с горизонтальной структурой (БиКМОП-процесс 1). Принципиальная особенность процесса – использование исключительно операций базового маршрута КМОП, где нормально закрытый p-МОП-транзистор преобразован в классический p-n-p-биполярный транзистор с горизонтальной структурой, управляемый по типу биполярного транзистора током базы (рис 1).

Ограничением p-n-p-транзисторов данного типа и в целом ИС является относительно “медленная” база транзистора, равная длине затвора. Поэтому применение таких транзисторов в составе БиКМОП оправдано прежде всего возможностью повысить нагрузочную способность ИС. Так, например, неинвентурируемый буфер, выполняемый

**Таблица 1**

| Особенности БиКМОП-технологии  |   |
|--|---|
| ПРЕИМУЩЕСТВА   | НЕДОСТАТКИ  |
| Способность передачи сигналов при больших нагрузках с высокой скоростью; способность оптимизации критических путей передачи сигналов, высокое быстродействие | Недостаточные осведомленность и опыт работы проектировщиков   |
| Улучшение основных характеристических параметров в два-три раза  | Необходимость мощной САПР   |
| Большой входной импеданс   | Повышение себестоимости изделий из-за более длительного технологического цикла  |
| Малая рассеиваемая мощность  | Получение улучшенных характеристик при переходе к минимальным размерам менее 0,5 мкм и уровню питания < 3В затруднено |
| Все достоинства технологии КМОП  |   |

логий БиКМОП, большее быстродействие и функциональные возможности устройств на БиКМОП окупают дополнительные затраты потребителей.

### Варианты БиКМОП-технологий

Процесс совершенствования технологии БиКМОП – это постоянный

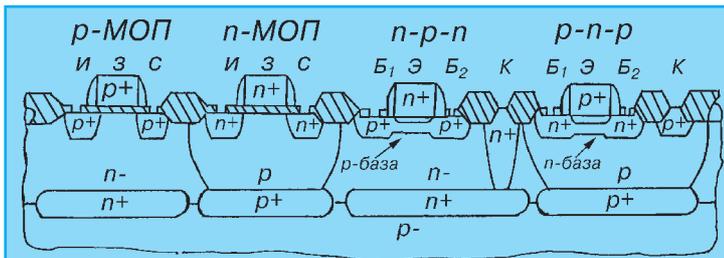


Рис.2. Усовершенствованная комплементарная БиКМОП-ячейка с ССТ-структурой биполярных транзисторов и одним уровнем поликремния

на БиКМОП с  $p-n-p$ -транзистором, при незначительных затратах площади в два раза превосходит КМОП по быстродействию [2].

Следующей успешной промышленной версией технологического процесса БиКМОП стала интеграция “быстрой” вертикальной структуры биполярного транзистора (БиКМОП-процесс 2) с КМОП на базе эпитаксиальной структуры со скрытым слоем. Эпитаксиальная структура одновременно решает проблемы КМОП-технологии с субмикронными размерами и плотной упаковкой, являясь одним из основных факторов предотвращения эффекта зашелкивания [3].

Вертикальный  $n-p-n$ -транзистор характеризуется тонкой (0,1–0,2 мкм) “быстрой” базой, однако использование так называемого неполного эмиттера с металлическим контактом снижает граничную частоту транзистора ( $f_T$ ) до 1–3 ГГц. Техпроцесс изготовления КМОП в данной версии удлинится на две операции литографии (формирование базы и области глубокого коллектора транзистора). Формирование эмиттерной области совмещено с  $n+$ -сток/исток, область подлегирования базы – с  $p+$ -сток/исток. Процессы формирования контактных окон и металлической разводки применяются одновременно ко всем областям структуры.

Улучшенные  $p-n-p$ -транзисторы с горизонтальной структурой и эпитаксиальной базой.

Улучшенная модификация БиКМОП с поликремниевым ( $Si^*$ ) эмиттером (БиКМОП-процесс 3) удачно синтезирована в КМОП-структуре с двумя слоями  $Si^*$ , где первый слой используется для создания затворов, а второй – для разводки внутри ячейки,  $Si^*$ -резисторов и  $Si^*$ -эмиттеров. Использование поликремниевых эмиттеров увеличивает  $f_T$  до 12–14 ГГц.

