

ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.382:621.373.820

**ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО МАСШТАБИРОВАНИЯ
ПРИ СОЗДАНИИ БИПОЛЯРНЫХ МИКРОСХЕМ**В.А. ПИЛИПЕНКО, В.В. ПОНАРЯДОВ, В.А. ГОРУШКО,
В.С. ШВЕДОВ, В.С. СЯКЕРСКИЙ, Т.В. ПЕТЛИЦКАЯ*Филиал НТЦ "Белмикросистемы" ОАО "Интеграл"
Корженевского, 12, Минск, 220108, Беларусь**Поступила в редакцию 21 мая 2010*

Показано, что использование быстрых термических обработок в технологическом процессе создания интегральных микросхем позволяет формировать мелкозалегающие $p-n$ -переходы за счет уменьшения перераспределения внедренной примеси при данной обработке без ухудшения их электрических характеристик. Разработана конструкция формирования $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов, позволяющая провести вертикальное масштабирование интегральных микросхем в два раза без изменения топологических норм их проектирования.

Ключевые слова: быстрая термообработка, диэлектрик, контроль, параметры, элементы.

Введение

Технологические требования при проектировании новых интегральных микросхем (ИМС) чрезвычайно разнообразны. Однако главным качественным показателем все же остаются быстродействие и плотность упаковки ИМС. Одним из основных методов увеличения плотности упаковки является принцип пропорционального масштабирования, когда наряду с уменьшением топологических норм проектирования проводится уменьшение всех вертикальных размеров активных и пассивных элементов формируемых ИМС.

Уменьшение глубин залегания активных и пассивных элементов возможно лишь в случае использования в технологическом процессе их формирования быстрых термических обработок (БТО), так как они позволяют формировать мелкозалегающие $p-n$ -переходы и регулировать перераспределение внедренной примеси в ионно-легированных слоях (ИЛС) путем выбора количества процессов БТО при ее электрической активации.

Так как традиционная самосовмещенная технология создания ИМС ограничивает возможности вертикального масштабирования, из-за наличия узкого места на периферии эмиттерного $p-n$ -перехода, была разработана конструкция активных элементов с плоской базой, исключающая его возникновение и требующая отработки режимов ионного легирования и БТО при формировании активных и пассивных элементов.

Экспериментальная часть

Быстрая термическая обработка проводилась в режиме теплового баланса путем облучения нерабочей стороны пластины некогерентным светом с плотностью мощности 35 Вт/см^2 и длительностью импульса 7–8 с, обеспечивающего нагрев до температур $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$ соответственно. Источником излучения в установке служили кварцевые галогенные лампы накаливания. Контроль температуры осуществлялся термомпарным методом.

Контроль вольт-амперных характеристик (ВАХ) осуществлялся на автоматизированном измерительном комплексе контроля ВАХ HP4156B (Hewlett-Packard, США). Диапазон определяемых (задаваемых) токов составлял от 10^{-15} до 10^{-2} А при напряжениях от 0,001 до 100 В. Погрешность измеряемых (задаваемых) тока и напряжения составляла 0,1%.

Результаты и их обсуждение

Выбор режима формирования базовой области проводился исходя из требований к активной базе и номиналу нагрузочного резистора. Их можно сформулировать следующим образом: концентрация носителей в активной базе должна быть максимальной и обеспечивать получение требуемой величины прямого коэффициента усиления по току; глубина базы не должна приводить к смыканию обедненных областей базового и эмиттерного переходов; напряжение пробоя коллектор–база должно быть ≥ 9 В. Для обеспечения нужного номинала нагрузочного резистора поверхностное сопротивление в области базы должно быть 850 ± 50 Ом/□. Исходя из данных требований, были проведены исследования зависимостей величины коэффициента усиления $n-p-n$ -транзистора и номинала нагрузочного резистора от дозы и энергии легирования базовой области и количества процессов БТО.

Анализ данных зависимостей показал, что уменьшение, как энергии, так и дозы легирования базовой области позволяет увеличить прямой коэффициент усиления $n-p-n$ -транзистора и уменьшить количество процессов БТО (рис. 1).

