

Исследование технологических процессов изготовления мощных высоковольтных биполярных транзисторов с решеткой включений в коллекторной области

© Н.И. Волокобинская[¶], И.Н. Комаров, Т.В. Матюхина, В.И. Решетников,
А.А. Руш, И.В. Фалина, А.С. Ястребов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
191186 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 3 июля 2000 г. Принята к печати 16 января 2001 г.)

Исследованы технологические процессы, происходящие в полупроводниковых структурах при изготовлении транзисторов, содержащих новый конструктивный элемент — решетку объемных неоднородностей в коллекторной области, препятствующую развитию вторичного пробоя.

1. Введение

Как показывает теоретический анализ [1], решетка включений в коллекторной области, форма которых близка к сферической, может приводить к более равномерному распределению электрического поля и повышению пробойного напряжения транзисторов, включенных по схеме с общим эмиттером.

При разработке нового транзистора вначале путем теоретического расчета определялись и затем на основе экспериментальных данных уточнялись электрические параметры и геометрические размеры конструктивных элементов прибора: диаметр включений, расстояние между ними и удаление решетки включений от металлургической границы коллекторного $p-n$ -перехода.

Экспериментальные исследования проводились для выяснения и уточнения деталей технологического процесса, включающего операции эпитаксиального наращивания слоев и окисления пластин кремния, так как известно, что в ходе этих операций возникают структурные дефекты, влияющие на пробой коллекторных $p-n$ -переходов [2–6]. Нужно было установить, как влияют размеры включений на плотность дефектов в эпитаксиальном слое, наращиваемом поверх решетки включений.

Вследствие меньшего размера тетраэдрического ковалентного радиуса бора ($R_B = 0.088$ нм), чем кремния ($R_{Si} = 0.117$ нм), легированные бором p^+ -включения в n -коллекторе вызывают появление механических напряжений и генерацию дислокаций несоответствия [7,8], что сопровождается вредными побочными эффектами. Дислокации и дефекты упаковки приводят к снижению пробойного напряжения $p-n$ -переходов электронных приборов.

2. Процессы, сопровождающие формирование решетки включений

Эксперименты показали, что плотность дефектов над включениями заметно возрастает с увеличением размеров включений (рис. 1). Поэтому было необходимо

ограничить размеры включений и выбрать их в таких пределах, при которых плотность дефектов не превышает допустимого значения.

В ходе проведения операций высокотемпературной обработки механические напряжения и сопутствующие им дефекты при большой плотности способствуют испарению бора из сильно легированных областей. Если поверхность включений и полупроводниковой пластины не защищена, то бор испаряется из включений и осаждается по всей поверхности кремниевой пластины; развивается процесс автолегирования бором (см. рис. 2): на пластине с широкими (1) и узкими (2) тестовыми полосками включений они объединяются в сплошной слой (3).

Для предотвращения автолегирования бором и появления значительных механических напряжений имплантация примесей при формировании включений производится сквозь слой окисла кремния через окна в фоторезисте.

После завершения операции имплантации примесей фоторезист удаляется, слой окисла сохраняется, и про-

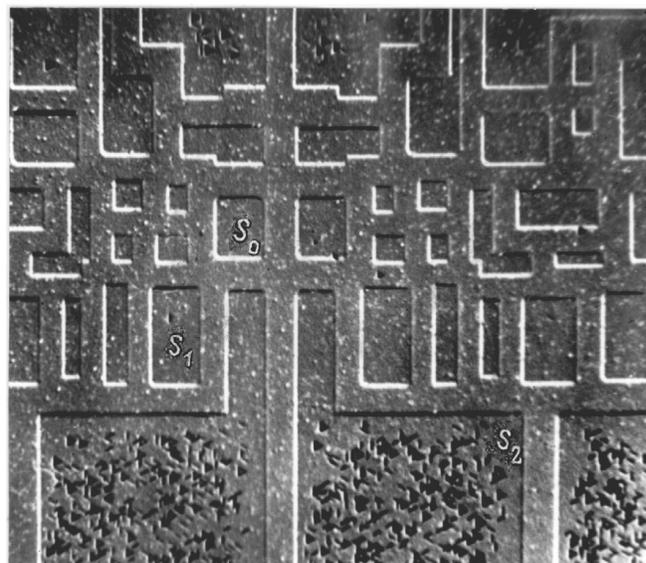


Рис. 1. Тестовая структура с ямками травления в эпитаксиальном слое в плоскости (111), выращенном над включениями различной площади $S_0 < S_1 < S_2$.

