

## Определение толщины базы вертикальных $n-p-n$ -транзисторов И<sup>2</sup>Л элементов по напряжению „прокола“ базы

© С.В. Шутов, А.Н. Фролов, В.Н. Литвиненко, А.А. Фролов

Институт физики полупроводников НАН Украины,  
03028 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 16 апреля 2003 г.)

Предложен и экспериментально проверен метод определения толщины базовых областей  $n-p-n$ -транзисторов И<sup>2</sup>Л элементов по заданному напряжению „прокола“ базы. Изготовлены и исследованы И<sup>2</sup>Л элементы.

При разработке конструкции и технологии схем с инжекционным питанием, а также при контроле качества в процессе производства возникает необходимость в оценке толщины базовых областей транзисторов. Одним из методов такой оценки может быть определение толщины базы по напряжению „прокола“ базы, т.е. по напряжению смыкания области пространственного заряда (ОПЗ) перехода коллектор–база с эмиттером  $U_{\text{кво.с.}}$ .

Напряжение пробоя  $n-p-n$ -транзисторов И<sup>2</sup>Л элементов, включенных по схеме с общим эмиттером  $U_{\text{кво.}}$ , как и любых биполярных транзисторов, определяется меньшим из значений напряжения лавинного пробоя  $U_{\text{кво.а.}}$  или напряжения „прокола“ базы  $U_{\text{кво.с.}}$ . Величина  $U_{\text{кво.а.}}$  в общем случае определяется выражением [1]

$$U_{\text{кво.а.}} = \frac{U_{\text{кбо}}}{\sqrt[n]{B_N + 1}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{кбо}}$  — напряжение лавинного пробоя  $p-n$ -перехода коллектор–база;  $B_N$  — коэффициент усиления;  $n$  — показатель степени, зависящий от вида структуры.

Напряжение „прокола“ базы  $U_{\text{кво.с.}}$ , при котором ширина ОПЗ становится равной толщине базы ( $W_{\text{бо}}$ ) по металлургическим границам эмиттерного и коллекторного переходов, определяется выражением [2]

$$U_{\text{кво.с.}} = \frac{W_{\text{бо}}^2 e N_b}{2 \varepsilon \varepsilon_0} - \varphi_{\text{кк}}, \quad (2)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $N_b$  — концентрация примеси в базе транзистора,  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная полупроводникового материала,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\varphi_{\text{кк}}$  — контактная разность потенциалов на коллекторном переходе.

Если концентрация примеси в базе равномерна, то определение напряжения „прокола“ базы не вызывает затруднений. Также просто в этом случае определяется толщина базы при контроле процесса производства, или ограничение на минимальную толщину базы  $W_{\text{бomin.}}$  при конструировании структур транзисторов по заданному пробивному напряжению  $U_{\text{кво.}}$ , для чего используется выражение

$$W_{\text{бomin.}} = \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 (U_{\text{кво.}} + \varphi_{\text{кк}})}{e N_b}}. \quad (3)$$

Однако в типовой технологии И<sup>2</sup>Л структур и в микросхемах по совмещенным технологиям „Биполярная–И<sup>2</sup>Л“ базовые области  $n-p-n$ -структур формируются путем внедрения примеси ионным легированием или диффузионной загонкой с последующей высокотемпературной разгонкой. В этом случае распределение примеси в базе имеет экспоненциальный характер. Поэтому возникают трудности при использовании выражений (2) и (3), так как необходимо использовать некоторое усредненное значение концентрации примеси в базе  $N_b^*$ , лежащее между значениями концентрации примеси на  $p-n$ -переходах эмиттер–база и коллектор–база [3].