Еще один шаг на пути совершенствования быстродействующих логических схем и микропроцессоров – создание комплементарных БиКМОП ИС (КБиКМОП) с вертикальными  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -транзисторами. Их использование взамен  $p-n-p$ -транзисторов с горизонтальной структурой и эпитаксиальной базой существенно расширило схемотехнические возможности при проектировании ИС, повысило быстродействие и уменьшило размеры кристалла ИС. Это самое большое достижение технологии БиКМОП за последние годы.

Важным аргументом в пользу применения  $p-n-p$ - с вертикальной структурой в БиКМОП стали работы

Общая продолжительность технологии процесса и затраты увеличиваются менее чем на 15%. Техпроцесс 2, кроме того, позволяет создавать допол-

Дель-Адамо и др., показавшие, что подвижность дырочных неосновных носителей в базе транзистора при уровне легирования  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  сопоставима с подвижностью электронов. Это доказывает, что собственное быстродействие  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -транзисторов также сопоставимо [4].

Техпроцесс КБиКМОП с вертикальными  $n-p-n$  и  $p-n-p$  транзисторами с  $Me$  эмиттером (БиКМОП-процесс 4) в составе КМОП усложняется на четыре операции литографии (формирование двух базовых областей, глубокого коллектора и одного из эмиттеров), что увеличивает длительность маршрута в среднем на 30%. Вертикальные транзисторы  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -обладают теми же параметрами быстродействия, что и  $n-p-n$ - в процессе 2.

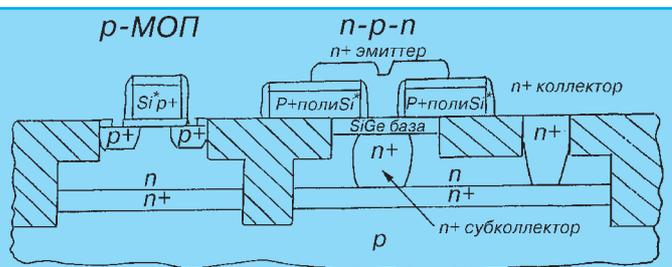


Рис.3. БиКМОП с ССТ-структурой транзисторов с двумя уровнями поликремния ( $n$ -МОП- и  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторы не показаны)

Первый серьезный прорыв в создании дешевой промышленной технологии БиКМОП стал возможен в результате использования методов самосовмещенной технологии (ССТ) биполярных ИС. Они обеспечивают быстродействие 15–30 ГГц и высокую степень интеграции ИС в унифицированной структуре МОП (рис. 2), которая органически интегрируется в структуре БиКМОП с одним слоем поликремния (БиКМОП-процесс 5), усложняя процесс изготовления КМОП на четыре литографии (30%).

Для создания аналого-цифровых БиКМОП ИС высокой степени интеграции наряду с КМОП- и биполярными транзисторами необходимо применять высококачественные конденсаторы и высокоомные резисторы на поликремнии, реализуемые в маршруте путем использования двух слоев поликремния (БиКМОП-процесс 6). Быстродействие  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -транзисторов, изготавливаемых по самосовмещенной технологии с двумя слоями поликристаллического кремния, может быть увеличено до 30–50 ГГц (рис. 3).

### Перспективы развития БиКМОП-технологии до 2010 года

Высокое быстродействие и малая рассеиваемая мощность – вот те ха-

### Эволюция параметров КМОП ИС

Таблица 2

| Параметры                                    | 1992г. | 1995г. | 1998г. | 2001г. | 2004г. | 2007г. |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Минимальный предполагаемый размер, мкм       | 0,5    | 0,35   | 0,25   | 0,18   | 0,13   | 0,1    |
| Степень интеграции                           | 16М    | 64М    | 256М   | 1G     | 4G     | 16G    |
| Напряжение питания, В                        | 5      | 3,3    | 3,3    | 3,3    | 2,2    | 2,2    |
| Толщина окисла, А                            | 150    | 90     | 80     | 70     | 45     | 40     |
| Глубина $p-n$ - перехода, мкм                | 0,15   | 0,15   | 0,1    | 0,08   | 0,08   | 0,07   |
| Плотность тока $n$ -МОП, мА/мкм              | 0,56   | 0,48   | 0,55   | 0,65   | 0,51   | 0,62   |
| Задержка затвора, пс (при коэф. разветвл.=1) | 80     | 60     | 50     | 45     | 40     | 35     |