[¶] E-mail: volokobin@hotmail.com
Fax: (812) 589 5232

водится высокотемпературная обработка, в ходе которой происходит разгонка примесей. Затем окисел снимается и над включениями эпитаксиально наращивается слой кремния.

Положительные результаты в процессе формирования включений были достигнуты при имплантации примесей через окна размерами 10×10 мкм².

При проведении последующих высокотемпературных технологических операций включения приобретали шаровидную форму. Диаметр включений в готовых транзисторах нового типа составлял ~ 30 мкм.

При небольших размерах включений и малом периоде решетки под каждым из пальцев эмиттера и между ними располагается много включений. В этом можно убедиться, рассмотрев фотографию со следами выхода включений на поверхности транзистора с гребенчатым

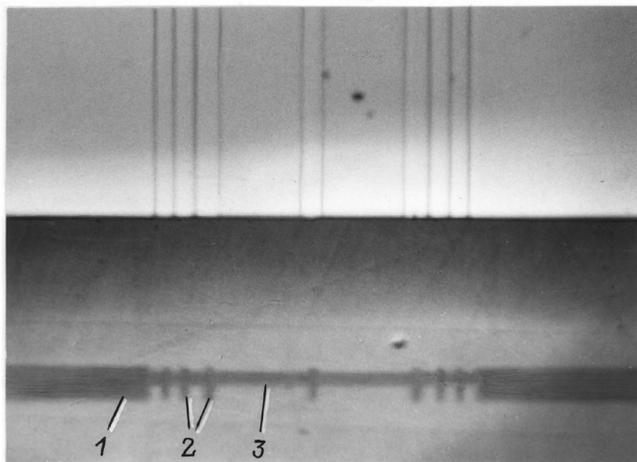


Рис. 2. Косой шлиф тестовой структуры, иллюстрирующий эффект смыкания включений 1 и 2 (в виде полос) в сплошной слой 3 вследствие процесса автолегирования.

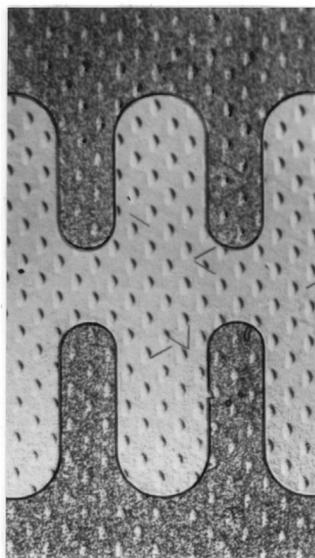


Рис. 3. Участок поверхности транзистора со следами выхода включений.

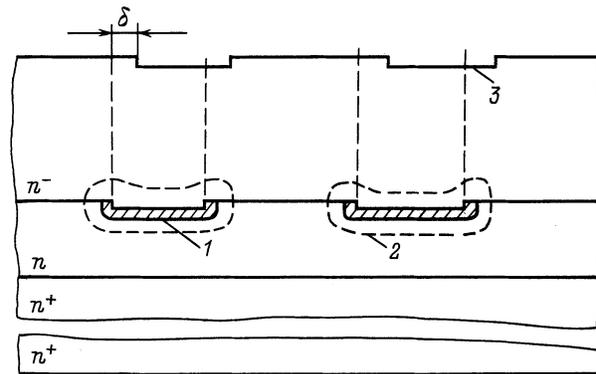


Рис. 4. Схематическое изображение тестовой структуры (в разрезе): 1 — граница p^+ -области после ионной имплантации, удаления слоя окисла и операции отмывки; 2 — граница p^+ -области после эпитаксиального наращивания n^- -слоя; 3 — следы включений на поверхности n^- -слоя.