Для создания элементов И<sup>2</sup>Л структур наиболее часто применяется типовая технология, используемая для формирования дрейфовых  $n-p-n$ -транзисторов биполярных микросхем. Такая технология хорошо отработана и не требует существенных изменений при создании микросхем по совмещенным технологиям „Биполярная–И<sup>2</sup>Л“. В этом случае  $n-p-n$ -транзистор И<sup>2</sup>Л элемента можно рассматривать как обычный биполярный дрейфовый  $n-p-n$ -транзистор, но работающий в инверсном включении, когда эмиттер биполярного транзистора играет роль коллектора, а коллектор — роль эмиттера. Поэтому концентрацию примеси на  $p-n$ -переходе эмиттер–база биполярного транзистора  $N_{\text{еб}}$  можно обозначить как  $N_{\text{кби}}$  для И<sup>2</sup>Л элемента (концентрация примеси на  $p-n$ -переходе коллектор–база при инверсном включении), а концентрацию  $N_{\text{кб}}$  — как  $N_{\text{еби}}$ .

Известная методика определения напряжения „прокола“ базы [4] для инверсного включения биполярного транзистора требует решения трансцендентного уравнения, которое имеет вид

$$\left(1 + \frac{\Delta_K}{L_a}\right) \exp\left(\frac{-\Delta_K}{L_a}\right) = 1 - \frac{(\varphi_{\text{кк}} - U_{\text{кво.с.}})}{U_0 \exp\left(\frac{\Delta_K}{L_a}\right)}, \quad (4)$$

где  $L_a$  — характеристическая длина акцепторов в базе;  $\Delta_K$  — ширина слоя ОПЗ;  $U_0$  — расчетное напряжение, определяемое выражением [4]

$$U_0 = \frac{e N_{\text{еби}} L_a^2}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (5)$$

Решение трансцендентного уравнения само по себе более трудоемкое, чем прямые расчеты. Кроме того, это

требует предварительного определения толщины базы для вычисления значения  $L_a$ , что затрудняет применение выражения (4) для оценки толщины базы по напряжению „прокола“ базы. Теоретические расчеты также показывают ограниченное применение данного выражения для расчетов, особенно в случаях, когда концентрации примесей на  $p-n$ -переходах отличаются не более чем в (2–3) раза.

Наиболее удобным для прямых и обратных расчетов толщины базы и напряжения „прокола“ базы являются выражения (2) и (3), для которых требуется определить только концентрацию  $N_b^*$ . Для дрейфовых биполярных транзисторов такая концентрация определяется выражением [3]

$$N_b^* = \exp\{\ln(N_{kb}N_{eb})/[2 - \ln(N_{eb}/N_{kb})/2 \ln N_{eb}]\}. \quad (6)$$

Учитывая, что напряжения „прокола“ базы в прямом включении выше, чем в инверсном, наиболее простым способом применения выражения (6) для инверсного включения биполярного транзистора является изменение знака после 2 с (–) на (+). Это уменьшает среднюю концентрацию в базе и соответствующее напряжение „прокола“ базы, дает хорошо объясняемую зависимость и хорошее совпадение с экспериментальными значениями при малой толщине базы, а также при небольшом различии в концентрациях примеси на эмиттерном и коллекторном  $p-n$ -переходах, т.е. в тех условиях, которые и применяются для создания  $I^2L$  структур. Однако, как показывают расчеты, при увеличении толщины базы и возрастании отношения концентраций теоретические значения напряжения „прокола“ и средней концентрации в базе имеют тенденцию к уменьшению, что противоречит экспериментальным данным. Выражения для оценки ширины ОПЗ, приведенные в [4], показывают, что если ОПЗ распространяется от высокой концентрации в сторону низкой концентрации (инверсное включение), в расчетное выражение вводится дополнительный множитель по сравнению со случаем, когда ОПЗ распространяется от низкой концентрации к высокой. Соответственно этот множитель должен сказаться на выражении для оценки средней концентрации в базе при инверсном включении введением не только знака + вместо знака –, но и дополнительных корректирующих коэффициентов.

С целью определения средней концентрации в базе  $n-p-n$ -транзистора  $I^2L$  элемента (или для инверсного включения биполярного транзистора) были проведены исследования зависимости напряжения „прокола“ базы от параметров конструкции  $n-p-n$ -транзисторов  $I^2L$  элементов.  $I^2L$  элементы формировались на кремниевых однослойных эпитаксиальных структурах (КЭФ) 76(6КЭФ0.4/380ЭКЭС0.01) (пластины 1–5), а также на кремниевых однослойных эпитаксиальных структурах 76(7.5КЭФ1.2/380ЭКЭС0.01) (пластины 6–8), полученных по методике [5].