ктеристики, которые обеспечивают рынок сбыта коммерческих БиКМОП ИС. Однако многие специалисты очень осторожны в своих прогнозах относительно роста рынка сбыта БиКМОП к концу тысячелетия. В первую очередь это объясняется успехами в развитии КМОП ИС, позволившими разработчикам “быстрых” ИС снова обратиться к “чистым” КМОП-структурам. Благодаря эволюционному масштабированию КМОП ИС в результате улучшения литографической техники становится возможным изготавливать КМОП со все меньшими минимальными размерами (табл. 2)[1].

КМОП-технология продолжает совершенствоваться, и ИС КМОП по быстродействию приближаются к биполярным структурам. Весьма вероятно, это позволит создавать маломощные высокоскоростные версии ИС на базе “чистых” КМОП-структур. Какие же факторы определяют достоинства БиКМОП-технологии? Какова цена альтернативы, осуществляемой на базе “чистой” КМОП-технологии?

Опыт ведущих фирм показывает, что высокое быстродействие БиКМОП ИС позволяет им успешно конкурировать с масштабированными КМОП ИС с жесткими технологическими нормами.

Одно из убедительных подтверждений тому – выпуск по БиКМОП-технологии микропроцессоров Pentium с технологическими нормами 0,8 мкм (разработка 1993 года) и Pentium Pro с нормами 0,5 мкм (разработка 1995 года). По мнению разработчиков фирмы Intel, БиКМОП-технология – самый простой, дешевый и быстрый путь увеличить быстродействие микропроцессоров. С ней могут конкурировать разве что аналогичные изделия КМОП с технологическими нормами 0,35–0,25 мкм, для освоения производства которых потребуется не менее трех–пяти лет. Вот почему можно с уверенностью утверждать, что Intel и Texas Instrument, обладающие технологиями БиКМОП, останутся “законодателями мод” по крайней мере до конца тысячелетия.

Есть еще одно парадоксальное обстоятельство, благодаря которому БиКМОП БИС опережают масштабированные КМОП-изделия в среднем на два поколения топологических норм (пять–шесть лет). Оно заключается в том, что самосовмещенная структура транзистора с двумя слоями поликремния обладает свойством самоформирования субмикронных облас-

тей эмиттера и базы биполярных транзисторов в результате осаждения на стенках окна под эмиттер диэлектрика, эффективно уменьшающего размеры окон на две толщины бокового диэлектрика. Например, для техпроцесса изготовления с размером 0,8 мкм эффективный размер эмиттера уменьшается до 0,4 мкм. Это особенно важно для предприятий, имеющих технологический опыт в ССТ-технологии ЭСЛ ИС, при выборе стратегии выживания на рынке изделий микроэлектроники. Безусловно, реализация современных маршрутов ССТ/БиКМОП ИС требует создания на предприятии чистых помещений и постановки прецизионных базовых процессов с использованием современного технологического оборудования.

Второе серьезное препятствие – ухудшение характеристик ИС этого типа при работе от источника питания с напряжением менее 5 В, поскольку для СБИС с минимальными размерами элементов менее 0,5 мкм наметилась тенденция к снижению напряжения питания до 3,3В и ниже (по мере дальнейшего уменьшения размеров при масштабировании). Вот почему со второй половины 90-х годов особое внимание уделяется разработке специальных вариантов БиКМОП-процесса, позволяющих изготавливать схемы с заданными электрофизическими характеристиками при низком напряжении питания.

