

ОСОБЕННОСТИ ЛАВИННОГО ПРОБОЯ ПЕРЕХОДА КОЛЛЕКТОР – БАЗА СУБМИКРОННОГО БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Interrelation has been established of the break-down voltage collector – base and the gain ratio of the $n-p-n$ transistor with the impurities distribution profiles in the base area and the epitaxial film. It is shown, that the value of the break-down voltage depends both on the impurity doping modes, epitaxial film thickness and the modes of the fast thermal treatment of the ion-doped layers.

Основной тенденцией развития сверхбольших интегральных схем (СБИС) является увеличение степени их интеграции. Это достигается путем уменьшения как топологических, так и вертикальных размеров биполярных микросхем, а именно: глубины базы, эмиттера, толщины диэлектрических, эпитаксиальных и токопроводящих слоев [1–3]. Изменение толщины эпитаксиальной пленки с 1,5 до 1 мкм позволяет за счет уменьшения бокового ухода в процессе травления и окисления кремния увеличить степень интеграции в 1,3 раза. При снижении толщины эпитаксиальной пленки до 0,6 мкм степень интеграции увеличивается в 2 раза с сохранением установленных норм проектирования.

Сокращение вертикальных и горизонтальных размеров конструкции позволяет увеличить быстродействие транзистора за счет уменьшения величины ряда емкостей, снижающих скорость переключения. При этом необходимо решать сложные задачи оптимизации профилей легирования и расчета требуемых концентраций носителей в эпитаксиальной пленке, базе, эмиттере и выбора необходимой ширины активной базы.

Основным путем вертикального масштабирования активных и пассивных элементов СБИС является значительное уменьшение диффузионных процессов в ионно-легированных слоях при формировании мелкозалегающих $p-n$ -переходов, которого можно достичь путем использования в технологии создания СБИС быстрой термической обработки (БТО) [4–6].

Известно, что основными механизмами электрического пробоя $p-n$ -переходов в $n-p-n$ -транзисторе являются смыкание обедненных слоев в базовой области и лавинное умножение носителей в эпитаксиальной пленке, которые определяются уровнем легирования примеси и толщиной соответствующих слоев. Так как при вертикальном масштабировании наблюдается уменьшение глубины создаваемых $p-n$ -переходов, то возникают определенные требования к их формированию.

Поскольку при малой толщине эпитаксиальной пленки формирование базового $p-n$ -перехода происходит на границе эпитаксиальная пленка – подложка, т. е. концентрация носителей в пленке не является постоянной величиной, то для расчета лавинного пробоя такого перехода необходимо учитывать концентрационный профиль распределения носителей как в базовой области, так и в эпитаксиальной пленке.

Однако до настоящего времени в большинстве работ, посвященных этой проблеме, не исследовалось влияние профилей распределения примесей на физические процессы, происходящие при лавинном пробое $p-n$ -перехода, и на основные параметры биполярного транзистора: прямой коэффициент усиления по току β_n , пробивное напряжение коллектор – база $U_{к.б}$, пробивное напряжение коллектор – эмиттер $U_{к.э}$. Поскольку взаимосвязь коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером β_n и коэффициента усиления по току в схеме с общей базой α_n определяется выражением [7] $\beta_n = \alpha_n(1 - \alpha_n)^{-1}$, а $U_{к.э}$ и $U_{к.б}$ в схеме с общим эмиттером связаны с α_n выражением $U_{к.э} = U_{к.б}[(1 - \alpha_n)^{-1}]^{1/4}$, то взаимосвязь между $U_{к.э}$, $U_{к.б}$ и β_n будет иметь вид

$$U_{к.э} = U_{к.б}[(1 + \beta_n)^{-1}]^{1/4}. \quad (1)$$

Численные значения β_n при заданном токе базы $n-p-n$ -транзистора (от 10^{-8} до 10^{-5} А) устанавливаются в зависимости от типа микросхемы (цифровая, аналоговая, цифроаналоговая), требований к конкретному блоку (входной каскад, выходной усилитель, источник опорного напряжения и т. д.), ограничений на величину потребляемой мощности и могут лежать в диапазоне от 50 до 200.

