

УДК 621.3.049.774.3

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО МАСШТАБИРОВАНИЯ БИПОЛЯРНЫХ N-P-N-ТРАНЗИСТОРОВ

А.В. ЕМЕЛЬЯНОВ, В.А. ПИЛИПЕНКО

(Научно-производственное объединение «Интеграл», Минск)

Основным ограничивающим факторам при вертикальном масштабировании являются электрический пробой p-n-переходов: база – коллектор, коллектор – эмиттер, и прокол базы в n-p-n-транзисторе, которые вызываются лавинным умножением носителей в эпитаксиальном слое и смыканием обедненных слоев в базовой области при достижении некоторых минимальных размеров активных областей, толщины полупроводниковых слоев и диэлектрических пленок. На основании численного моделирования параметров биполярного n-p-n-транзистора установлены физические пределы его вертикального масштабирования. Выполнен расчет основных структурных характеристик базовых элементов сверхбольших интегральных схем, являющихся обязательным условием для начала разработки конструкции и технологии любой масштабируемой БИС.

Введение. Основной тенденцией развития биполярных сверхбольших интегральных схем (СБИС) является увеличение быстродействия и плотности упаковки. Один из основных путей решения данных проблем – использование принципа пропорционального масштабирования, когда имеет место уменьшение как топологических, так и вертикальных размеров микросхем, а именно: глубины базы, эмиттера, толщины диэлектрических, эпитаксиальных и токопроводящих слоев [1, 2].

Уменьшая толщину эпитаксиальной пленки и используя боковую диэлектрическую изоляцию за счет уменьшения бокового ухода в процессе травления и окисления кремния можно увеличить плотность упаковки в 2 раза.

Малые вертикальные и горизонтальные размеры позволяют увеличить быстродействие за счет уменьшения некоторых из паразитных емкостей, снижающих скорость переключения, а также оптимизации профилей легирования, концентрации носителей в эпитаксиальной пленке, базе, эмиттере и ширины активной базы.

Поскольку для практической реализации вертикального масштабирования необходимо значительно уменьшать глубины формируемых p-n-переходов, то становится ясным, что для достижения данной цели необходимо уменьшить диффузионное перераспределение примеси в процессе ее электрической активации в ионнолегированном слое. Наиболее приемлемым для этих целей является использование в технологии создания биполярных СБИС быстрой термической обработки [3].

Как известно, основным ограничивающим факторам при вертикальном масштабировании являются электрический пробой p-n-переходов база – коллектор, коллектор – эмиттер и прокол базы в n-p-n-транзисторе, которые вызываются лавинным умножением носителей в эпитаксиальном слое и смыканием обедненных слоев в базовой области при достижении некоторых минимальных размеров активных областей, толщины полупроводниковых слоев и диэлектрических пленок.

Важнейшими электрическими параметрами базовых элементов СБИС – транзисторов – являются прямые коэффициенты усиления тока β_N (для n-p-n) и β_P (для p-p-n-транзистора), а также пробивные напряжения: коллектор – эмиттер ($U_{кэ}$); коллектор – база ($U_{кб}$).

В работах [4, 5] были определены требования к численным значениям этих параметров с точки зрения обеспечения работоспособности СБИС в диапазоне рабочих токов и температур. Так, величина β_N должна быть не менее 80 при $U_{кб} \geq 9$ В.

Основная часть. Исходя из требований к численным значениям $U_{кб}$ и β_N , рассчитаем основные структурные характеристики базовых элементов СБИС:

- максимально и минимально возможные глубины залегания базы и эмиттера;
- ширину базы и концентрацию носителей в ней для n-p-n- и p-p-n-транзисторов.

Эти данные являются обязательным условием для начала разработки конструкции и технологии любой масштабируемой БИС.

