

# Мощные высоковольтные биполярные транзисторы на основе сложных полупроводниковых структур

© М.Ю. Волокобинский<sup>1</sup>, 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 4 июля 2000 г.)

Исследованы физические процессы в транзисторах, в которые внесен новый конструктивный элемент — решетка объемных неоднородностей в коллекторной области. Решетка приводит к уменьшению напряженности электрического поля у металлургической границы коллекторного  $p-n$ -перехода и препятствует развитию вторичного пробоя.

## 1. Введение

При разработке транзисторов, используемых в ключевых схемах с индуктивной нагрузкой, необходимо учитывать, что при запираании транзистора в нем или в других специально предусмотренных для этой цели элементах должна выделяться энергия  $W = \tilde{L}I^2/2$ , накопленная в индуктивности  $\tilde{L}$  при протекании перед выключением тока  $I$ . Если при выключении в транзисторе происходит шнурование тока и энергия  $W$  выделяется в малом объеме, то полупроводниковый материал перегревается и происходит разрушение прибора.

В целях предотвращения шнурования тока и повышения напряжения вторичного пробоя привлекаются конструкционные меры, связанные с модификацией строения эмиттера [1].

Рассмотрим возможности борьбы со шнурованием тока и повышения рабочего напряжения транзисторов, включенных по схеме с общим эмиттером, путем введения в коллекторную область плоской решетки объемных овальных неоднородностей, легированных примесями, придающими полупроводнику противоположный тип проводимости, т.е. такой же, какой имеет база.

## 2. Электрическое поле в коллекторном $p-n$ -переходе транзисторов с решеткой объемных неоднородностей в коллекторной области

Для предотвращения шнурования тока и повышения пробивного напряжения ключевых транзисторов, включенных по схеме с общим эмиттером, в коллекторной области на расстоянии  $H$  от металлургической границы  $p-n$ -перехода формируется решетка сильно легированных овальных неоднородностей, форма которых близка к сферической (рис. 1).

В транзисторах  $n-p-n$ -типа создаются  $p^+$ -включения; для решетки используется обозначение  $(p^+)$  в струк-

туре  $n-p-n-(p^+)-n$ -транзистора. Если в транзисторе  $n-p-n^- - n-n^+$ -типа применена решетка с  $p^+$ -включениями, расположенными в коллекторе на границе слабо легированного  $n^-$ -слоя и буферного  $n$ -слоя, то вводится обозначение:  $n-p-n^- - (p^+) - n-n^+$ -транзисторы.

В  $p-n-p^-$  или  $p-n-p^- - p-p^+$ -транзисторах применяется  $(n^+)$ -решетка и получаются  $p-n-p-(n^+) - p^-$  или  $p-n-p^- - (n^+) - p-p^+$ -транзисторы.

Если к коллекторному  $p-n$ -переходу не приложено напряжение или приложено небольшое напряжение, то толщина слоя объемного заряда коллекторного  $p-n$ -перехода мала и изолированные неоднородности могут оказаться за его пределами. В этих случаях каждая  $p^+$ -неоднородность окружена двойным сферическим слоем пространственного заряда (отрицательным внутри включения и примыкающим к нему положительным слоем снаружи включения).

Толщины слоев и распределение в них напряженности электрического поля могут быть рассчитаны [2]. Суммарный заряд двойного слоя равен нулю. Объемная неоднородность не влияет на распределение электрического поля в коллекторе за пределами связанного с ней сферического слоя пространственного заряда.