эмиттером (имеющим светлый оттенок) и окружающей его (более темной) базой (рис. 3).

Небольшие размеры включений позволили упростить процесс изготовления новых транзисторов, исключив операцию расположения узлов решетки относительно пальцев эмиттера. Если бы возникла необходимость совмещения, то сложность состояла бы в том, что наращивание эпитаксиального слоя кремния на плоскости (111) идет не в перпендикулярном этой плоскости направлении [111], а под некоторым углом к нему, и рисунок выхода следов включений на поверхности наращиваемого слоя смещается в кристаллографическом направлении [112] на величину δ , как это представлено на схематическом изображении (рис. 4) тестовой структуры, фотография косоугольного шлифа которой приведена на рис. 2.

Достигнутые результаты позволили разработать конструкцию и технологию изготовления транзисторов новых типов, не приводящую к существенному удорожанию стоимости приборов.

3. Технология изготовления транзисторов с решеткой включений

Приборы модернизированного типа, содержащие решетку включений в коллекторе, изготавливались на эпитаксиальных структурах 74КЭФ50/380ЭКЭС0.01¹ и сопоставлялись по параметрам с транзисторами традиционной конструкции типа КТ841.

Вначале методом диффузионного легирования бором формировалась базовая область с концентрацией бора до 10^{18} см⁻³ и глубиной залегания коллекторного $p-n$ -перехода $X_{jb} = 20$ мкм; затем способом диффузионного легирования фосфором до концентраций фосфора 10^{19} см⁻³ создавался гребенчатый эмиттер с шириной

¹ Обозначения здесь и далее: КЭФ — n -Si, легированный P; ЭКЭС — n -Si, легированный Sb; КДВ (ЭКДВ) — p -Si, легированный B; первое число — толщина в мкм, последнее — удельное сопротивление в Ом · см.

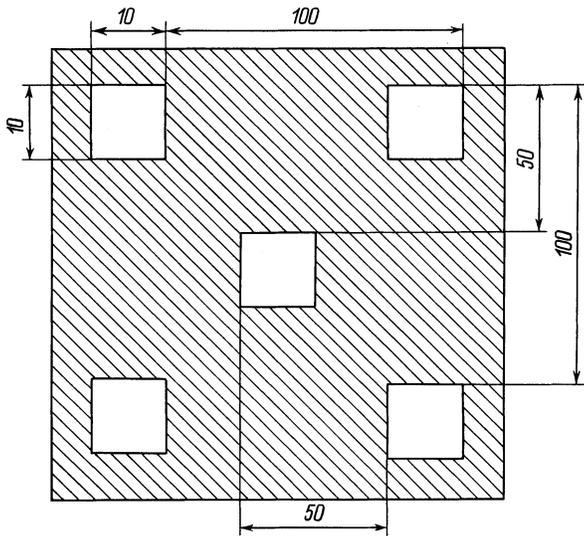


Рис. 5. Фрагмент фотошаблона для формирования решетки включений в коллекторной области. Приведены размеры в мкм; окна показаны не в масштабе.

полос 246 мкм, периметром $P_e = 77.5$ мм, площадью $S_e = 9.425$ мм² и глубиной залегания эмиттерного $p-n$ -перехода $X_{je} = 10$ мкм. После выполнения этих технологических операций толщина слабо легированного слоя коллектора под активной базой составляла ~ 50 мкм, площадь коллектора $S_c = 18.8$ мм².

После выполнения технологических операций по формированию транзисторных структур пластины разрежали на элементы размерами $5.1 \times 5.1 \times 0.226$ мм³.

