## **2ЦЗЧЦЧЦЪ ПП2 ЧРЗПРВПРЪЪРР ЦЧЦЧЬ ГРЦВР ДЬЧПРВВЪВР** ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЯ ССР

LXVIII	1979	
УДК 621 382.3		

• ФИЗИКА

3

## Член корреспонделт АН Армянской ССР Г. М. Авакьянц, Р. С. Барсегян, М. А. Гукасян, М. В. Минасян, С. А. Саркисян

## Мощный многоэмиттерный кремниевый транзистор на токи порядка сорока ампер

(Представлено 4/111 1979)

Характерной чертой в работе мощных транзисторов любых классов, при протекании через них высоких плотностей, инжектируемых эмиттером токов, является эффект оттеснения тока (12), в результате которого весь ток оказывается сосредоточенным в узкой полосе у края эмиттера, обращенной к базе, и отчего эффективность использования площади транзисторной структуры резко снижается. Кроме того, з транзисторах с большой площадью структуры наблюдается тенденция к неравномерному распределению тока не только по направлению к краю эмнттера, но и вообще между различными участками структуры (например, вдоль периметра эмиттера). С целью устранения вредного влияния указанных эффектов поступают следующим образом. Вопервых, создаются структуры с сильно развитым периметром эмиттера и малой шириной отдельных элементов эмиттерной структуры (гребенчатые структуры). Благодаря этому уменьшается вредная роль оттеснения тока к краю эмиттера, и падает доля неиспользованной площади эмиттерного перехода. Во-вторых, разделяют эмиттерную структуру на большое число отдельных областей, что дает возможность уменьшить плотность рассенваемой мощности транзисторной структуры и снижает его телловое сопротивление. Однако для таких многоэмиттерных структур возникает другая серьезная проблема, связанная с неравномерным распределением тока между отдельными областями, что приводит к перегреву отдельных областей транзистора. Это проявляется наиболее сильно в статических режимах работы транзистора и при повышенном напряжении на коллекторе.

Для улучшения устойчивости токораспределения существует способ, заключающийся в том. что каждая отдельная область снабжается специальным сопротивлением (так называемое балластное сопротивление), включенным последовательно с эмиттерным электродом этой области.

Балластное сопротивление в тон или нной степени обеспечивает также режим генератора тока от питающего источника, что важно для слабой чувствительности параметров транзисторов к изменению температуры.

Такне сопротивления можно создавать различными способами Нами была разработана конструкция мощного многоэмиттерного транзистора с балластными диффузионными сопротивлениями, соединяющимися последовательно с группой эмиттерных гребенок (рис. I, a).



SA



Рис. 1. Топология и разрез многоэмиттерного транзистора с балластными сопротивлениями.

а — после первой фотолитографии (открытия эмиттерных окон); б-разрез транзисторной структуры

Sill

Предложенная конструкция отличается от существующих тем, что эмиттерные гребенки, подключенные к одному сопротивлению, соединены между собой параллельно, причем число гребенок зависит от величины тока, снимаемого с одной гребенки, и величины ограничительного сопротивления, а расстояние между эмиттерными гребенками, с целью оптимизации площади транзистора, выбрано в соответствии с формулой  $d = \overline{\text{сопst}\Delta}$ , где d-ширина эмиттерной гребенки, а  $\Delta$ -расстояние между гребенками. сопst-лежит в переделах от 1 до 100

Токозадающие площадки (в данном случае их четыре) выполнены, чередуясь, на кристалле с эмиттерными площадками. Диффузионные сопротивления создаются в одном технологическом цикле вместе с эмиттерными гребенками. Базовая токовая область расположена в центре конструкции, содержащей блокирующие области того же типа проводимости (рис. la, квадраты в центре), что и эмиттерные, размеры которых выбраны в соответствии с размерами токозадающих площадок.

Конкретные размеры отдельных эмиттеров, их длина, ширина, а также расстояние между ними подбирались таким образом, чтобы возможно было при изготовлении транзистора использовать как технологию с «мелким» эмиттерным переходом (2÷3 мкм от поверхности), так и технологию для глубоколежащего эмиттера (6÷9 мкм).

Приборы изготовлены по обычной планарной технологии В ка честве исходного материала выбирали пластины кремния с эпитаксиальными пленками типа *n<sup>+</sup>—n* с удельными сопротивлениями 0,01 *ом см* и 3 ÷ 7,5 *ом см* и толщиной эпитаксиального слоя 22 ÷ 25 *мкм*.