Базовые области всех пластин формировались одинаково — путем ионного легирования бором дозой

$15 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  и высокотемпературной разгонки примеси при температуре  $1150^\circ\text{C}$  в течение 75 min. Коллекторные области создавались путем одностадийной диффузии фосфора при температуре  $1040^\circ\text{C}$ , что обеспечивало минимальное влияние на характер распределения примеси в области базы и практически не влияло на величину глубины залегания  $p-n$ -перехода эмиттер–база  $X_{jebi}$ . Различной толщины коллекторов  $X_{jkbi}$  добивались за счет изменения параметров активной стадии диффузии фосфора. Диффузия фосфора в пластину 6 проводили одновременно с пластиной 1, в пластину 7 — одновременно с 3, а в пластину 8 — одновременно с 5, что обеспечивало одинаковые концентрации примеси на  $p-n$ -переходе коллектор–база и одинаковые толщины коллекторных слоев в каждой паре пластин. В контрольных модулях каждой пластины методом шар–шлифа определялись глубины залегания  $p-n$ -переходов коллектор–база  $X_{jkbi}$  и эмиттер–база  $X_{jebi}$ , а затем рассчитывалась толщина базы  $W_{bo}$  как разность этих глубин.

После формирования базовых и коллекторных диффузионных областей методом фотолитографии открывались контактные окна и проводились измерения коэффициентов усиления по току  $B_{Ni}$ , напряжения пробоя  $n-p-n$ -транзистора  $I^2L$  элемента  $U_{keoi}$ , а также определялось напряжение аппроксимации или напряжение Эрли  $U_{Ei}$  по проекции наклонов выходных ВАХ на ось напряжений. Усредненные по каждой пластине результаты измерений параметров, глубин залегания  $p-n$ -переходов и толщины базы  $W_{bo}$  приведены в табл. 1. По известным технологическим режимам и определенным значениям глубин  $p-n$ -переходов были рассчитаны концентрации примеси на  $p-n$ -переходах эмиттер–база  $N_{ebi}$  и коллектор–база  $N_{kbi}$ . Эти значения также помещены в табл. 1.

При анализе полученных значений  $U_{keoi}$ , приведенных в табл. 1, установлено, что на пластинах с высокими значениями коэффициентов усиления значения  $U_{keoi}$  довольно близки с напряжением Эрли  $U_{Ei}$ , а на пластинах с пониженными коэффициентами усиления значения  $U_{keoi}$  ниже, чем значения  $U_{Ei}$ . Это объясняется тем, что

**Таблица 1.** Экспериментальные значения размеров диффузионных областей, концентраций на  $p-n$ -переходах и электрических параметров  $n-p-n$ -транзисторов  $I^2L$  элементов

№ пластины	Измеренные значения					
	$B_{Ni}$	$U_{keoi}$ , V	$U_{Ei}$ , V	$X_{jkbi}$ , $\mu\text{m}$	$X_{jebi}$ , $\mu\text{m}$	$W_{bo}$ , $\mu\text{m}$
1	234	1.3	1.2	1.51	1.84	0.33
2	155	2.4	2.4	1.45	1.86	0.41
3	98	4.3	4.1	1.37	1.85	0.48
4	65	5.6	6.6	1.29	1.85	0.56
5	53	5.8	9.1	1.24	1.84	0.6
6	95	2.9	2.7	1.51	2.12	0.61
7	54	5.7	6.2	1.37	2.1	0.73
8	35	6.2	12.8	1.24	2.1	0.86