Целью работы являлось установление взаимосвязи $U_{к.б}$, а следовательно и β_n , с профилями распределения примесей бора (в базовой области) и фосфора (в эпитаксиальной пленке) $n-p-n$ -транзистора.

Используя выражение (1), можно легко показать, что требуемая величина β_n , зависящая от типа проектируемой схемы, может быть получена при различных сочетаниях $U_{к.б}$ и $U_{к.э}$. Так, например, величина $\beta_n = 80$, являющаяся средним значением для логических схем, достигается при $U_{к.б} = 9$ В и $U_{к.э} = 3$ В или $U_{к.б} = 12$ В и $U_{к.э} = 4$ В.

Рассмотрим механизм влияния характера распределения примеси в базовой области $n-p-n$ -транзистора на величину $U_{к.б}$.

Известно, что для определения лавинного пробоя $p-n$ -перехода необходимо решить одномерное уравнение Пуассона [7]

$$\partial E(x)/\partial x = e\varepsilon^{-1}\rho(x), \quad (2)$$

где $\rho(x)$ – электрический заряд в точке x ; e – заряд электрона; ε – диэлектрическая проницаемость кремния.

Учитывая, что в связи с перемещением подвижных носителей к местам приложения внешнего напряжения в точке x $p-n$ -перехода возникает нарушение нейтральности заряда, приводящее к образованию обедненной области, выражение (2) примет вид

$$\partial E(x)/\partial x = e\varepsilon^{-1}N(x), \quad (3)$$

где $N(x)$ – распределение имплантированной примеси.

Для определения границ обедненной области при пробое (x_L, x_M) воспользуемся двумя условиями: равенством нулю напряженности поля и единице ионизационного интеграла на границах обедненной области (x_L, x_M). В этом случае выражение (3) можно записать в виде $\partial^2\varphi(x)/\partial x^2 = e\varepsilon^{-1}N(x)$.

Решая (4) с учетом указанных условий, получаем выражение для напряжения пробоя перехода коллектор – база

$$U_{к.б} = e\varepsilon^{-1} \int_{x_M}^{x_L} xN(x)dx. \quad (4)$$

Несмотря на простоту подинтегральной функции

$$\int_{x_M}^{x_K} A \exp[-B/E(x)] dx = 1, \tag{5}$$

где $A = 7,03 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$, $B = 1,231 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ [8], она является плохо обусловленной из-за резкого максимума в точке коллекторного $p-n$ -перехода (x_K) и быстрого уменьшения при удалении от нее. Для вычисления подинтегральной функции разложим экспоненту в ряд Тейлора вблизи точки x_K и ограничимся первыми членами:

$$\exp[-B/E(x)] = \exp(-B/E_{\max}) \{1 + [N'(x_K)(x - x_K)]/(2E_{\max})\}. \tag{6}$$

Решая совместно (6) и (5), получим выражение для определения E_{\max}

$$A \exp(-B/E_{\max}) = (E_{\max})^{-1} \{ [B | N'(x_K) |] / (2\pi) \}^{1/2}, \tag{7}$$

где $N'(x_K)$ – производная распределения имплантированной примеси в точке x_K .

Решив (7) и определив E_{\max} , находим границы обедненной области x_L, x_M таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\left| \int_{x_L}^{x_K} N(x) dx \right| = \left| \int_{x_K}^{x_M} N(x) dx \right| = E_{\max}.$$

Теперь, используя выражение (4), легко определить численное значение напряжения лавинного пробоя для заданной величины β_n . Для применения предложенного подхода необходимо знать распределение примеси в обедненной области базового $p-n$ -перехода и положение ее границ при пробое. Решение данной задачи приведено в работе [9].