По мере увеличения запирающего напряжения  $U_{cb}$  толщина слоя объемного заряда  $d$  на резком коллекторном  $p^+-n$ -переходе возрастает:  $d = [2\varepsilon(U_{cb} + U_c)/\rho]^{0.5}$ , где  $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость,

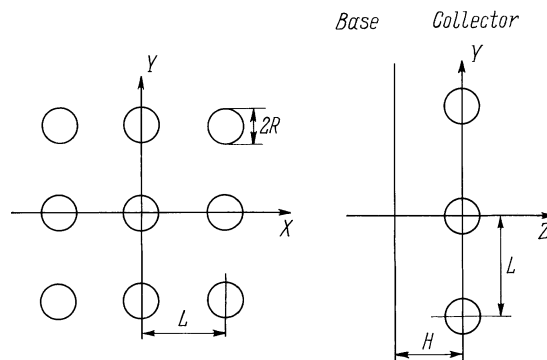
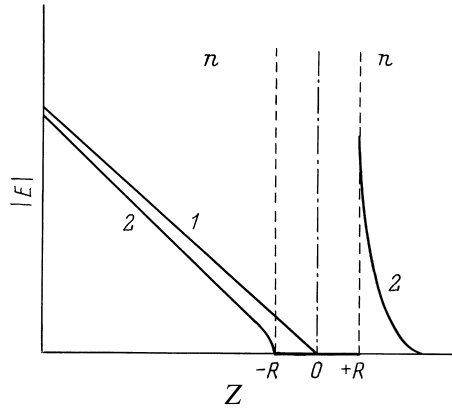


Рис. 1. Решетка включений в коллекторной области транзистора: вид в плоскости прибора (слева) и в разрезе (справа).

<sup>1</sup> Факс: (812) 5895232  
E-mail: volokobin@hotmail.com



**Рис. 2.** Распределение абсолютной величины напряженности электрического поля в слое пространственного заряда без включений (1) и в коллекторном  $p-n$ -переходе, содержащем лишь одно включение радиуса  $R$ , (2) вдоль оси  $Z$ , проходящей через центр включения.

$\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\epsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость,  $U_c$  — контактная разность потенциалов между коллектором и базой,  $\rho = qN_D$  — плотность объемного заряда в коллекторе,  $q$  — элементарный заряд,  $N_D$  — концентрация доноров [3].

При некоторой величине запирающего напряжения слой объемного заряда на коллекторном  $p-n$ -переходе достигает включения. Охватывающий сферу  $p-n$ -переход со стороны, расположенной ближе к базе, открывается, включение заряжается, в результате чего изменяется распределение электрического поля в коллекторе.

Расчет потенциала электрического поля  $\phi$  в слое пространственного заряда коллекторного  $p-n$ -перехода с решеткой неоднородностей в транзисторах  $n-p-n-(p^+)-n$ -типа связан с решением уравнения Пуассона  $\Delta\phi = -\rho/\epsilon$ .

Вначале рассмотрим случай, когда имеется лишь одно сферическое  $p^+$ -включение радиуса  $R$ .

Начало сферической системы координат совместим с центром включения и направим ось  $Z$  от металлургической границы в глубь коллектора (рис. 2). Задача является осесимметричной, и уравнение Пуассона  $\Delta\phi(\rho, \vartheta) = -\rho/\epsilon$  в сферической системе координат принимает вид

$$\frac{1}{r^2} \left( r^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + 2r \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \vartheta^2} + \frac{\cos \vartheta}{\sin \vartheta} \frac{\partial \phi}{\partial \vartheta} \right) = -\rho/\epsilon, \quad (1)$$

где  $r$  — радиальная и  $\vartheta$  — угловая координаты.

При толщине слоя объемного заряда  $d = H + h$ , превышающей размеры включения, при  $H \gg R$  и  $h \gg R$ , уравнению (1) и граничным условиям (постоянное значение  $\phi$  на поверхности включения и равная нулю нормальная к поверхности сферы составляющая напряженности поля

$E_r(r, \vartheta)$  в точке  $r = R$  и  $\vartheta = \pi$ ) удовлетворяет решение [4]

$$\phi = (\rho/\epsilon) [hr \cos \vartheta - (r^2 \cos^2 \vartheta)/2 - (1 + \chi)R^3/3r - (hR^3 \cos \vartheta)/r^2 + R^5(3 \cos^2 \vartheta - 1)/6r^3], \quad (2)$$

где  $\chi = (9h + 5R)/R$ .

