

УДК 621.382.33

О ВОЗМОЖНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ СИЛОВОГО ТРАНЗИСТОРА С УТОПЛЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

А. С. ШАБОЯН, А. А. ВАРДАНЯН

НПО «Транзистор»

(Поступила в редакцию 5 августа 1988 г.)

Предложена конструкция транзистора с утопленным эмиттером, которая дает возможность регулировать эффективную глубину и ширину активной базы в широком диапазоне значений. Показана высокая эффективность предложенной конструкции, позволяющая найти оптимальное сочетание основных параметров высоковольтного транзистора.

При конструировании силовых транзисторов одной из важных задач является расчет профилей распределения примесей, технологических и других электрофизических характеристик многослойной транзисторной структуры, обеспечивающих оптимальное сочетание таких ее существенных параметров, как коэффициент усиления транзистора и его граничное напряжение, с одной стороны, и возможность технического осуществления такой структуры в рамках существующих технологий, с другой стороны. Такая задача еще более осложняется в случае силовых высоковольтных (до 1 кВ) транзисторов, у которых для достижения высоких значений пробивного напряжения, в сочетании с хорошими статическими и динамическими параметрами, требуется создание по мезапланарной технологии на полированных $n-n^+$ кремниевых структурах относительно глубоких коллекторных и эмиттерных $p-n$ -переходов, достигающих глубин 40—45 и 10—15 мкм соответственно.

Как известно [1, 2] при сильном легировании эмиттера фосфором на большой глубине возникает ряд вредных эффектов, приводящих к ухудшению эффективности эмиттера.

В такой ситуации весьма альтернативным является создание эмиттерных областей силового транзистора, так называемым, «комбинированным способом», суть которого заключается в создании эмиттерного $p-n$ -перехода и области активной базы по заданной ширине путем мелкой, кратковременной диффузии фосфора на определенную глубину в предварительно вытравленные эмиттерные карманы, образовании таким образом структуры с утопленным эмиттером (см. рис. 1).

Создание эмиттерной области подобной конструкции становится возможным путем применения технологии прецизионного микрохимического или плазмохимического травления кремния, обеспечивающего точность ± 1 мкм на глубине 10 мкм по всей поверхности транзисторной структуры.

Для расчета и оптимизации параметров транзисторной структуры с

утолненным эмиттером будем исходить из модели управления зарядом.

В общем случае коэффициент усиления транзистора *n-p-n*-полярности $h_{21э}$ определяется выражением

$$h_{21э} = \frac{\gamma \beta}{1 - \gamma \beta}, \quad (1)$$

где γ — эффективность эмиттера, β — коэффициент переноса базы,

$$\gamma = \frac{j_{nэ}}{j_{nэ} + j}, \quad \beta = 1 - \frac{\tau_{пр}}{\tau_{ж}^*},$$

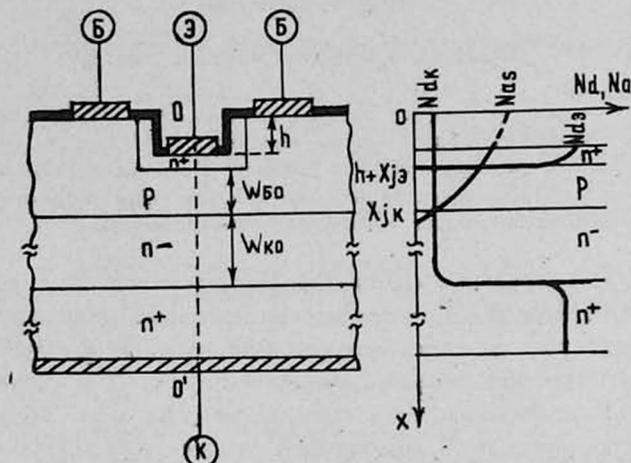


Рис. 1 Поперечный разрез структуры силового транзистора с утолненным эмиттером и профиль распределения легирующих примесей по сечению 0—0'.

$j_{nэ}$ и $j_{рэ}$ — плотности электронной и дырочной составляющих эмиттерного тока, $\tau_{пр}$ — время пролета базы, $\tau_{ж}^*$ — эффективное время жизни неосновных носителей заряда в базе.