Анализ профиля распределения примеси в структуре эпитаксиальная пленка – скрытый слой при толщине пленки 0,6 мкм (рис. 1) показывает, что для обеспечения концентрации носителей в области базового p-n-перехода $\leq 10^{17}$ см⁻³, а следовательно, $U_{кб} \geq 9$ В, глубина его залегания должна быть менее 0,43 мкм. Глубина базового p-n-перехода определяется выражением:

$$h_{\delta} = h_{\varepsilon} + W_{\delta}, \quad (1)$$

где h_{δ} – глубина базы; h_{ε} – глубина эмиттера; W_{δ} – ширина базы.

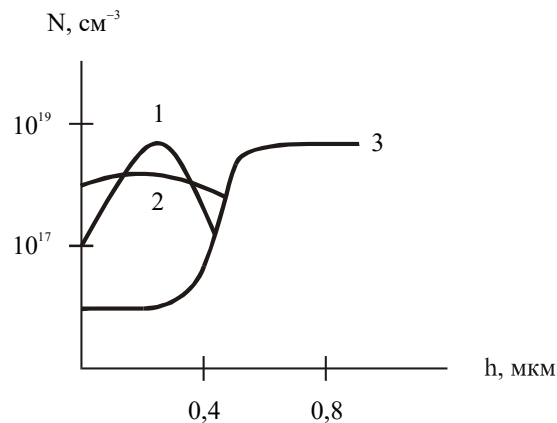


Рис. 1. Профиль распределения бора (1, 2) после БТО в структуре эпитаксиальная пленка – n⁺-скрытый слой при толщине эпитаксиальной пленки 0,6 мкм и энергии легирования базы бором 80 кэВ с дозой 6,5 мкКл/см²: 1 – распределение после одной быстрой термообработки; 2 – распределение после семи быстрых термообработок; 3 – профиль распределения фосфора и сурьмы

Учитывая (1), рассчитаем минимально возможные глубины эмиттера, базы и ее ширины, принимая во внимание, что глубина эмиттер-базового перехода определяется энергией и уровнем легирования эмиттера, а также уровнем легирования базовой области. При этом для уменьшения его глубины необходимо, с одной стороны, увеличивать концентрацию носителей в базе, а с другой – уменьшать энергию и дозу легирования эмиттера. Однако для получения максимальной эффективности эмиттера, а следовательно и увеличения β_N , концентрация носителей в эмиттере должна быть максимально возможной, т.е. близкой к пределу растворимости фосфора в кремнии, используемого при создании эмиттера, что составляет $\sim 10^{21}$ см⁻³. Это означает, что снижения глубины залегания эмиттерного p-n-перехода можно добиться путем одновременного уменьшения дозы и энергии легирования эмиттера фосфором при сохранении концентрации носителей в нем 10^{21} см⁻³ и повышения концентрации носителей в базе.

Минимально возможная энергия легирования эмиттера ограничена 20 кэВ, так как использование энергии менее 20 кэВ приводит к резкому уменьшению тока в ионном пучке, увеличению времени легирования и загрязнению пучка посторонними ионами, вызывающими ухудшение параметров формируемых приборов. Следовательно, для получения максимальной концентрации носителей в эмиттере при энергии легирования 20 кэВ максимально допустимая доза легирования согласно выражению [6]

$$\bar{N} = N_d(2,5\Delta R_p)^{-1}, \tag{2}$$

где \bar{N} – средняя концентрация примеси; N_d – число внедренных атомов на единицу площади, составляет 600 мкКл/см².

Как известно, для уменьшения глубины формирования эмиттер-базового перехода концентрация носителей в базовой области должна быть как можно выше. Однако при создании n⁺-p⁺-переходов обедненный слой резко уменьшается и при его ширине, равной 10 нм, перенос носителей между базой и эмиттером приобретает туннельный характер.

Рассчитаем, при какой концентрации носителей в базе ширина обедненного слоя достигает 10 нм, а следовательно будет иметь место туннельный механизм переноса носителей между эмиттером и базой, используя выражение [7]:

$$W_0 = 2\varepsilon_{Si}U_k(eN_b)^{-1}, \tag{3}$$

где W_0 – ширина обедненной области (в нашем случае $W_0 = 10$ нм); ε_{Si} – диэлектрическая проницаемость кремния; U_k – контактная разность потенциалов; N_b – концентрация носителей в базе.