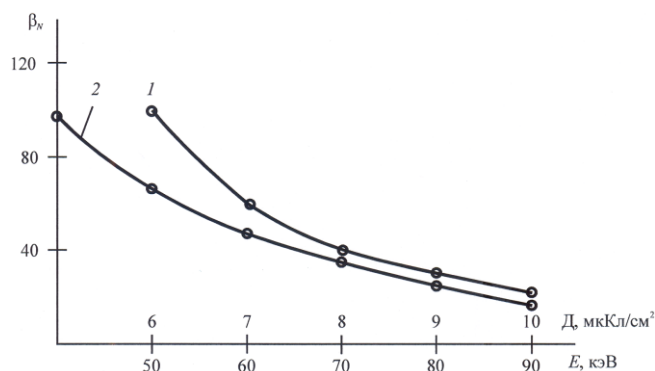


Рис. 1. Зависимость прямого коэффициента усиления по току $n-p-n$ -транзистора от энергии (1) и дозы (2) легирования базы: 1 — $D=6,5$ мкКл/см²; 3 процесса БТО; 2 — $E=60$ кэВ, 2 процесса БТО. Доза и энергия легирования эмиттера 600 мкКл/см² и 30 кэВ, соответственно.

Для получения $\beta_N=90$ при дозе легирования 6,5 мкКл/см² снижение энергии легирования с 80 до 60 кэВ позволяет уменьшить количество процессов БТО с 5 до 3 (рис. 2).

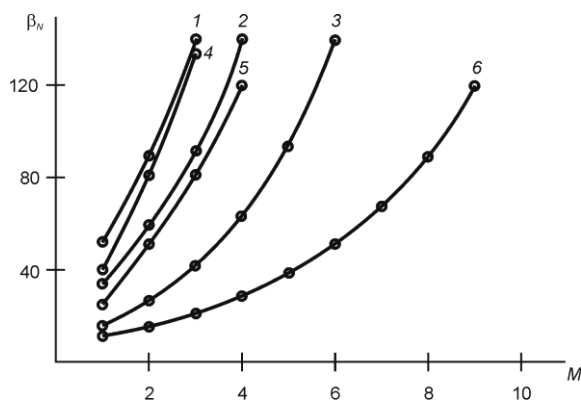


Рис. 2. Зависимость прямого коэффициента усиления по току $n-p-n$ -транзистора от количества процессов БТО при различных энергиях (1–3) ($D=6,5$ мкКл/см²) и дозах (4–6) ($E=60$ кэВ) легирования базы: 1 — 30 кэВ; 2 — 60 кэВ; 3 — 80 кэВ; 4 — 5 мкКл/см²; 5 — 6,5 мкКл/см²; 6 — 10 мкКл/см². Доза и энергия легирования эмиттера 600 мкКл/см² и 30 кэВ, соответственно.

Уменьшение же дозы легирования с 10 до 5 мкКл/см² при энергии легирования 60 кэВ дает возможность сократить количество процессов БТО с 7 до 2 для получения $\beta_N=100$ (рис. 2). Это обусловлено тем, что уменьшение дозы и энергии легирования базы при постоянной концентрации носителей в эмиттере приводит как к снижению концентрации носителей в базе, так и к уменьшению ее ширины, что вызывает увеличение прямого коэффициента усиления по току за счет роста эффективности эмиттера и повышения коэффициента переноса носителей в базе.

Использование энергии легирования базы 50 кэВ и дозы меньше 5 мкКл/см² приводит к такому увеличению ширины обедненного слоя базового *p-n*-перехода, что происходит его смыкание с обедненным слоем эмиттерного перехода, т.е. имеет место прокол базы.

Для улучшения усилительных свойств транзистора важное значение имеет правильный выбор режимов легирования эмиттерной области. Исследование зависимости прямого коэффициента усиления по току *n-p-n*-транзистора от дозы легирования эмиттера и количества процессов БТО показало (рис. 3), что увеличение дозы легирования приводит как к росту β_N , так и сокращению количества процессов БТО, необходимых для получения требуемых значений коэффициента усиления.