В качестве примеси, при создании базовой области, использовали бор (источник — борный ангидрид B2O,) Диффузию бора проводили в двух стадиях: загонки и разгонки. Загонку проводили в вакууме 5-10- \* м.м. Hg, при температуре источника 1155°С, температуре диффузии T<sub>1</sub> = 1035°С, время загонки 11÷15 мин. После первой стадии диффузии поверхностное сопротивление составляло 19÷300.м/[].Вторую стадию диффузии (разгонка) проводили в окисляющей среде при температуре в зоне 1220°С. Толщина слоя SIO2 составляла ~0,5÷0,6 мкм. Глубина залегания р-п перехода, измеренная по методу сферического шлифа, составляла 5,2÷6,2 мкм. поверхностное сопротивление 30÷60 ом/\_. После завершения двухстадийной диффузии бора проводили первую фотолитографическую обработку, и в окисной пленке над областью р-типа вытравливали окна для эмиттеров и балластных сопротивлении (рис. І, а). В качестве источника примеси для эмиттера использовали треххлористый фосфор (PCl, ). Диффузию фосфора, так же, проводили в две стадии. После первой стадии диффузии фосфора поверхностное сопротивление составляло ~0,9÷1,10м/П. После разгонки фосфора поверхностное сопротивление было 1,5+20м толщина окисла 0,35÷0,45 мкм, глубина залегания п-р-перехода 2,4÷3 мкм. Концентрация акцепторов в базе под эмиттером составляла 4÷5 · 10<sup>10</sup> см.

С помощью фотолитографни в окисле вытравливали окна для контактов. Металлизацию базовых и эмиттерных контактов осуществляли напылением в вакууме пленки алюминия толщиной 3÷4 мкм. Лишние участки алюминия удаляли с помощью третьей фотолитографин. Металлизацию под коллекторным контактом осуществляли путем химического никелирования с толщиной пленки 8÷10 мкм. с последующим вжиганием в вакууме 3÷2·0 Ид. при температуре 600-610°С.

Размеры транзисторной структуры - 10×10 мм.

На рис. 1, б изображен разрез гранзисторной структуры Вольт

амперные характеристики транзистора измеряли в импульсном режиме с длительностью импульса 200—300 мксек, без применения радиатора.

На рис. 2, а. б показаны входные и выходные вольт-амперные характеристики в схеме с общим эмиттером. Величина напряжения насыщения при токе  $30 \div 40 A$  лежит в пределах  $1,5 \div 2 a$ .



Рис. 2. а-входная характеристика транзистора (цена деления по горизонтали 0,28, по вертикали 1 А);

 $\delta$ —выходные вольт-амперные характернстнки траизистора в схеме с общим эмиттером (цена деления по горизонтали 0.5 *B*, по вертикали 1 *A*; ток базы:  $1\delta = 0.05A \times m$ , гле m = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, соответственно)



Рис 3. Зависимость статического коэффициента усиления транзистора в схеме с общим эмиттером от величины коллекторного тока для двух разных образцов

На рис. З показана зависимость статического коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером от тока коллектора. Максимально допустимос напряжение коллектор-эмиттер составляло ~ 160—200 в.

Как видно из приведенных рисунков, качество транзисторов можно считать вполне удовлетворительным и соответствующим расчетным данным.

Вернемся теперь к вопросу о роли балластных сопротивлении в деле равномерного отбора тока по площади транзистора. Совершению ясно, что величина этих сопротивлений, при их создании, не может быть одинаковой по площади кристалла. Другими словами, будет иметь место определенный разброс значений этих сопротивлений. Имеет ли смысл, в таком случае, использовать эти сопротивления, ибо неодинаковая величина их будет означать неоднородный отбор тока?