Первые два слагаемых в выражении (2) учитывают вклад пространственного заряда, три остальных — влияние сферы, приобретающей под действием электрического поля коллекторного  $p-n$ -перехода заряд

$$Q_0 = -(4\pi/3)R^3\rho\chi. \quad (3)$$

В транзисторах  $n-p-n-(p^+)-n$ -типа  $p^+$ -включения заряжаются отрицательно из-за перехода дырок из них в базу; в транзисторах  $p-n-p-(n^+)-p$ -типа  $n^+$ -включения вследствие ухода в базу электронов заряжаются положительно.

Из (2) можно получить выражение для радиальной составляющей напряженности поля

$$E_r(r, \vartheta) = -(\rho/\epsilon) [h \cos \vartheta - r \cos^2 \vartheta + (1 + \chi)R^3/3r^2 + (2hR^3 \cos \vartheta)/r^3 - R^5(3 \cos^2 \vartheta - 1)/2r^4]. \quad (4)$$

Распределения абсолютной величины напряженности электрического поля  $|E|$  в  $p-n$ -переходе в двух случаях показаны на рис. 2: 1)  $|E|$  в  $p-n$ -переходе без включений; 2) распределение  $|E|$  вдоль оси  $Z$ , проходящей через центр включения, в коллекторном переходе, содержащем лишь одно включение.

В отсутствие включений напряженность электрического поля  $|E|$  линейно изменяется по толщине слоя объемного заряда, достигая максимального значения  $|E_{\max}| = \rho d/\epsilon = 2(U_{cb} + U_c)/d \approx 2U_{cb}/d$  на границе с базой и обращаясь в нуль на границе слоя пространственного заряда в коллекторе.

В  $p-n$ -переходе с включением в результате перераспределения заряда напряженность поля на металлургической границе с базой уменьшается, а у неоднородности на стороне, более удаленной от базы, там, где она была мала, увеличивается. Напряженность  $E(R, 0)$  на поверхности сферы в точке  $r = R$  и  $\vartheta = 0$  в 6 раз превышает величину средней напряженности  $|E_0| = \rho h/\epsilon$ , которая имеет место в точке с координатой центра сферы в отсутствие включений в плоскости  $Z = 0$ .

Во избежание больших значений  $E(R, 0)$  включения располагаются на достаточном удалении от базы; при условии:  $h/d = 1/6$  напряженность  $E(R, 0)$  не превышает величину напряженности  $|E_{\max}|$  на границе с базой в отсутствие включения и, следовательно, формирование неоднородности не приведет к появлению областей, в которых напряженность была бы больше, чем  $|E_{\max}|$ .

Влияние сферической неоднородности на распределение электрического поля существенно лишь на небольших расстояниях от нее, не превышающих нескольких  $R$ . Поэтому, чтобы получить более равномерное

распределение электрического поля по всей площади коллекторного  $p$ - $n$ -перехода, необходимо формировать решетку включений.

В транзисторах с решеткой неоднородностей в коллекторной области в случае  $H \gg L > R > L/6$  и  $h \gg R$  при фиксированной толщине слоя объемного заряда  $d = H + h$  максимальная напряженность электрического поля на металлургической границе с базой уменьшается примерно до  $E_G = \rho H/\varepsilon$ , т.е. до величины, меньшей чем наибольшая напряженность  $|E_{\max}| = \rho d/\varepsilon$  в транзисторе без включений. Правее решетки (рис. 1) величины напряженностей электрического поля вдоль линий, параллельных оси  $Z$ , проходящих на равном удалении от двух ближайших включений или на одинаковом расстоянии между четырьмя соседними включениями, не превосходят значений напряженности электрического поля в тех же точках в отсутствие решетки.

