

Влияние профиля легирования на пробивные напряжения коллекторного перехода в планарных $n-p-n$ -транзисторах

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

Херсонский индустриальный институт,
325008 Херсон, Украина

(Поступило в Редакцию 13 октября 1997 г.)

Изготовлены планарные $n-p-n$ -транзисторы с различными профилями распределения базовой примеси и изучены их электрические параметры. На основании анализа экспериментальных данных предложено выражение для расчета напряжения пробоя перехода коллектор–база. Показано, что применение плавного $p-n$ -перехода приводит к увеличению значений пробивных напряжений коллекторных переходов планарных $n-p-n$ -транзисторов.

Надежность работы биполярных транзисторов, в том числе и планарных, определяется предельно допустимыми (пробивными) напряжениями $U_{em.b.0}$, $U_{c.b.0}$, $U_{c.em.0}$. Взаимосвязь $U_{c.em.0}$ и пробивного напряжения коллекторного перехода по лавинному механизму пробоя $U_{c.b.0}$ определяется выражением [1]

$$U_{c.em.0} = \frac{U_{c.b.0}}{\sqrt[m]{B_N + 1}}, \quad (1)$$

где B_N — коэффициент усиления по току для транзистора, включенного в схему с общим эмиттером; $m = 4$ для $n-p-n$ -транзисторов.

При проектировании транзисторов значения пробивных напряжений рассчитываются с учетом радиуса кривизны диффузионной области [2]. Если принять этот радиус равным глубине залегания коллекторного $p-n$ -перехода, то формула расчета пробивного напряжения планарного перехода коллектор–база цилиндрической формы примет вид

$$U_{c.b.0} = \frac{U_m \cdot x_{j\sigma}}{Z_{pn}} \left[\sqrt{2Z_{pn}/x_{j\sigma} + 1} - 1 \right]. \quad (2)$$

Здесь U_m — пробивное напряжение плоской части $p-n$ -перехода, обусловленное удельным сопротивлением высокоомной части коллектора при $U = U_m$.

Повышения величины $U_{c.b.0}$ достигают при использовании нескольких конструктивно-технологических способов: применение охранного кольца [3], расширенного

базового контакта, мезаструктур, делительных колец [4] и др. В частности, существенное влияние на величину пробивного напряжения оказывает характер распределения легирующей примеси при формировании $p-n$ -перехода.

Для установления зависимости величины пробивного напряжения $U_{c.b.0}$ от способа создания коллекторного $p-n$ -перехода были сформированы транзисторные структуры на трех типоминимальных $n-n^+$ -эпитаксиальных структур с различными значениями толщин и удельных сопротивлений эпитаксиальных слоев ($\rho = 2.4 \Omega \cdot \text{cm}$, $d = 12 \mu\text{m}$, $\rho = 3.5 \Omega \cdot \text{cm}$, $d = 16 \mu\text{m}$, $\rho = 4.5 \Omega \cdot \text{cm}$, $d = 20 \mu\text{m}$). Структуры выращивали газовой эпитаксией на подложках 350 ЭКЭС 0.01 ориентации (111) с использованием моносилана (SiH_4) в качестве кремнийсодержащего реагента (гидридный процесс). В качестве источника легирующей примеси был использован фосфин (PH_3). По сравнению с традиционным гидридным процессом, подробно описанным в [5], в данном случае нами использован один блокирующий автодиффузию из подложки высокоомный слой толщиной $0.5-0.6 \mu\text{m}$, который выращивался при $T = 1180^\circ\text{C}$. После этого осуществлялось снижение температуры и при $T = 1040-1060^\circ\text{C}$ производилось наращивание легированного слоя заданной толщины. Такой подход позволил добиться однородного распределения примеси по толщине эпитаксиальных слоев полученных типоминимальных структур.