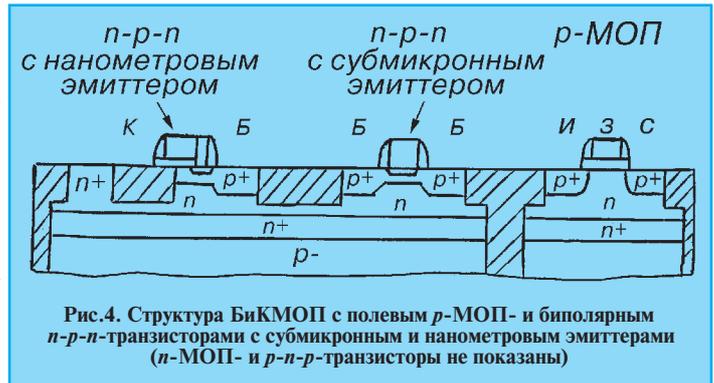
Примерами такого усовершенствованного процесса являются BipnCMOS процесс фирмы Toshiba, предназначенный для изготовления матриц с 500К вентилями, и БиКМОП-процесс для изготовления специализированных схем при низких значениях напряжения питания, разработанный на фирме Motorola, схемы Pentium для портативных устройств с питанием 3,3 В и др.

К концу тысячелетия технология КМОП ИС накопит столь значительный потенциал, что, возможно, составит серьезную конкуренцию сверхскоростным биполярным ЭСЛ ИС. Предполагается, что базовой структурой КМОП станет структура с диэлектри-

ческой изоляцией (кремний на диэлектрике) и боковой изоляцией мелкими канавками, заполненными диэлектриком.

Что может противопоставить этим тенденциям ССТ/БиКМОП-технология после 2000 года?

В последние пять лет большие успехи достигнуты в технологии осаждения локальных гетерослоев кремний-германий (Si-Ge) для создания тонких



базовых областей биполярных транзисторов. Новая технология, адаптированная для изготовления БиКМОП-структур с ССТ биполярными транзисторами с тонкой эпитаксиальной базой и локальным субколлектором, позволяет изготавливать транзисторы n-p-n- с  $f_t$  свыше 50 ГГц, а p-n-p- – свыше 30 ГГц [5], что не имеет аналогов в КМОП-технологии. Изоляция таких СВЧ-транзисторов выполняется комбинацией мелких и глубоких канавок, заполненных низкотемпературным диэлектриком (рис. 3).

В последнее время появились сообщения о создании биполярных транзисторов (в составе БиКМОП) с шириной эмиттера 0,2 мкм, определяемой толщиной осаждаемой в LPCVD процессе пленки поликремния [6]. Конструкция такого транзистора (рис. 4) представляет собой модификацию полевого транзистора, в котором на боковую стенку изолированного затвора наносится тонкий слой поликремния (эмиттера), контактирующего с подложкой (базой). Теоретически ширина эмиттера в данной структуре (толщина слоя поликремния) может быть столь угодно малой, что существенно упрощает достижение размеров эмиттера 50–100 нм.

Таким образом, есть основания ожидать, что благодаря сверхбыстродействию технология ССТ/БиКМОП БИС в области сверхскоростных и ультраскоростных БИС останется лидером скоростных КМОП-технологий и к 2010 году.

### Технология БиКМОП в России

Возможностями освоения БиКМОП-технологии, в принципе, обладают все предприятия, владеющие биполярной и КМОП-технологиями. В России это в первую очередь АОТ “Ангстрем”, ПО “Электроника”, АОТ “НИИМЭ и завод Микрон”. Однако только АОТ “НИИМЭ и завод Микрон” располагает технологией и опытом разработки как ССТ ЭСЛ ИС, так и КМОП ИС, являющихся базой ССТ/БиКМОП ИС.

Для создания универсальной ССТ/БиКМОП-технологии на предприятии разработан базовый техпроцесс, в основу которого положены принципы самосовмещения и самоформирования структур транзисторов. Это позволило обеспечить высокий технический уровень БИС и создать ряд технологических процессов БиКМОП для БИС (варианты 2,4,5,6) с разной схематикой и функциональным назначением. Среди них БиКМОП-технология с использованием вертикального биполярного  $n-p-n$ - и двух  $p-n-p$ -транзисторов (горизонтального и вертикального с эпитаксиальной ба-