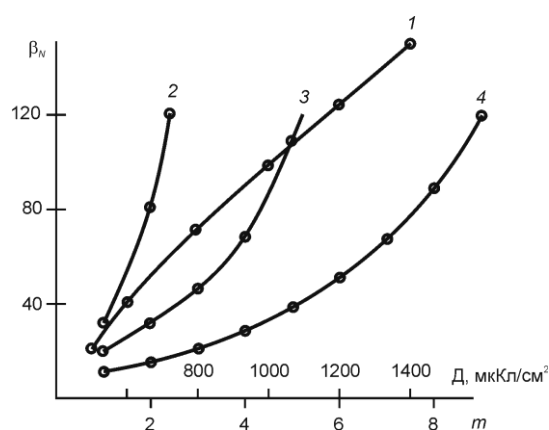


Рис. 3. Зависимость прямого коэффициента усиления по току *n-p-n*-транзистора от дозы легирования эмиттера (1) и количества фотонных обработок (2–4): 1 — две фотонные обработки; 2 — $D=800$ мкКл/см²; 3 — $D=600$ мкКл/см²; 4 — $D=500$ мкКл/см². Энергия легирования эмиттера фосфором 30 кэВ.

Это связано с тем, что увеличение дозы легирования эмиттера приводит к росту концентрации носителей в нем и увеличению глубины его залегания, т.е. к уменьшению ширины активной базы. При дозе легирования более 800 мкКл/см² наблюдаются утечки и имеют место низкие значения пробивного напряжения коллектор–эмиттер и эмиттер–база. Это связано с тем, что глубина залегания эмиттерного *p-n*-перехода уже не обеспечивает сохранения достаточной ширины электронейтральной базы для нормальной работы *n-p-n*-транзистора.

Таким образом, приемлемым режимом формирования эмиттера, с точки зрения получения необходимых значений прямого коэффициента усиления *n-p-n*-транзистора по току при минимальном количестве процессов БТО, является доза легирования 600 мкКл/см² и энергия ионов 20–30 кэВ.

Необходимо отметить, что в случае приборов с плоской базой эффективность эмиттера выше, чем в приборах с профилированной базой, так как в данном случае в работе участвует практически вся его площадь, а не только периферийная область, как в транзисторе с профилированной базой.

Формирование инжекторной области *n-p-n*-транзистора по традиционной технологии проводится путем легирования бора во всю поверхность пластины, т.е. примесь вводится как в область эмиттера, так и в базовый диэлектрик. В этом случае при разгонке эмиттера необходимо перекомпенсировать p^+ -область проводимости, образующуюся в нем при легировании инжектора на n^+ -тип. Это требует проведения большого количества БТО (7–6). Кроме того, легирование диэлектрика бором в процессе формирования инжектора приводит к росту заряда на границе полупроводник–диэлектрик, что не дает возможности повышать дозу его легирования.

Последнее обстоятельство обусловлено тем, что с повышением дозы легирования требуется большее количество процессов БТО для перекомпенсации p^+ -области в эмиттере. В то же время использование малых доз при легировании инжектора не позволяет получать высокие значения прямого коэффициента усиления по току $p-n-p$ -транзистора, т.к. для его увеличения требуется повышение концентрации носителей в инжекторной области. В связи с этим был разработан и исследован метод локального формирования инжектора, при котором бор вводится в область инжектора через отдельное окно. Это позволило стабилизировать пробивное напряжение инжектор–база и улучшить характеристики $p-n-p$ -транзистора. Кроме того, использование метода локального формирования инжектора дало возможность снизить количество процессов БТО, необходимых для получения требуемых величин β_N , с 7–8 до 1–2, а также увеличить коэффициент усиления $p-n-p$ -транзистора β_P за счет роста концентрации носителей в инжекторе. Рост дозы легирования инжектора с 50 до 300 мкКл/см² обеспечило увеличение β_P с 0,5 до 1,2.

Важным электрическим параметром $n-p-n$ -транзистора является значение $U_{кб}$, которое определяется величиной переходного слоя эпитаксиальная пленка–скрытый слой и зависит от времени и температуры проведения последующих высокотемпературных операций. Одной из основных операций, приводящей к такому перераспределению примеси, является длительная термическая обработка ионно-легированного слоя для создания глубокого коллектора. Температура и время обработки выбирались из требования смыкания коллектора со скрытым слоем и получения максимального значения $U_{кб}$. Исследование зависимости пробивного напряжения $U_{кб}$ от температуры и времени обработки коллектора показало, что с повышением как температуры, так и времени обработки происходит уменьшение $U_{кб}$ за счет перераспределения сурьмы из скрытого n^+ -слоя в эпитаксиальную пленку. На основании проведенных исследований был выбран режим формирования глубокого коллектора, обеспечивающий его смыкание со скрытым n^+ -слоем и получение максимального значения $U_{кб}$ ($T=1000^\circ\text{C}$, $t=30$ мин).