Кроме того, изготавливались приборы, отличавшиеся от транзисторов типа КТ841 глубиной залегания эмиттерного и коллекторного $p-n$ -переходов и имевшие $X_{je} = 5$ мкм и $X_{jb} = 10$ мкм. Такую же глубину залегания $p-n$ -переходов имели и приборы нового типа с решеткой включений.

Для предотвращения поверхностного пробоя транзисторов на кремниевых пластинах формировались три охранных кольца. Опыты показали, что такое количество колец достаточно, и увеличение их числа не сопровождается повышением напряжения поверхностного пробоя.

При изготовлении транзисторов $n-p-n-(p^+)-n-n^+$ -типа (где (p^+) — обозначение сферических включений в коллекторной области n -типа проводимости) в трех сериях опытов применялись эпитаксиальные структуры: 30КЭФ35/380ЭКЭС0.01, 35КЭФ43/380ЭКЭС0.01, 35КЭФ53/380ЭКЭС0.01.

Поверхность пластин кремния располагалась в плоскости (111).

При изготовлении транзисторов $n-p-n-(p^+)-n$ -типа пластины при температуре 900°C покрывались слоем окисла толщиной 0.17–0.20 мкм, на который наносился слой фоторезиста. Проводилась операция фотолитографии с целью образования в слое фоторезиста окон размерами 10×10 мкм², расположенных в "гранецентрированной" квадратной решетке с периодом 100 мкм; рас-

стояние между центрами ближайших по диагонали окон $L \approx 70$ мкм (рис. 5). На площади в 1 мм² размещалось 200 окон.

Через окна в фоторезисте и сквозь слой окисла на установке "Везувий-5" проводилась имплантация ионов бора с энергией $E = 60$ кэВ и дозой $D = 100$ или 110 мкКл/см². Фоторезист удалялся, и сначала в среде сухого, затем влажного, а затем снова сухого кислорода в течение 120, 60 и 120 мин при температуре 1150°C производилась разгонка бора, причем возникали p^+ -области с глубиной расположения $p-n$ -перехода в пределах от 3 до 5 мкм (рис. 6). Разгонку необходимо вести под слоем окисла во избежание автолегирования бором пластины кремния по всей поверхности и слияния включений.

Слой окисла удалялся, с поверхности пластины стравливался нарушенный слой толщиной 0.02–0.06 мкм, после чего эпитаксиально наращивался слой кремния толщиной 47 мкм с примесью фосфора, имевший удельное сопротивление $\rho = 43$ или 53 Ом·см. В приповерхностном слое структуры формировались база с глубиной расположения $p-n$ -перехода $X_{jb} = 10$ мкм и эмиттер с глубиной расположения $p-n$ -перехода $X_{je} = 5$ мкм. Уменьшение толщины базы и эмиттера по сравнению с их значениями в транзисторе КТ841 вызвано необходимостью сокращения времени высокотемпературной обработки.

При изготовлении транзисторов типа $n-p-n^-(p^+)-n-n^+$ с p^+ -включениями и транзисторов типа $n-p-n^-n-n^+$ без включений с буферным n -слоем и обедненным n^- -слоем в коллекторе применялись эпитаксиальные структуры 30КЭФ10/380ЭКЭС0.01. Слой КЭФ10 использовался в качестве буферного n -слоя.

В приповерхностном слое этих пластин создавались p^+ -включения, над которыми наращивался слой 70КЭФ43. Таким образом, решетка включений располагалась на границе слабо легированного и буферного слоев.

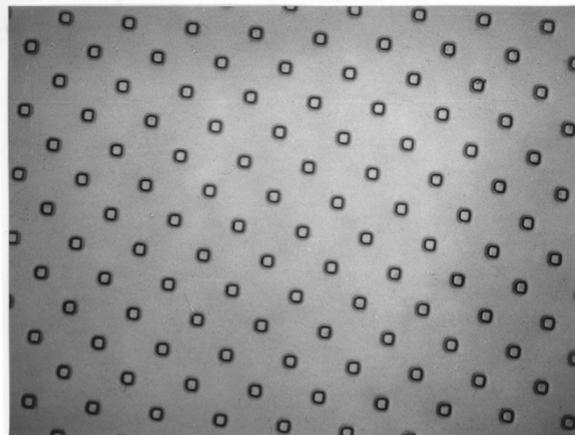


Рис. 6. Вид решетки p^+ -включений, сформированной в слое кремния n -типа проводимости до наращивания эпитаксиального слоя.