Толщина $W_{ко}$ и удельное сопротивление ρ_k коллекторного *n*-слоя подобных транзисторов выбираются, исходя из требуемого значения пробивного напряжения перехода коллектор — база ($U_{кбо}$), что в приближении резко асимметричного перехода и наличия сильно легированного *n*⁺-слоя определяется выражением [3]

$$U_{кбо} = E_{кр} W_{ко} - \frac{W_{ко}^2}{2} \cdot \frac{q N_{dk}}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (2)$$

где $E_{кр}$ — критическое поле лавинного пробоя кремния, q — заряд электрона, ϵ_0, ϵ — диэлектрические проницаемости вакуума и кремния, соответственно, N_{dk} — концентрация донорной примеси *n*⁻-коллектора.

При низких уровнях инъекции, когда $j_{nэ} \gg j_{рэ}$; для $j_{nэ}$ и $j_{рэ}$ известны следующие выражения [4]:

$$j_{nэ} = q \frac{n_{io}^2 A_B}{Q_B} \exp\left(\frac{U_{эб}}{U_T}\right). \quad (3)$$

$$j_{p3} = q \frac{n_{i0} A_3}{Q_3} \exp\left(\frac{U_{3B}}{U_T}\right), \quad (4)$$

где n_{i0} — собственная концентрация носителей, $U_T = kT/q$ — термодинамический потенциал, U_{3B} — прямое смещение на переходе эмиттер — база, Q_3/A_3 и Q_B/A_B — числа Гуммеля эмиттера и базы транзистора [2], определяемые, как полное число основных носителей в эмиттере и в активной базе, находящихся на расстоянии диффузионной длины от эмиттерного р-р-перехода.

Комбинируя выражения (1—4) для h_{213} можно написать выражение

$$h_{213} = \left[\frac{Q_B/A_B}{Q_3/A_3} + \frac{\tau_{np}}{\tau_{*ж}} \right]. \quad (5)$$

Казалось бы, для достижения больших значений h_{213} следует создавать намного более сильнолегированный, по отношению к базовой области транзистора, эмиттер. Однако увеличению Q_3/A_3 , т. е. h_{213} путем сильного легирования эмиттера, как уже указывалось выше, препятствует «эффект сильного легирования». Как подтверждалось нами экспериментально, увеличение глубины залегания эмиттера от 2 до 12 мкм, при сохранении поверхностной концентрации фосфора в пределах 10^{20} — 10^{21} см⁻³, не приводит к существенному увеличению числа Гуммеля эмиттера Q_3/A_3 , которое является величиной почти постоянной и находится в пределах $1 \cdot 10^{13}$ — $6 \cdot 10^{13}$ см⁻⁴ сек. Что касается числа Гуммеля базы Q_B/A_B , то при малом смещении U_{3B} величина Q_B/A_B приравнивается своему равновесному значению Q_{B0}/A_B , представляющему собой общий заряд основных носителей в металлургической активной базовой области приходящийся, на единицу площади эмиттера, что, в предположении Гауссовского характера распределения базовой примеси, дается выражением:

$$Q_B/A_B = \frac{1}{A_B} \int_{h+x_{j3}}^{x/k} N_a(x) dx = \frac{1}{A_B} \frac{N_{sa} \sqrt{\pi}}{\sqrt{\alpha} 2} \times \\ \times \{ \phi(\sqrt{\eta} \cdot x_{jk}) - \phi[\sqrt{\eta} \cdot (x_{j3} + h)] \}, \quad (6)$$

где ϕ — интеграл ошибок, $\eta = \frac{1}{x_{jk}^2} \ln \frac{N_{sa}}{N_{dk}}$, $x_{jk} - x_{j3} - h = W_{BO}$.

При больших токах коллектора основную роль в увеличении Q_B играет, так называемый, эффект расширения квазинейтральной базы за счет модулированного коллектора.