Сопоставление электрических параметров ИМС, сформированных по разработанной технологии с применением БТО, проводилось относительно приборов, изготовленных по традиционной технологии с профилированной базой на эпитаксиальных пленках толщиной 1,5 мкм. Сравнительный анализ таких приборов (табл. 1) позволил установить следующие закономерности.

Использование БТО и технологии с плоской базой позволяет формировать $n-p-n$ -транзисторы на эпитаксиальных пленках толщиной 0,75 мкм и получать $U_{кб}=18$ В.

Таблица 1. Электрические параметры СБИС, полученные с применением БТО и традиционной технологии

Вид технологии	Толщина эпитаксиальной пленки, мкм	Электрические параметры СБИС								
		$U_{кб}$, В	$U_{кэ}$, В	$U_{иб}$, В	$U_{эб}$, В	β_N	β_P	$U_{вых}$, В	$I_{шт}$, мА	t_{AS} , нс
Фотонная	0,75	18	6	13	6,5	80	1,2	6,3	70	48
Традиционная	1,50	15	4	12	6,0	70	0,9	6,1	70	53

Аналогичным образом ведет себя и пробивное напряжение коллектор–эмиттер, величина которого в 1,5 раза выше в случае технологии с применением БТО по сравнению с традиционной. Таким образом, уменьшение значений $U_{кэ}$ и $U_{кб}$ для транзисторов с профилированной базой по сравнению с транзисторами, полученными с применением БТО, связано как с большей глубиной залегания базы, так и с наличием узкого места на периферии $p-n$ -перехода.

Анализ структурных параметров (табл. 2), проведенный на технологическом $n-p-n$ -транзисторе методом косых шлифов показал (рис. 4), что у транзисторов, изготовленных по технологии с применением БТО, во-первых, отсутствует узкое место на периферии эмиттерного $p-n$ -перехода, во-вторых, глубина залегания базы и эмиттера меньше, чем у транзисторов с профилированной базой и, как следствие, меньше ширина активной базы, в-третьих, глубина базы под эмиттером имеет такую же величину, как и вне его, т.е. отсутствует эффект отеснения базы эмиттером. Наличие данного эффекта, который обычно имеет место при создании $n-p-n$ -транзистора с узкой базой, обуславливается ускоренной диффузией бора и фосфора за счет диссоциации комплексов P^+V^{2-} с образованием вакансий в переходной области, которая отсутствует при БТО. Это связано с тем, что при диссоциации комплексов P^+V^{2-} в переходной

области при БТО не происходит образования вакансий, ускоряющих диффузию бора. Кроме того, из-за получения крутых концентрационных профилей область с низкой концентрацией фосфора очень мала, а, следовательно, будет мало увеличение коэффициента диффузии в области с малой концентрацией фосфора.