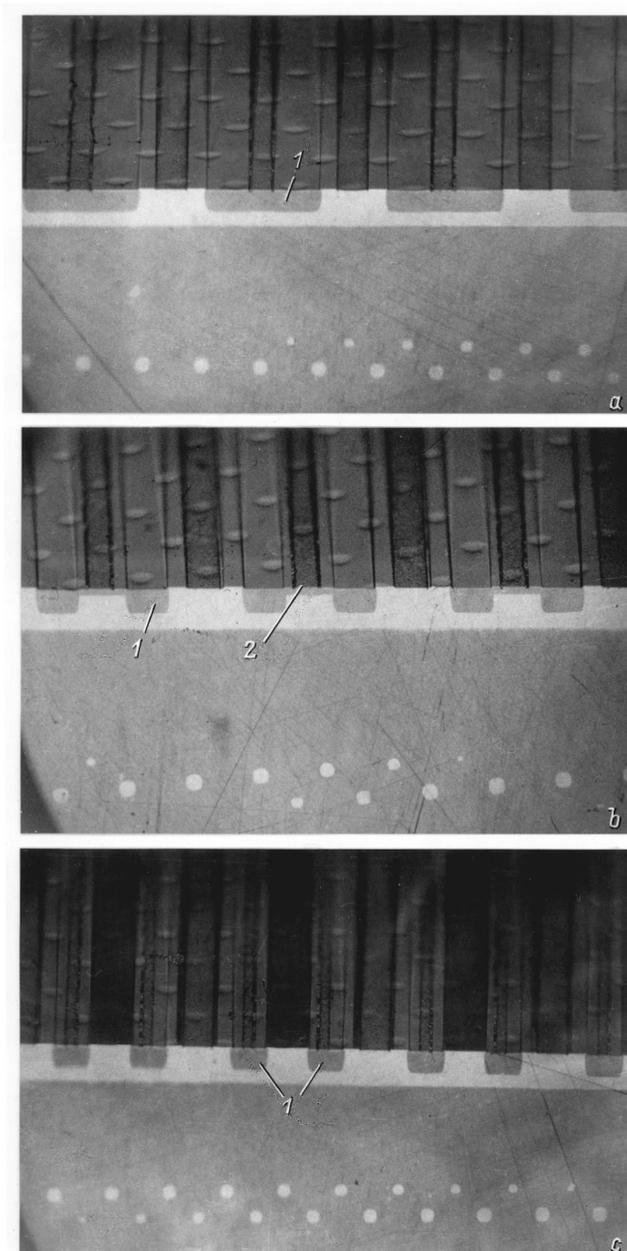


Рис. 7. Фотографии косых шлифов (под углом $9^\circ 20'$ к плоскости поверхности) $p-n-p^-(n^+)-p-p^+$ -транзисторов с эмиттерами различной конструкции. 1 — эмиттер; 2 — слабо легированная или нелегированная центральная часть эмиттера. *a* — транзистор с эмиттером стандартной конструкции; *b* — транзистор с сильно легированной периферической областью (1) и слабо легированной центральной частью эмиттера (2), *c* — транзистор с нелегированной центральной частью эмиттера.

Толщина и удельное сопротивление слабо легированного и буферного слоев транзистора стандартной конструкции на заданное рабочее напряжение и ток коллектора могут быть рассчитаны [9].

В ходе операций высокотемпературной обработки включения приобретали сферическую форму. Диаметр

включений возрастал до 30 мкм, и их сечения в плоскости решетки занимали примерно 14,14% площади коллекторного $p-n$ -перехода.