зой) с двумя слоями металлической разводки. Процесс включает 15 масок с минимальной технологической нормой 1,5 мкм. Технология опробована в производстве серии микросхем для телевизоров массового спроса и проектирования “элитных” телевизоров, быстродействующих аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей с малым энергопотреблением. В производстве статических ОЗУ ЭСЛ и СБИС БМК использована и комплексная БиКМОП-технология с вертикальными биполярными  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -транзисторами с двумя слоями металлической разводки с минимальной технологической нормой 1,2 мкм. По ССТ/БиКМОП-технологии с ССТ-транзисторами  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -типа с  $f_t = 10-15$  ГГц и двумя слоями металлической разводки с минимальной технологической нормой 1,2 мкм создается элементная база, которая может быть использована для изготовления заказных и полузаказных микросхем специального применения на основе базовых матричных кристаллов сложностью 15 тыс. эквивалентных вентилях, быстродействующих ЦАП и

АЦП с малым потреблением электроэнергии, БИС для цифровой обработки сигналов.

Создав в 1997–1999 годах производство БИС с минимальными размерами элементов 1,2–0,8 мкм, предприятие выдержит конкуренцию с “чистыми” КМОП ИС, производимыми за рубежом с минимальными размерами 0,5 мкм и менее, только с помощью БиКМОП-технологии. Ее развитие позволит одновременно совершенствовать и “чистые” КМОП- и биполярные технологии. При создании производства БИС с минимальными размерами элементов 0,5–0,35 мкм мы сможем конкурировать также в области биполярных и полевых ИС.

### Литература

1. Status-96, ICE Corp., p.4.17, 5.19
2. ED, 1992, N11, p.43–58
3. Advanced VLSI Fabrication, ICE Corp., 1995, p.9–37
4. IEEE Trans. on El. Devices, vol. 38, N6, 1991
5. El. Devices meeting, 1990, p. 2.7.1–2.7.4
6. IEEE j. on El. Devices, vol.43, N9, 1996, p. 1539–1545

### Представляем авторов статьи

**КРАСНИКОВ Геннадий Яковлевич**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор. Закончил Московский институт электронной техники. Специалист в области технологии и организации производства средств микросистемной техники. С 1991 года – генеральный директор ОАО “НИИ молекулярной электроники и завод “Микрон”.

**ЛУКАСЕВИЧ Михаил Иванович**, кандидат технических наук, главный специалист ОАО “НИИМЭ и завод Микрон”. Закончил Киевский политехнический институт. Разработчик ряда базовых технологических процессов изготовления интегральных микросхем.

### Фирма TRW наращивает скорости

Фирма TRW объявила о разработке малошумящего трехкаскадного усилителя на фосфиде индия с коэффициентом усиления 12,5 дБ на частоте 155 ГГц. По утверждению разработчиков, это рекордная частота для твердотельных усилителей. Опытные образцы прибора уже отгружены фирмам – изготовителям коммерческих оптических систем, в том числе Multilink Technologies. Сейчас специалисты TRW разрабатывают схему на частоту 220 ГГц. Создание таких схем – результат усилий фирмы TRW по применению технологии, разработанной в рамках военной программы ММИС, для гражданских нужд.

Фосфидиндиевые приборы работают при в два раза меньших значениях напряжения, чем арсенидгаллиевые и, по мнению разработчиков, позволяют значительно уменьшить габариты, массу и стоимость источников питания персональных систем связи. Схема изготовлена по ММИС-технологии с 0,1-мкм топологическими нормами. Поскольку воспроизводимость характеристик усилителя от пластины к пластине высокая, затруднений при освоении крупносерийного производства схемы не должно возникнуть. Начать промышленный выпуск прибора фирма планирует в конце 1997 года, полномасштабное производство его будет освоено в 1998-м.

Усилитель предназначен для коммутации волоконно-оптических линий связи и телефонных каналов с целью передачи высококачественных видеосигналов. Ожидается, что такие системы найдут применение в следующем десятилетии. Кроме того, новые InP малошумящие усилители будут использованы в спутниковых радиолокаторах партнера фирмы по разработке схемы – Лаборатории реактивных двигателей в Пассадене, шт. Калифорния.

Electronic Engineering Times, 1997, N955, p.6

### Дайджесты