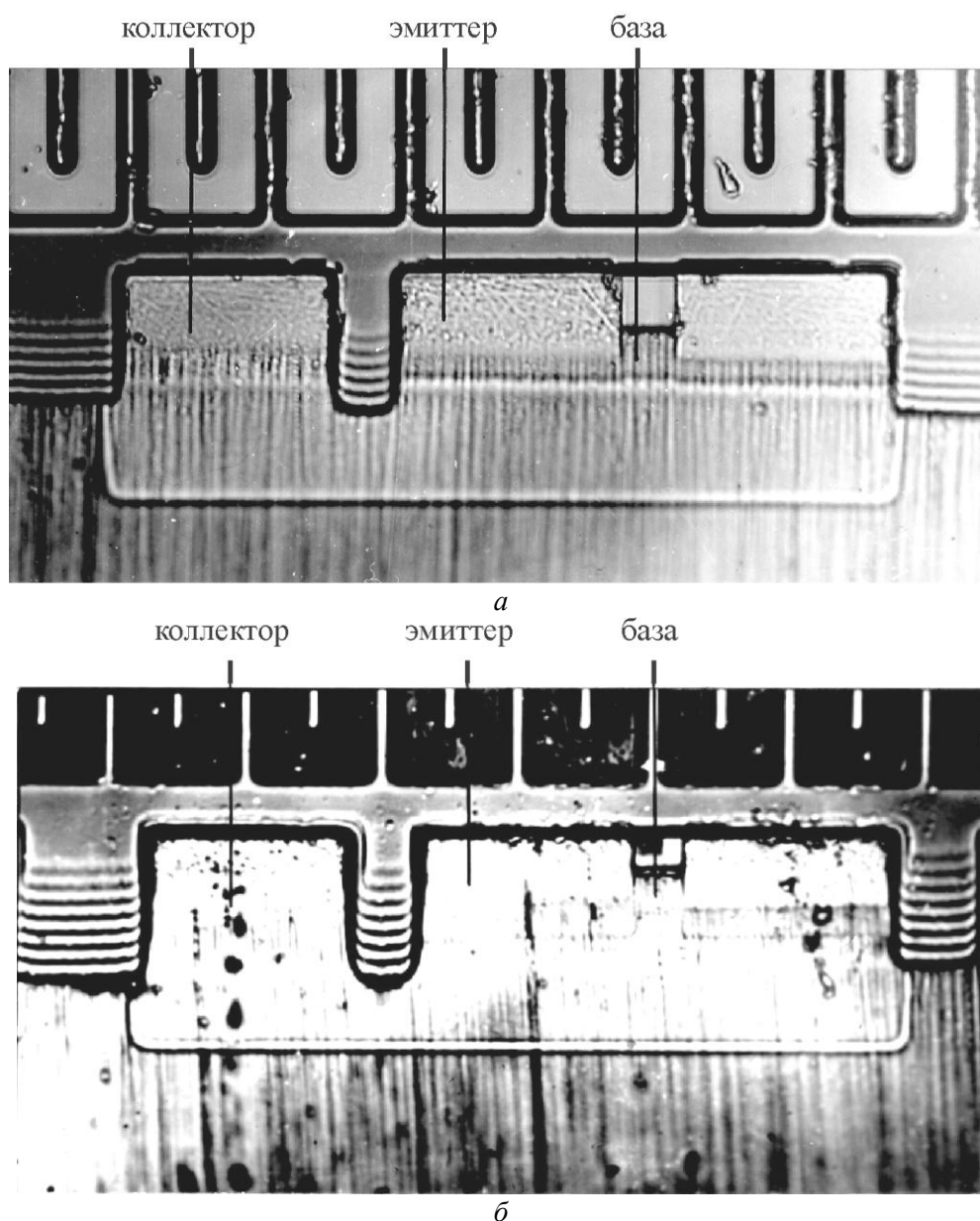


Рис. 4. Поперечный разрез технологического *n-p-n*-транзистора, изготовленного с применением БТО (а) и по традиционной (б) технологии

Таблица 2. Структурные параметры СБИС, полученные с применением БТО и традиционной технологии

Вид технологии	Толщина эпитаксиальной пленки, мкм	Структурные параметры СБИС		
		Глубина базы, мкм	Глубина эмиттера, мкм	Глубина базы под окислом, мкм
Фотонная	0,75	0,50	0,30	0,50
Традиционная	1,50	0,85	0,51	0,50

Заключение

Использование процессов БТО при создании ИМС позволяет формировать активные элементы на эпитаксиальных пленках толщиной 0,6–1,0 мкм с электрическими параметрами, превосходящими аналогичные параметры приборов, изготовленных по традиционной технологии на эпитаксиальных пленках толщиной 1,5 мкм. Основными факторами, обеспечивающими преимущества приборов, полученных с применением БТО, являются меньшие глубины залегания базового и эмиттерного $p-n$ -переходов, отсутствие эффекта оттеснения базы эмиттером, изменение конструкции $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов и режимов легирования активных областей.

PECULIARITIES OF VERTICAL SCALING WHEN CREATING BIPOLAR MICROCIRCUITS

V.A. PILIPENKO, V.V. PONARYADOV, V.A. GORUSHKO,
V.S. SHVEDOV, V.S. SYAKERSKY, T.V. PETLITSKAYA

Abstract

It is shown, that application of the fast thermal treatments in the technological process of creation of the integrated microcircuits ensures formation of the shallow bulk $p-n$ -junctions due to reduction of redistribution of the implanted impurity with the given processing without deterioration of their electric characteristics. The formation design is developed of the $n-p-n$ - and $p-n-p$ -transistors, making it possible to perform the two times vertical scaling of the integrated microcircuits without variation of the layout rated norms of their design development.