Чтобы ответить на этот вопрос, надо вспомнить, что по площади кристалла, даже в отсутствии балластных сопротивлений, также будет. нметь место значительная неравномерность отбора тока по упомянутой площади. Эта неравномерность обуславливается следующими обстоятельствами. Во-первых, по тем или иным причинам профили примесеи в эмиттерных переходах по площади кристалла будут неодинаковыми В частности, неодинаковой может быть концентрация мелких доноров у основания потенциального барьера эмиттерного n+-р перехода (транзистор имеет обычно п+-р-п--п+ -структуру), диффузионная длина дырок в эмиттере. Также будет неодинаковой и величина тормозящего поля в базе вблизи этого же перехода, опять-таки вызванная неодинаковостью профилей диффузии по кристаллу и, наконец, величина утечек на переходе. Во-вторых, обычно имеет место неоднородность теплового контакта между пластиной кремния и металлическим теплоотводом. Это вызовет неоднородность температуры по кристаллу, а стало быть н неодинаковость эмиссии тока в различных точках кристалла, что повлечет за собой дальнейшее усиление разброса в отборе тока. Могут быть и другие причины, ведущие к неоднородной эмиссии по кристаллу. И, таким образом, ответ на вопрос, принесут ли диффузионные балластные сопротивления пользу или вред при разбросе их значений по номиналу, зависит от того, как велик разброс этих сопротивлений и как зависит разброс тока от разброса сопротивлений. Кроме того, очень важно знать, какой разброс тока, в свою очередь, вызывают неоднородность по температуре и неоднозначность по величине концентраций мелких доноров у основания эмиттерного потенциального барьepa.

Очевидно, здесь проще всего поступить следующим образом

Зададим относительную величину изменения того или иного параметра и посмотрим, к какому относительному изменению тока это изменение ведет.

В тех условиях, когда балластное сопротивление в полной мере выполняет свои ограничительные функции, как видно, относительная ве-

167

личина его изменения  $\Delta R/R$  ведет к следующему относительному изменению тока  $\Delta I/I$ :

$$\frac{\Delta I}{I} = -\frac{\Delta R}{R} \tag{1}$$

Чтобы выяснить, каково  $\Delta I/I$  в случае изменения температуры кристалла T на величину  $\Delta T$ , или в случае изменения концентрации мелких доноров у основания эмиттерного барьера  $N_{ab}$  на величину  $\Delta N_{ab}$ , мы должны обратиться к соответствующей формуле для плотности тока эмиссии транзистора.

Мощные транзисторы обычно работают в режиме тока насыщения, в условиях значительного проявления эффекта оттеснения тока к краю эмиттера, обращенного к базовому электроду. В этом случае, как показано ранее (<sup>2</sup>), полный ток с края эмиттерной полоски длиною l (эмиттерует ток, в основном, край полоски, шириной  $x_0 = h\sqrt{6B_{cr}}$ , здесь h—ширина базы бездрейфового транзистора,  $B_{cr}$ —статический коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером).

$$I = \frac{l j_{s} e^{U_{s} t T}}{\sqrt{\frac{D_{s} n(0)}{6}}},$$
 (2)

где / — ток насыщения эмиттерного перехода, равный 2D " пр.

коэффициент диффузии электронов в *p*-базе, *n<sub>p</sub>* — равновесная концентрация электронов там же.

$$D_2 = \left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)_0 \frac{b}{h^2 N_a},\tag{3}$$

 $b = \frac{u_n}{u_p}$ ,  $u_n$  и  $u_p$  соответственно подвижности электронов и дырок,  $N_a$  — концентрация мелких акцепторов в базе,  $U_s$  — напряжение на эмиттерном переходе, помноженное на e/k, где k — постоянная Больцмана, e — элементарный заряд.

$$\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)_{0} = \frac{D_{p}hN_{a}}{D_{n}L_{p}N_{ab}}$$
(4)

Здесь D<sub>p</sub> – коэффициент диффузии дырок в эмиттере, L<sub>p</sub> – их диффузионная длина там же, n(0) – концентрация электронов в p-базе на границе эмиттерного перехода. Далее

$$n(0) = N_{a,s}e^{-\frac{U_0 - U_s}{T}},$$
$$U_0 = T \ln \frac{N_{a,s}N_{\sigma}}{n_1^2},$$

168

(5)

гле пі - собственная концентрация носителей в кремини:

$$n_i = \sqrt{N_i N_z} e^{-\frac{E_g}{2T}}, \tag{6}$$

причем *N*. и *N*<sub>R</sub>—плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне соответственно, *E*<sub>g</sub>—есть ширина запрещенной зоны, помноженная на *e*/*k*.