Получим, что величина предельно допустимой концентрации в базе составляет 10^{19} см⁻³.

Для дозы легирования 600 мкКл/см², энергии легирования 20 кэВ и концентрации носителей в базе 10^{19} см⁻³ определим численное значение минимальной глубина формирования эмиттера используя [6]:

$$x_j = R_p + 3\Delta R_p, \tag{4}$$

где $R_p = 14,6E^{0,988}$ – проецированный пробег ионов фосфора при энергии легирования E ; $\Delta R_p = 16,5E^{0,735}$ – среднеквадратичное отклонение проецированного пробега ионов фосфора при энергии легирования E .

Подставив необходимые значения, получим численное значение x_j , которое составляет 0,0727 мкм.

Следует отметить, что использование в качестве легирующего элемента мышьяка позволяет формировать эмиттерный р–п-переход с более мелкой глубиной залегания за счет меньших значений R_p и ΔR_p по сравнению с фосфором.

Минимальную ширину базы п–р–п-транзистора, обеспечивающую требуемое значение $\beta_N = 80$, будем определять как сумму ширины активной базы и ширины обедненных областей базового и эмиттерного переходов в области базы.

Расчет зависимостей напряжения смыкания обедненных областей базового и эмиттерного переходов от ширины базы и концентрации носителей в ней, а также прямого коэффициента усиления по току от ширины активной базы и концентрации носителей в ней проведем на основании выражений [7]:

$$U_c = eN_\delta h^2 \delta_{n-p-n} (2\varepsilon_{Si})^{-1}; \tag{5}$$

$$\beta_N = N_\delta (N_\delta)^{-1} (\tau_\delta / D_\delta)^{1/2} D_\delta (h_{\delta_{n-p-n}})^{-1}, \tag{6}$$

где $h_{\delta_{n-p-n}}$ – ширина базы п-р-п-транзистора; $h_{\delta_{an-p-n}}$ – ширина активной базы п–р–п-транзистора; N_δ – концентрация носителей в эмиттере; τ_δ – время жизни носителей в эмиттере; D_δ – диффузионная длина электронов в эмиттере; D_δ – диффузионная длина дырок в базе; U_c – напряжение смыкания обедненных областей базы и эмиттера.

В результате расчета установлено, что минимальная ширина активной базы, удовлетворяющая условию $\beta_N = 80$, обеспечивается при максимальной концентрации носителей в базе 10^{19} см^{-3} и составляет 0,05 мкм (рис. 2). При этом достигается и минимальная ширина обедненного слоя 0,034 мкм (рис. 3).

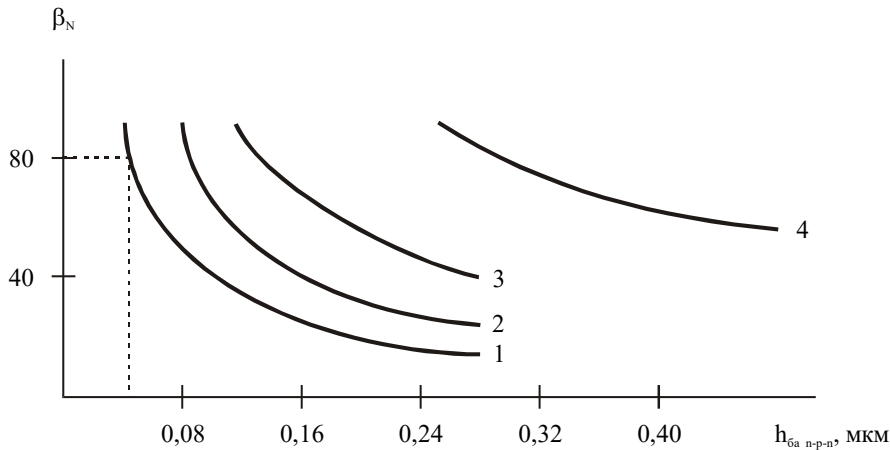


Рис. 2. Зависимость прямого коэффициента усиления по току п–р–п-транзистора от ширины активной базы при различных концентрациях носителей в ней: 1 – 10^{19} см^{-3} ; 2 – $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 3 – $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 4 – $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