При фиксированной величине запирающего напряжения  $U_{cb}$  распределение напряженности электрического поля левее решетки примерно такое, как и в предыдущем случае, в котором было задано постоянное значение  $d$ . При фиксированной величине  $U_{cb}$  толщина слоя объемного заряда  $d$  в транзисторе с решеткой больше, чем без нее. Решетка, находящаяся на расстоянии  $H$  от базы, приводит к увеличению  $h$  и к перераспределению поля в коллекторе: к уменьшению напряженности левее решетки и к возрастанию напряженности электрического поля правее решетки.

### 3. Пробой транзисторов с решеткой включений

Процесс формирования электронной лавины в коллекторном  $p$ - $n$ -переходе и напряжение пробоя существенно зависят от конструкции биполярного транзистора и схемы его испытания на пробой.

При высоких напряжениях на коллекторном  $p$ - $n$ -переходе включения заряжаются относительно окружающего их коллектора таким образом, что знак заряда на включениях совпадает со знаком заряда основных носителей в коллекторе и эмиттере. Это приводит к двум эффектам.

Во-первых, носители заряда, попадая из эмиттера через базу в коллектор, обходят в нем включения (рис. 3). Таким образом, включения препятствуют стягиванию тока со всей площади коллектора в единый токовый шнур и развитию вторичного пробоя.

Во-вторых, геометрические размеры решетки и физические параметры материалов, образующих структуру транзистора, задаются таким образом, чтобы напряжение пробоя коллектор-база  $U_{cb0}$  при включении транзистора по схеме с общей базой и оборванным эмиттером, практически не изменялось, а напряжение пробоя коллектор-эмиттер  $U_{ce0}$  при включении транзистора по схеме с общим эмиттером и оборванной базой заметно возросло, приближаясь по величине к  $U_{cb0}$ .

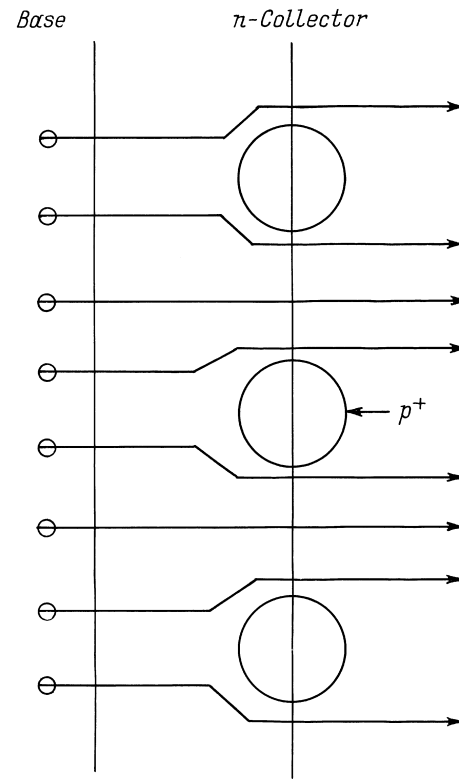
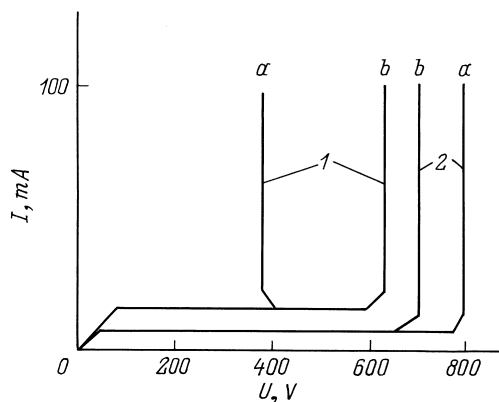


Рис. 3. Коллекторная область  $n$ -типа проводимости с решеткой  $p^+$ -включений и пути движения электронов, обходящих отрицательно заряженные  $p^+$ -включения.