При изготовлении $p-n-p^-(n^+)-p-p^+$ -транзисторов использовались эпитаксиальные структуры 35КДБ33/16КДБ10/380ЭКДБ0.03.

Через слой окисла и окна в фоторезисте в пластины на установке "Везувий-8" имплантировались ионы сурьмы с энергией $E = 30$ кэВ дозой $D = 30$ мкКл/см². Разгонка сурьмы производилась в течение 2 ч в атмосфере сухого кислорода при температуре 1200°C. После удаления слоя окисла и очистки поверхности пластин на них при температуре 1172°C на установке "Эпиквар-101М" хлоридным методом наращивался эпитаксиальный слой кремния, легированного бором.

Фотографии косых шлифов транзисторов $p-n-p^-(n^+)-p-p^+$ представлены на рис. 7. Все включения расположены в коллекторе в одной плоскости на равном удалении от металлургической границы с базой. В плоскости сечения косого шлифа попали два соседних ряда включений, которые видны на фотографии.

Для улучшения частотных свойств и сохранения их на уровне, характерном для аналогов без включений, транзисторы нового типа с решеткой включений подвергались радиационной обработке α -частицами. Кроме того, были использованы эмиттеры со слабо легированной центральной частью и так называемые "дырчатые" эмиттеры, у которых центральная часть не легируется и, следовательно, не формируется. Косые шлифы транзисторов $p-n-p^-(n^+)-p-p^+$ -типа с эмиттерами разных конструкций приведены на рис. 7.

4. Заключение

Эксперименты подтверждают теоретическое положение о том, что, встраивая решетку включений в коллектор, можно повысить напряжение U_{ce0} до величины, близкой к U_{cb0} , практически сохранив такое же значение U_{cb0} , как у аналогичного прибора без включений [1]. Таким образом, решетки включений в коллекторе целесообразно использовать для повышения напряжения U_{ce0} .

Список литературы

- [1] М.Ю. Волокобинский, И.Н. Комаров, Т.В. Матюхина, В.И. Решетников, А.А. Руш, И.В. Фалина, А.С. Ястребов. ФТП, **35** (3), 245 (2001).
- [2] Л.И. Матюхина, А.И. Пекарев, Ю.Д. Чистяков, Изв. вузов СССР. Радиотехника, **22** (9), 3 (1978).
- [3] В.Н. Тверсков, А.Г. Костогрыз, В.М. Суворов и др. Электрон. техн., сер 6, Материалы, № 3, 35 (1976).
- [4] М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский. Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников (М., Металлургия, 1985).
- [5] А. Зеленев, В. Минбазин. Микроэлектроника, № 3 (57), 15 (1975).
- [6] Ю.А. Малинин, В.А. Твериков и др. Электрон. техн., сер. 6, Материалы, № 2, 55 (1975).

- [7] *Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление. Диффузия. Эпитаксия*, под ред. Р. Бургера, Р. Донована (М., Мир, 1969). [*Fundamentals of silicon integrated device technology*. Vol. 1: *Oxidation, Diffusion and Epitaxy*, ed. by R.M. Burger, R.P. Donovan (Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1967)].
- [8] *Атомная диффузия в полупроводниках*, под ред. Д. Шоу (М., Мир, 1975). [*Atomic diffusion in semiconductors*, ed. by D. Shaw (Plenum Press, London–N.Y., 1973)].
- [9] В.А. Потапчук, М.Ю. Шнейдерман. Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника, № 11 (157), 4 (1983).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of technological processes of manufacturing of the bipolar power high-voltage transistors with a grid of inclusions in the collector region

N.I. Volokobinskaya, I.N. Komarov, T.V. Matioukhina,
V.I. Rechetnikoff, A.A. Rush, I.V. Falina, A.S. Yastrebov

M.A. Bonch-Bruevich State University,
191186 St. Petersburg, Russia

Abstract Processes, in semiconductor structures during the manufacturing of transistors with a new constructive element — the grid of bulk inhomogeneities in the collector region — preventing the second breakdown from occurring are investigated.