Уравнение (2), при условии равенства нулю напряженности поля на границах обедненной области (x_L, x_M) и единице ионизационного интеграла с одновременным интегрированием коэффициентов диффузии и учетом распределения примесей в базовой области, границе раздела эпитаксиальной пленки – подложка и скрытом n^+ -слое, решалось численным методом на ПВМ. На рис. 1–3 приведены расчетные и экспериментальные зависимости характеристик транзистора.

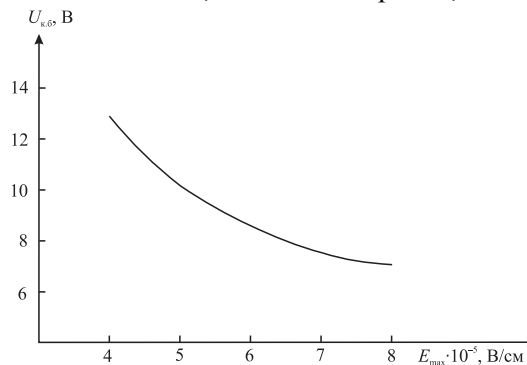


Рис. 1. Зависимость пробивного напряжения коллектор – база от максимальной напряженности электрического поля в точке x_K $p-n$ -перехода

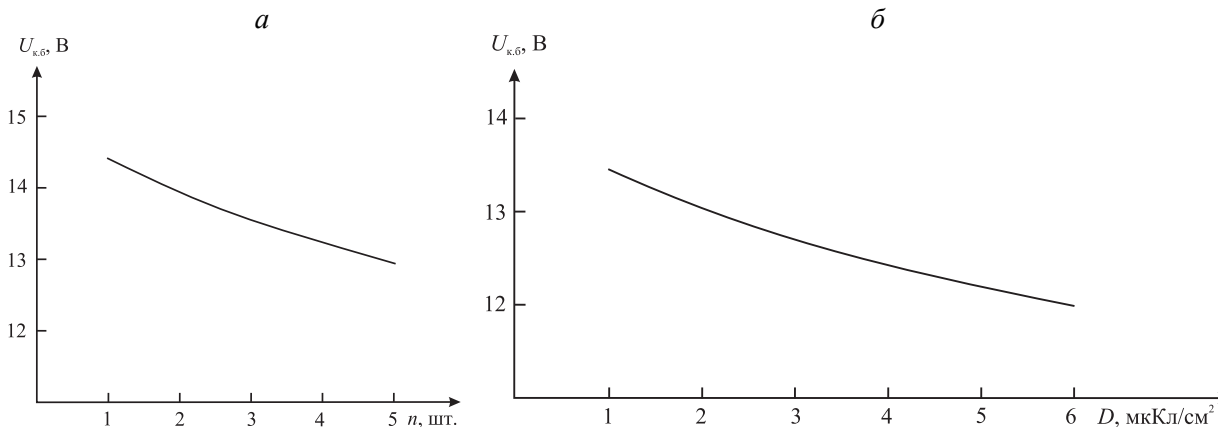


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения коллектор – база от количества процессов БТО (а) и дозы легирования базы бором (б) при толщине эпитаксиальной пленки 1 мкм и энергии легирования 70 кэВ

Как видно из рис. 1, напряжение пробоя однозначно определяется напряженностью электрического поля E_{\max} в точке x_K $p-n$ -перехода. Из выражения (7) следует, что с увеличением градиента концентрации растет и напряженность электрического поля, а следовательно, падает пробивное напряжение $U_{к.б.}$ В то же время, как видно из рис. 2, $U_{к.б.}$ слабо зависит от количества процессов БТО и дозы легирования, поскольку данные параметры оказывают незначительное влияние на N' , E_{\max} и глубину залегания $p-n$ -перехода в точке x_K . При этом, как следует из рис. 3, на $U_{к.б.}$ сильное влияние оказывает толщина эпитаксиальной пленки и энергия легирования базы, так как эти параметры существенно влияют на глубину залегания $p-n$ -перехода в точке x_K . Кроме того, с увеличением крутизны в переходной области пробивное напряжение должно возрастать, о чем свидетельствуют экспериментальные результаты.