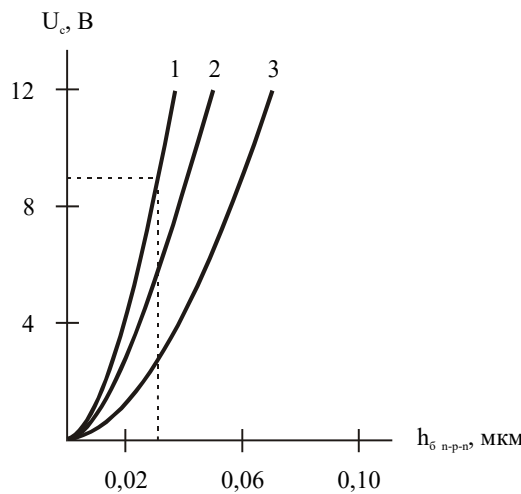


Рис. 3. Зависимость напряжения смыкания обедненных слоев базового и эмиттерного р–п-перехода от ширины активной базы п–р–п-транзистора при различных концентрациях носителей в ней: 1 – 10^{19} см^{-3} ; 2 – $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 3 – $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 4 – $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Для исключения смыкания обедненных слоев базы и эмиттера и выполнения условия $\beta_N = 80$ необходимо увеличить ширину активной базы путем снижения в ней концентрации носителей. При значениях от 10^{19} до $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ширина активной базы увеличивается от 0,05 до 0,32 мкм, при этом растет и ширина обедненного слоя от 0,034 до 0,06 мкм, что обеспечивает ширину базы п–р–п-транзистора до 0,38 мкм. Следовательно, минимальная глубина базы

$$h_{\bar{o}} = h_{\bar{e}} + h_{\bar{o}a} + W_0 \quad (7)$$

составляет 0,156 мкм и достигается при максимально возможной концентрации в ней.

Заключение

На основании численного моделирования параметров биполярного п–р–п-транзистора установлены физические пределы его вертикального масштабирования:

- толщина эпитаксиальной пленки – 0,6 мкм;
- концентрация носителей в эпитаксиальной пленке – 10^{17} см^{-3} ;
- глубина эмиттера – 0,07 мкм;
- концентрация носителей в эмиттере – 10^{21} см^{-3} ;
- глубина базы – 0,15 мкм;
- концентрация носителей в базе – 10^{19} см^{-3} ;
- ширина базы п–р–п-транзистора – 0,45 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-структур / Г.Я. Красников. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2002. – 416 с.
2. Адамов, Ю.Ф. Конструктивные элементы сверхбыстродействующих биполярных БИС / Ю.Ф. Адамов // Зарубежная электронная техника. – 1984. – № 11. – С. 28 – 59.
3. Пилипенко, В.А. Использование фотонных технологических процессов при изготовлении биполярных интегральных микросхем / В.А. Пилипенко, Ю.П. Попов // Электронная промышленность. – 1988. – № 5. – С. 3 – 9.
4. Особенности лавинного пробоя р–п-перехода, сформированного по ионно-фотонной технологии / В.А. Пилипенко [и др.] // Электронная техника. Сер. 2. – 1986. – Вып. 1. – С. 57 – 60.
5. Физические основы быстрой термообработки. Геттерирование, отжиг ионнолегированных слоев, БТО в технологии СБИС / В.М. Анищик [и др.]; под общ. ред. В.А. Пилипенко. – Минск: БГУ, 2001. – 149 с.
6. Мейер, Дж. Ионное легирование полупроводников / Дж. Мейер, Л. Эрикссон, Дж Дэвис. – М.: Мир, 1973. – 296 с.
7. Зи, С. Технология СБИС. Т. 1 / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 405 с.

Поступила 03.05.2007