

## ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ В ЭМИТТЕРЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДРЕЙФОВЫХ *n-p-n*-ТРАНЗИСТОРОВ

© *Н.А.Самойлов, А.Н.Фролов, С.В.Шутов*

Величина концентрации примеси в зоне эмиттерного перехода ( $N_{\text{рп}}$ ) существенно влияет на электрические параметры дрейфовых транзисторов. Повышение  $N_{\text{рп}}$  позволяет увеличить ускоряющее поле в базе транзистора и уменьшить ее толщину при одинаковых напряжениях прокола (или смыкания) базы, что улучшает частотные и усиительные свойства транзисторов. С другой стороны, возрастание концентрации примеси в зоне эмиттерного перехода приводит к уменьшению напряжения пробоя эмиттер-база ( $U_{\text{проб}}$ ). В этой связи для получения оптимального сочетания основных электрических параметров транзисторов (пробивные напряжения, коэффициент усиления, предельная частота) при проектировании необходимо предварительно определить концентрацию примеси  $N_{\text{рп}}$ .

Как правило, концентрация базовой примеси в плоской части эмиттерного перехода лежит в пределах  $(1-100) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [1]. В интервале концентраций  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \leq N_{\text{рп}} \leq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  напряжение пробоя эмиттер-база  $U_{\text{проб}}$  связано с концентрацией базовой примеси в эмиттере выражением [2]:

$$U_{\text{проб}} = \frac{2.7 \cdot 10^{12}}{\sqrt[3]{N_{\text{рп}}^2}}, \quad (1)$$

т. е.

$$N_{\text{рп}} = \sqrt{\left(\frac{2.7 \cdot 10^{12}}{U_{\text{проб}}}\right)^3}. \quad (2)$$

Таким образом, при проектировании транзистора с заданным напряжением пробоя из выражения (2) может быть оценена концентрация базовой примеси в зоне эмиттерного перехода. Однако в интервале концентраций  $N_{\text{рп}}$  от  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (при этой концентрации происходит смена механизмов пробоя: до концентрации  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ )

Экспериментальные данные и расчетные значения  $U_{\text{проб}}$  и  $N_{\text{рп}}$ , полученные при использовании откорректированных формул (5) и (6)

Экспериментальные данные		Расчетные данные		Погрешность, %	
$N_{\text{рп}}, \text{см}^{-3}$	$U_{\text{проб}}, \text{В}$	$N_{\text{рп}}, \text{см}^{-3}$	$U_{\text{проб}}, \text{В}$	$N_{\text{рп}}$	$U_{\text{проб}}$
$1 \cdot 10^{15}$	$270 \pm 10$	$9.99 \cdot 10^{14}$	270.3	0.1	0.11
$2 \cdot 10^{15}$	$170 \pm 99$	$1.996 \cdot 10^{15}$	170.5	0.2	0.32
$5 \cdot 10^{15}$	$90 \pm 4$	$4.983 \cdot 10^{15}$	92.55	0.34	3.27
$1 \cdot 10^{16}$	$58 \pm 3$	$9.945 \cdot 10^{15}$	58.94	0.55	1.62
$2 \cdot 10^{16}$	$38 \pm 2$	$1.983 \cdot 10^{16}$	37.62	0.27	1.0
$5 \cdot 10^{16}$	$20 \pm 1.5$	$4.947 \cdot 10^{16}$	21.20	1.06	6.0
$1 \cdot 10^{17}$	$13.6 \pm 1$	$9.927 \cdot 10^{16}$	14.15	0.73	4.83
$2 \cdot 10^{17}$	$9.9 \pm 0.5$	$2.013 \cdot 10^{17}$	9.880	0.63	2.02
$5 \cdot 10^{17}$	$7 \pm 0.4$	$5.220 \cdot 10^{17}$	6.803	4.47	2.86
$1 \cdot 10^{18}$	$5.7 \pm 0.3$	$1.068 \cdot 10^{17}$	5.616	6.75	1.47
$2 \cdot 10^{18}$	$4.9 \pm 0.2$	$2.067 \cdot 10^{18}$	4.973	4.37	1.49

основным механизмом пробоя является лавинный, а при более высоких значениях концентраций — туннельный [3]) использование выражения (2) не позволяет оценить концентрацию  $N_{\text{рп}}$  с необходимой для проектирования точностью. Для более точного описания зависимости  $N_{\text{рп}}$  от  $U_{\text{проб}}$  необходимо ввести корректировочные коэффициенты таким образом, чтобы формулы (1) и (2) стали универсальными для широкого интервала концентраций.

Анализ экспериментальных данных зависимости  $N_{\text{рп}} = f(U_{\text{проб}})$  показал, что необходимая точность для расчета параметров транзисторов может быть достигнута при заменах в формуле (1) величины  $N_{\text{рп}}$  на некоторую величину  $N_{\text{рп}}^*$  и в формуле (2)  $U_{\text{проб}}$  на  $U_{\text{проб}}^*$ , причем

$$N_{\text{рп}}^* = \frac{N_{\text{рп}}}{1 + \frac{N_{\text{рп}}}{A}}, \quad (3)$$

$$U_{\text{проб}}^* = U_{\text{проб}} - \frac{B}{(U_{\text{проб}})^\alpha}. \quad (4)$$

Здесь  $\alpha = 0.72$ ,  $B = 10$ ,  $A = 5 \cdot 10^{17}$  в диапазоне концентраций  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \leq N_{\text{рп}} \leq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, с учетом (3)

и (4) выражения (1) и (2) преобразуются к виду

$$U_{\text{проб}} = \frac{2.7 \cdot 10^{12}}{\sqrt[3]{\left(\frac{N_{\text{рп}}}{1 + \frac{N_{\text{рп}}}{5 \cdot 10^{17}}}\right)^2}}, \quad (5)$$

$$N_{\text{рп}} = \sqrt{\left(\frac{2.7 \cdot 10^{12}}{U_{\text{проб}} - \frac{10}{U_{\text{проб}}^{0.72}}}\right)^3}.$$

Экспериментальные данные и расчетные значения  $N_{\text{рп}}$  и  $U_{\text{проб}}$  приведены в таблице.

Сравнение экспериментальных результатов с расчетом показывает, что при проектировании дрейфовых  $n-p-n$ -транзисторов предложенные откорректированные формулы (5) и (6) позволяют оценить значение концентрации базовой примеси в зоне эмиттера  $N_{\text{рп}}$  и пробивное напряжение эмиттер-база с точностью до 10%.

#### Список литературы

- [1] Федотов Я.А. Кремниевые планарные транзисторы. М.: Сов. радио, 1973. 336 с.
- [2] Гребен А.Б. Проектирование аналоговых интегральных схем. М.: Энергия, 1976. 435 с.
- [3] Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. 630 с.

Поступило в Редакцию  
30 ноября 1995 г.