В работе [5], в предположении $L_p \gg W_{kd}$, ($L_p = \sqrt{D_q \tau_{*ж}}$, диффузионная длина дырок в п-коллекторе), что хорошо выполняется в силовом транзисторе при $\tau_{*ж} \geq 10$ мкс, получено следующее выражение для токовой зависимости коэффициента усиления транзистора с учетом проявления эффекта оттеснения эмиттерного тока.

$$h_{21э} = h_{21э0} \left\{ 1 + h_{21э0} \frac{Q_0 / A_B}{Q_3 / A_3} \left[\frac{(1 + z W_3)^2 - 1}{3z W_3 (1 + z W_3)} \frac{I_k}{I_{k0}} + \frac{I_{k0}}{I_k} - 2 \right] \right\}^{-1}, \quad (7)$$

где I_k — ток коллектора, x^{-1} — ширина эффективно инжектирующего края эмиттерной гребенки, $Q_0 = U_{кэ} W_{к0} / 4 q D_K \rho_K$, $I_{к0} = U_{кэ} \cdot P \cdot W_3 / 2 \rho_K \cdot W_{к0}$, P — длина периметра эмиттера, $h_{21э0}$ — максимальное значение коэффициента усиления, при низком уровне инжекции, равное

$$h_{21э0} = \frac{Q_0 / A_3}{Q_{Б0} / A_B}. \quad (8)$$

Требования к основным электрическим параметрам силовых транзисторов зачастую носят противоречивый характер. Так, требование сохранить высокое значение коэффициента усиления $h_{21э}$ в режиме квазинасыщения транзистора при больших значениях коллекторного тока, как следует из выражения (7), сводится к обеспечению больших значений $h_{21э0}$ — порядка 100 и более, т. е. к созданию транзистора с малым значением $Q_{Б0} / A_B$, имеющему весьма высокоомную активную базу. С другой стороны, требование достижения высоких значений граничного напряжения $U_{кэ0}$, определяемого выражением [6]

$$U_{кэ0} = U_{кБ0} / \sqrt[1+n]{1 + h_{21э0}}, \quad (9)$$

вплоть до значений $U_{кБ0}$ и хороших динамических свойств при форсированном выключении прибора, наоборот, сводится к уменьшению значения $h_{21э0}$ до минимально возможных значений, т. е. к созданию базы с минимально возможным сопротивлением слоя активной базы под эмиттером, не превышающим $1 \text{ кОм}/\square$, определяемого выражением [7]

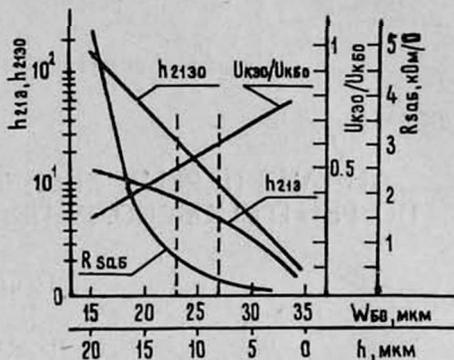
$$R_{сaБ} = \frac{Kt/q}{q \cdot D_B \cdot Q_{Б0}}. \quad (10)$$

На рис. 2 приведены рассчитанные на основе выражений (6), (7—8), (10) зависимости $h_{21э}$, $h_{21э0}$, $U_{кэ0} / U_{кБ0}$ и $R_{сaБ}$ для тестового транзистора от ширины активной базы $W_{Б0}$ при следующих значениях параметров: $x_{jk} = 40 \text{ мкм}$, $x_{jэ} = 5 \text{ мкм}$, $P = 1 \text{ см}$, $W_3 = 200 \text{ мкм}$, $W_{к0} = 100 \text{ мкм}$, $\rho_K = 80 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $Q_3 / D_3 = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1} \text{ сек}$, $U_{кэ} = 5 \text{ В}$, $n = 4,6$, $D_B = 10 \text{ см}^2 / \text{сек}$, $N_{ас} = 1,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $I_k = 0,2 \text{ А}$, $x^{-1} = 150 \text{ мкм}$, характерных для силовых транзисторов.

Анализ полученных зависимостей показывает, что применение конструкции транзистора с утопленным эмиттером дает возможность без технологических трудностей, связанных с глубокой диффузией фосфора и ухудшением обратных характеристик p - n -переходов, регулировать эффективную глубину эмиттера, равную $xj_{э\text{эф}} = h + xj_{э}$ и ширину активной

базы W_{BO} в широком диапазоне значений, причем диффузию фосфора в эмиттер лишь на ту глубину и при такой поверхностной концентрации, при которых хорошо сочетаются инжекционные свойства эмиттера и минимальное дефектообразование. На примере расчетных зависимостей на рис. 2 можно заметить, что диапазон значений W_{BO} в пределах от 23 до 27 мкм, выделенный пунктирами, является оптимальным, так как при этом имеется приемлемое сочетание основных параметров высоковольтного транзистора: $h_{219} = 7 \div 8$, $U_{кз0} / U_{кб0} = 0,5 \div 0,6$, $R_{saб} = 0,4 \div 0,7$ кОм / □.