Экспериментальные параметры и расчетные значения $U_{c.b.0}$ переходов коллектор–база планарных $n-p-n$ -транзисторов

Удельное сопротивление ЭС, $\Omega \cdot \text{cm}$	Доза имплантации, $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	Глубина $p-n$ -перехода $x_{j\sigma}$	Значения $U_{c.b.0}$, В		Величина κ
			расчет	эксперимент	
4.5	450	4.25	117.5	123–126	1.029
	4	4.25	117.5	226–231	1.92
3.5	450	4.1	98.7	100–104	1.013
	4	4.1	98.7	190–194	1.93
2.4	450	4.05	89.9	93–95	1.03
	4	3.95	89.8	173–178	1.93

При создании резкого перехода базовая область формировалась имплантацией бора дозой $450 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, а для плавного $p-n$ -перехода доза имплантации составляла $4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. С учетом зависимости $U_{c.b.0}$ от глубины залегания коллекторного перехода (формула (2)) технологические параметры процесса разгонки были рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить одинаковую величину $x_{j\sigma}$ как для резкого, так и для плавного $p-n$ -перехода. Эмиттерные области во всех случаях создавались диффузией фосфора при температуре 1040°C . Определение коэффициентов усиления B_N и пробивных напряжений $U_{c.em.0}$ производилось на измерителе характеристик полупроводниковых приборов Л2-56. Напряжение $U_{c.b.0}$ рассчитывалось из экспериментально определенных значений B_N и $U_{c.em.0}$ по формуле (1). Такой подход связан с тем, что ОПЗ коллектора в случаях плавных $p-n$ -переходов существенно шире, чем в резких, и непосредственно измеренное значение $U_{c.b.0}$ может быть обусловлено не лавинным пробоем, а пробоем, связанным со смыканием коллекторной ОПЗ с низкоомной подложкой [2]. Экспериментальные данные и расчетные значения (по формуле (2)) приведены в таблице.

Наряду с хорошим совпадением результатов расчета и эксперимента для случая резких $p-n$ -переходов данные таблицы свидетельствуют об увеличении экспериментально наблюдаемых значений $U_{c.b.0}$ по сравнению с расчетом для плавных $p-n$ -переходов. Несоответствие экспериментально определенных значений $U_{c.b.0}$ с рассчитанными по выражению (2) в случае плавных $p-n$ -переходов связано с тем, что в (2), вообще говоря, отсутствуют параметры, описывающие плавный переход, т.е. характер распределения базовой примеси. Таким образом, выражение (2) применимо для расчета $U_{c.b.0}$ резких переходов. Введем поправочный коэффициент \varkappa и перепишем (2) в следующем виде:

$$U_{c.b.0} = \frac{\varkappa \cdot U_{nn} \cdot x_{j\sigma}}{Z_{pn}} \left[\sqrt{2Z_{pn}/x_{j\sigma} + 1} - 1 \right], \quad (3)$$

где \varkappa — коэффициент повышения пробивных напряжений, равный отношению экспериментально определенного значения $U_{c.b.0}$ к рассчитанному по формуле (2).

Значения \varkappa также приведены в таблице. Очевидно, что в случае резких $p-n$ -переходов $\varkappa \approx 1$ и выражение (3) совпадает с (2). Величина \varkappa остается неизменной в диапазоне удельных сопротивлений эпитаксиального слоя (ЭС) $2.4-4.5 \Omega \cdot \text{cm}$ и не зависит от толщины используемого ЭС в интервале толщин $12-20 \mu\text{m}$.

Полученные результаты показывают, что применение плавных $p-n$ -переходов может быть использовано для повышения пробивных напряжений $U_{c.b.0}$ биполярных планарных транзисторов. Для выяснения взаимосвязи коэффициента повышения пробивных напряжений \varkappa с другими параметрами $n-p-n$ -транзисторов необходимы дополнительные исследования.

Список литературы

- [1] Гребен А.В. Проектирование аналоговых интегральных схем. М.: Энергия, 1976. 435 с.
- [2] Sze S.M., Gibbons G. // Sol. St. Electron. 1966. Vol. 9. N 9. P. 831–845.
- [3] Goetzberger A., McDonald B., Haitz R.H., Scarlett R.M. // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. N 6. P. 1591–1600.
- [4] Kao L.C., Wolley E.D. // Proc. IEEE. 1967. Vol. 55. N 6. P. 1409–1414.
- [5] Харченко В.В. Получение эпитаксиальных структур кремния с контролируемым примесным профилем. Ташкент: ФАН, 1989. 168 с.