Используя (3)÷(6), можно (2) переписать так.

$$I = \frac{2\sqrt{6}LD_a\sqrt{L_p}}{\sqrt{h}}\sqrt{N_aN_a}\sqrt{\frac{N_{ab}}{N_a}}e^{-\frac{E_g-U_b}{2T}}.$$
 (7)

Считая отношения  $\Delta T$  и  $\Delta N_{A}$ , небольшими, из (7) найдем, пренебрегая зависимостью от T,  $D_n$  и  $\sqrt{N_N}$ :

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{E_{g} - U_{s}}{2T} \frac{\Delta T}{7} + \frac{\Delta (L_{p} N_{As})}{2N_{As} L_{p}}.$$
(8)

Если речь идет о диффузионных балластных сопротивлениях (а в реализованном нами траизисторе на 40 А у нас именно такие сопротивления), то надо сказать, что наверняка

$$\frac{\Delta(L_p N_{AB})}{2L_p N_{AB}} > \frac{\Delta R}{R}.$$
(9)

В самом деле.  $\Delta R/R$  определяется изменением полной концентрации

электронов в теле диффузионного сопротивления (п -области), тогда как — означает изменение концентрации N<sub>аэ</sub> на линии эмиттерного NAD перехода со стороны п\*-области. Ясно, что если полное количество примеси мелких доноров в n+-области постоянно, то SR либо вообще равно нулю, либо очень мало. В то же время концентрация N. в этом случае вдоль граннцы перехода совсем не должна быть постоянной и может сильно флуктуировать. Отсюда следует неравенство (9). Кроме того, если принять, что  $\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta T}{T}$ , то из (8) следует, что  $\Delta I/I$  из-за  $\frac{E_z - U}{2T}$  31 снова будет превосходить правую часть (1). Если  $\Delta T/T$  таково, что экспоненту в (7) нельзя разложить по  $\Delta T/T$ , то тем более  $\Delta I/I$  из (8) будет намного больше, чем Δ/// из (1). Таким образом, несмотря на разброс своих значений, диффузионное балластное сопротивление всегда будет способствовать более однородной эмиссии тока по площади транзистора. И, следовательно, многоэмиттерный транзистор всегда следует предпочесть гребенчатому (без сопротивлений), ибо наличие балластных сопротивлений будет сильно уменьшать число горячих точек и флуктуаций тока в них, что будет способствовать устойчивости транзистора по отношению ко вторичному пробою.

Крэме того, более однородный съем тока по транзистору позволяет надеяться на то, что изготовленный транзистор больше будет соот ветствовать по своим параметрам расчетному прибору и этим самым способствовать созданию тех приборов, которые заранее были запланированы. Именно все эти соображения заставили нас, песмотря на увеличение площади кристалла, и в связи с этим нарастание разброса в параметрах, идти по пути создания мощных и сверхмощных транзисторов в многоэмиттерном исполнении.

Ереванский государственный университет

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ թղթակից-անդամ Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՑ, Ռ. Ս. ԲԱՐՍԵՂՑԱՆ, Ս. Ա. ՂՈՒԿԱՍՅԱՆ, Մ. Վ. ՄԻՆԱՍՅԱՆ, Ս. Ա. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

Սիլիցիումային բազմաէմիտեւ ճզու տւանզիստու քառասուն ամպեւի կաւգի ճոսանքնեւի ճամաւ

Տեսական վերլուծունյամբ ցույց է տրված, որ բազմաէմիտեր տրան. զիստորում սահմանափակող դիմադրունյունները, չնայած իրենց նույլատրելի արժեջներից ունեցած շեղմանը, դրական դեր են խաղում նպաստելով հոսանջի ավելի հավասարաչափ բաշխմանը սարքում՝ բյուրեղի մակերևույնով։ նլնելով այս հետևունյունից, պատրաստված է հղոր բազմաէմիտեր սիլիցիումային տրանզիստոր ջառասուն ամպերի կարգի հոսանջների համար։ Տրանզիստորի պարամետրերի լափումները հաստատեցին եննադրյալ նախաղբրյալների ճշտունյունը.

Բերված են տվյալներ տրանգիստորի պատրաստման տեխնոլոգիայից, որոնք օպտիմալ են Հանդիսացել ըստ փորձնական արդյունքների։

## ЛИТЕРАТУРА— 4 ГЦЧЦЪПР # В П № Ъ

• Е. З. Мазель, Мощные транзисторы. «Энергия», М., 1969. <sup>а</sup> Г. М. Авакьянц. Физические принципы проектирования мощных транзисторов и программы их машинного расчета, Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1978