Рис.2 Расчетные зависимости параметров h_{2190} , h_{219} , $U_{кз0} / U_{кб0}$ и $R_{saб}$ от ширины активной базы W_{BO} и глубины вытравленного эмиттерного кармана h .



Экспериментальное исследование электрических параметров опытных образцов высоковольтных транзисторов, изготовленных по схеме с утопленным эмиттером, с геометрическими и электрофизическими параметрами, близкими к расчетным, подтвердили высокую эффективность предложенной новой конструкции транзистора и хорошее совпадение расчетных и экспериментальных характеристик приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашков В. П., Павлов В. П. ФТТ, 13, 1044 (1971).
2. Mertens R. F., De Man H. S., Overstachen R. IEEE Trans. Electron Dev., E 20 722 (1973).
3. Варданян А. А., Геворкян Л. Е. В сб. п/п приборы, Таллинн, «Валгус», 151—155 (1982).
4. Moll Y. L., Ross Y. M. Proc. YRE, v 44, 72 (1966).
5. Варданян А. А., Шабоян С. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 19, 206 (1984).
6. Vower R. L. IEEE Trans. Electron Devices VED 20, 425 (1973).
7. Арзуманян А. А. и др. В кн. Силовые полупроводниковые приборы, Таллинн, «Валгус», 173—176 (1986).

ԴԵՆԿԱՄԱՍԻ ԷՄԻՏԵՐՈՎ ՈՒԺԱՅԻՆ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ
ԿՈՄՔԻՆԱՅՎԱԾ ՕՊՏԻՄԻԶԱՑԻԱՑԻ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա. Ա. ՇԱՐՈՅԱՆ, Ա. Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

Առաջարկվում է ընկերված էմիտերով սրանդիտորի մանրակազմվածք, որը հնարավորու-
թյուն է ապահովակտիվ բաղադրի էֆեկտիվ խրոմիան և լալնոթյան կարգավորում նշանակու-

Քյոննեբրի լայն դիապազոնով: Ցույց է տրված առաջարկված մանրակազմվածքի բարձր էֆեկտիվությունը, որը հնարավորություն է տալիս գտնել բարձրավոլտ տրանզիստորների հիմնական պարամետրերի օպտիմալ զուգակցումը:

ON THE POSSIBILITY OF COMBINED OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF POWER TRANSISTOR WITH BURIED EMITTER

A. S. SHABOYAN, A. A. VARDANYAN

A design of a transistor with buried emitter allowing the wide-range regulation of the effective depth and width of an active base is proposed. It is shown that this design allows one to find optimum parameters of the high-voltage transistor.

Изв. АН Армянской ССР, Физика, т. 24, вып. 5, 252—263 (1989)

УДК 538.56;539.12

АНАЛИЗ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО РЕНТГЕНОВСКОМУ ПЕРЕХОДНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

II часть

М. П. ЛОРИКЯН

Кафедра физики Ереванского зооветеринарного института

Р. А. САРДАРЯН, К. К. ШИХЛЯРОВ

Ереванский физический институт

Представлено продолжение обзора экспериментальных работ по РПИ, опубликованного в предыдущем номере журнала «Изв. АН АрмССР, Физика», т. 24, вып. 4, 1989 г.».

11—13 марта 1970 г. на XII симпозиуме по сцинтилляционным и полупроводниковым детекторам в США профессором Юанем был представлен доклад [41]* (см. также [42]), в котором исследовалось РПИ при энергиях $E_0 = 0,6—4$ ГэВ.

Использовалась установка, описанная ранее в [36]. Впервые были измерены угловые распределения и спектры РПИ, которые показаны на рис. 6 и 7, а зависимость полной энергии излучения от E_0 — на рис. 8.

Рассмотрим вначале угловые распределения, полученные авторами [41]. Эти распределения, представляющие собой, на самом деле, проекции на плоскость, проходящую через ось пучка, показаны на рис. 6. Здесь же для сравнения нами приведены проекции теоретических [43] угловых распределений РПИ. Видно, что наблюдаемые распределения значительно шире ожидаемых.

* Нумерация литературы и рисунков является продолжением нумерации первой части обзора.