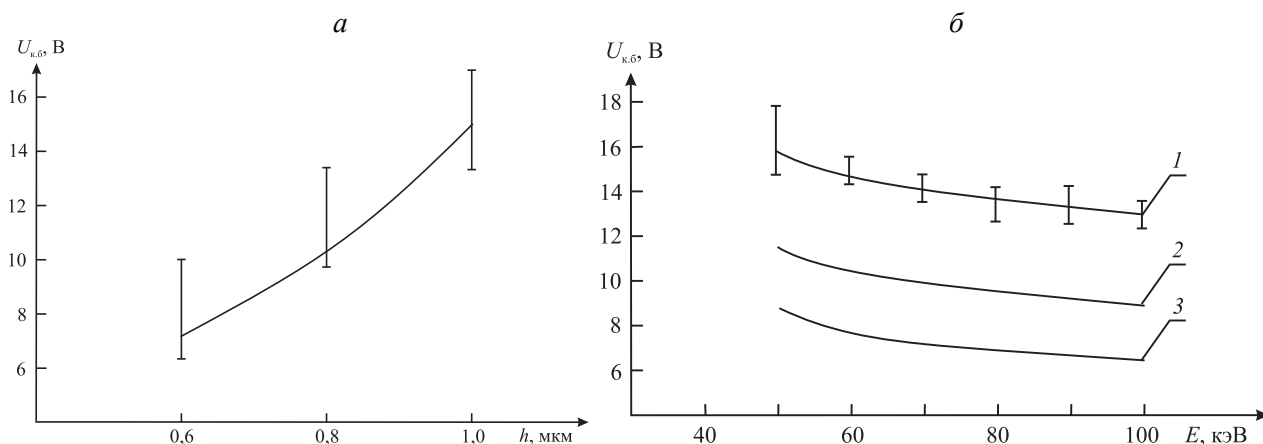


Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения коллектор – база от толщины эпитаксиальной пленки при дозе легирования базы бором 10 мКл/см^2 и энергии 70 кэВ (а) и энергии легирования базы для различной толщины эпитаксиальной пленки (мкм) (б): 1– $h = 1$, 2– $h = 0,8$, 3– $h = 0,6$

Таким образом, показано, что на пробивное напряжение коллектор – база определяющее влияние оказывает не только уровень легирования, но и профиль распределения бора по толщине базовой области p – n -перехода и фосфора по толщине эпитаксиальной пленки. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании конструкций базовых элементов биполярных субмикронных БИС.

1. Адамов Ю. Ф. // Зарубежная электронная техника. 1984. № 11. С. 28.
2. Красников Г. Я. // Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М., 2002.
3. Степаненко И. П. // Основы микроэлектроники. М., 1980.
4. Пилипенко В. А., Пономарь В. Н., Горушко В. А. // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76. № 4. С. 95.
5. Пилипенко В. А. // Быстрые термообработки в технологии СБИС. Мн., 2004.
6. Анищик В. М., Горушко В. А., Пилипенко В. А. и др. // Физические основы быстрой термообработки. Геттерирование, отжиг ионно-легированных слоев, БТО в технологии СБИС. Мн., 2001.
7. Зи С. // Физика полупроводников. М., 1984. Т. 1.
8. Van Overstraten De Man H. // Sol. St. Electron. 1970. Vol. 13. № 5. P. 583.
9. Пилипенко В. А. и др. // Инженерно-физический журнал. 2007. Т. 80. № 3. С. 181.

Поступила в редакцию 26.09.08.

Владимир Александрович Пилипенко – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники.

Владимир Васильевич Понарядов – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель проректора по экономике и инвестициям.

Валентина Алексеевна Горушко – ведущий инженер Государственного центра «Белмикросистемы» НТЦ «Белмикросистемы» НПО «Интеграл».

Валентин Степанович Сякерский – директор НТЦ «Белмикросистемы» НПО «Интеграл».

Татьяна Владимировна Петлицкая – кандидат технических наук, ведущий инженер Государственного центра «Белмикросистемы» НТЦ «Белмикросистемы» НПО «Интеграл».