Таблица 2. Результаты расчета

№ пластины	Расчетные значения		Расчет $N_{bi}^*$ по (7), $cm^{-3}$	Расчет $W_{bo}$ по (2), $\mu m$
	$N_{kbi}$ , $cm^{-3}$	$N_{ebi}$ , $cm^{-3}$		
1	$6 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^{16}$	$2.21 \cdot 10^{16}$	0.334
2	$7.5 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^{16}$	$2.44 \cdot 10^{16}$	0.406
3	$1 \cdot 10^{17}$	$1.3 \cdot 10^{16}$	$2.766 \cdot 10^{16}$	0.475
4	$1.35 \cdot 10^{17}$	$1.3 \cdot 10^{16}$	$3.45 \cdot 10^{16}$	0.548
5	$1.6 \cdot 10^{17}$	$1.3 \cdot 10^{16}$	$3.78 \cdot 10^{16}$	0.607
6	$6 \cdot 10^{16}$	$4.7 \cdot 10^{16}$	$1.32 \cdot 10^{16}$	0.579
7	$1 \cdot 10^{17}$	$4.7 \cdot 10^{15}$	$1.768 \cdot 10^{16}$	0.712
8	$1.6 \cdot 10^{17}$	$4.7 \cdot 10^{15}$	$2.356 \cdot 10^{16}$	0.863

явления „прокола“ базы при инверсном включении наблюдаются при малых ее толщинах, а снижение коэффициентов усиления предполагает возрастание толщины базы, до величины, при которой основным механизмом пробоя является уже не „прокол“ базы, а лавинное размножение носителей. Прямое измерение напряжения „прокола“ при лавинном механизме пробоя невозможно, но, согласно [6], напряжение „прокола“ базы и напряжение Эрли определяются одним и тем же выражением. Это условие сохраняется как для прямого, так и для инверсного включения биполярного транзистора. Поэтому для оценки толщины базы всегда можно использовать экспериментально определяемое напряжения Эрли. На основании аналитической обработки экспериментальных результатов было получено выражение для определения средней концентрации примеси в базе дрейфового транзистора в инверсном включении

$$N_{bi}^* = \exp\{\ln(N_{kbi}N_{ebi}) \times [\ln N_{kbi} / \ln N_{ebi}]^2 / [(2 + 4.5 \ln(N_{kbi}/N_{ebi})) \times \sqrt{\ln N_{ebi} / \ln N_{kbi} / \ln N_{ebi}}]\}. \quad (7)$$

Это выражение можно предложить как для определения толщины базы транзистора в инверсном включении по известному напряжению „прокола“ и напряжению Эрли или для расчета напряжения „прокола“ при известной толщине базы. В случае применения бездрейфовой структуры транзистора, при которой  $N_{kbi} = N_{ebi} = N_b$  выражение (7) дает результат  $N_{bi}^* = N_b$ . Результат расчета  $N_{bi}^*$  и определенные по выражению (3) значения  $W_{bo}$  с использованием величин  $N_{bi}^*$ , рассчитанных по формуле (7), приведены в табл. 2.

Сравнение величин  $W_{bo}$ , приведенных в табл. 1 и 2 показывает, что расхождение в значениях не превышает нескольких процентов, что не превышает погрешности измерения глубин диффузионных слоев методом шаршлифа. Таким образом, при использовании выражения (7) и напряжения Эрли  $U_{Ei}$  выражение (3) позволяет оценить толщину базы как дрейфовых, так и бездрейфовых транзисторов в инверсном включении независимо от

механизмов, определяющих пробой транзистора. А учитывая, что  $n-p-n$ -транзисторы И<sup>2</sup>Л элементов практически представляют собой биполярные транзисторы в инверсном режиме работы, то такую методику расчета целесообразно применять и для И<sup>2</sup>Л элементов.

## Список литературы

- [1] Гребен А.Б. Проектирование аналоговых интегральных схем. М.: Энергия, 1976. 235 с.
- [2] Трутко А.Ф. Методы расчета транзисторов. М.: Энергия, 1971. 272 с.
- [3] Марончук И.Е., Фролов А.Н., Шутов С.В. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2001. № 11. С. 66–70.
- [4] Аваев Н.А., Дулин В.Н., Наумов Ю.Е. Большие интегральные схемы с инжекционным питанием. М.: Сов. радио, 1977. 248 с.
- [5] Самойлов Н.А., Фролов А.Н., Шутов С.В. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 10. С. 136–137.
- [6] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 456 с.