Причина возрастания  $U_{ce0}$  до значения  $U_{cb0}$  состоит в том, что решетка приводит к перераспределению электрического поля.

В транзисторе с решеткой неоднородностей при повышении напряжения, приложенного к коллекторному  $p$ - $n$ -переходу, увеличение напряженности электрического поля на металлургической границе база-коллектор приостанавливается, ее величина остается ниже максимальной напряженности поля в отсутствие включений и недостаточна для формирования лавины. Электроны, проникающие из эмиттера через базу в коллектор, обходят отрицательно заряженные сферы, не попадают в область сильного поля правее включений, не вызывают ионизации, не принимают участия в формировании лавины, и это не приводит к снижению  $U_{ce0}$ . Таким образом, в транзисторах с решеткой включений устраняется указанная Миллером [5] причина различия значений  $U_{ce0}$  и  $U_{cb0}$  в транзисторах традиционной конструкции.

В этом можно убедиться, сопоставляя вольт-амперные характеристики  $I(U)$  транзисторов  $p$ - $n$ - $p^-(n^+)$ - $p^-$ - $p$ - $p^+$ - и  $p$ - $n$ - $p^-$ - $p$ - $p^+$ -типа или  $n$ - $p$ - $n^-(p^+)$ - $n$ - $n^+$ - и  $n$ - $p$ - $n^-$ - $n$ - $n^+$ -типа (рис. 4). У транзисторов с решеткой неоднородностей  $U_{ce0}$  и  $U_{cb0}$  имеют близкие средние значения. У транзисторов без решетки включений величина пробивного напряжения  $U_{ce0}$  меньше, чем  $U_{cb0}$ .



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики транзисторов  $n-p-n^- - n-n^+$ -типа (а) и  $p-n-p^- - p-p^+$ -типа с решеткой включений (б). 1 — включение по схеме с общим эмиттером и оборванной базой, 2 — включение по схеме с общей базой и оборванным эмиттером.

Теоретический анализ показывает и экспериментальные исследования транзисторов нового типа подтверждают, что положительные результаты достигаются лишь при правильно выбранных размерах и расположении неоднородностей. Редко расположенные включения не влияют на распределение напряженности электрического поля вдали от них и поэтому не могут способствовать увеличению пробивного напряжения  $U_{ce0}$  или  $U_{cb0}$ .

Если размеры и расположение включений выбраны неоптимально (неоднородности расположены слишком близко к базе), то это приводит к существенному увеличению напряженности электрического поля у включений, и транзисторы с решеткой имеют более низкое  $U_{cb0}$ , чем аналогичные приборы без решетки.

Изложенные теоретические представления были использованы при разработке конструкции и технологии изготовления транзисторов с решеткой неоднородностей в коллекторной области, особенности которых будут описаны в следующей публикации.

## Список литературы

- [1] А. Блихер. *Физика силовых биполярных и полевых транзисторов* [Пер. с англ., под ред. И.В. Грехова. (Л., Энергоатомиздат, 1986)].
- [2] T.P. Lee, S.M. Sze. *Sol. St. Electron.*, **10**, 1105 (1967).
- [3] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) [Пер. с англ.: S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (N.Y., 1981)].
- [4] М.Ю. Волокобинский, А.С. Ястребов. *ДАН*, **362**, 323 (1998).
- [5] S.L. Miller. *Phys. Rev.*, **99**, 1234 (1955).

Редактор Л.В. Шаронова

## Power high-voltage bipolar transistors on the base of complicated semiconductor structures

M.Yu. Volokobinsky, I.N. Komarov, T.V. Matyukhina, V.I. Reshetnikoff, A.A. Rush, I.V. Falina, A.S. Yastrebov

St. Petersburg State University of Telecommunications, 191186 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Physical processes have been investigated in transistors with a new constructive element — a grid of bulk inhomogeneities in the collector region. The grid leads to diminution of electric field strength in  $p-n$ -junction at the base-collector interface and prevents development of the second breakdown.