УДК 621.382.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УТЕЧКИ ТОКА В СРЕДНЕМ ЭМИТТЕРНОМ ПЕРЕХОДЕ *n-p-n-p-n-*СТРУКТУРЫ

А. А. ДЖЕРЕДЖЯН, А. Г. МАНУКЯН, Б. М. ГЮРДЖЯН, Г. С. КАРАЯН Институт радиофизики и электроники АН АрмССР

(Поступила в редакцию 25 июня 1983 г.)

Проведено экспериментальное исследование утечки тока в среднем эмиттерном перелоде *п.р.п.р.п.*структуры. При определенном выборе исходных технологических параметров структуры получены образцы, у которых этот переход практически не имеет утечек. В этом случае участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ последнего коллекторного перехода может образоваться под влиянием утечек тока в первом эмиттерном переходе.

1. Введение

Исследование сложных многослойных структур (МСС) имеет большой научный и практический интерес. Отметим работу [1], где приведены результаты исследований шестислойных структур, которые при прямом включении имеют на ВАХ два участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). Нестрогая теория таких структур предложена в [2]. Супермногослойные симметричные структуры впервые рассмотрены в [3]. Показано, что эти структуры могут иметь участки с ОДС на ВАХ и обладать памятью. Строгая и более общая теория МСС с произвольным числом слоев и с произвольной асимметрией для случая статического режима приведена в работах [4, 5], где введено понятие эффекта взаимодействия между несмежными частями МСС. Этим эффектом обусловлены обобщенные механизмы формирования участка с ОДС на ВАХ коллекторных переходов МСС и изменение знака напряжения на них (следовательно и свойства статических ВАХ структур [6, 7]).

Теоретическое предсказание эффекта сделало актуальной задачу его экспериментального обнаружения и изучения, но оказалось, что это связано с трудностями. Дело в том, что эффект непосредственно не наблюдается [4, 7], а отделение тех свойств ВАХ коллекторов, которые обусловлены только действием этого эффекта, от другого рода воздействий соседних частей структуры очень трудно. Необходимо свести их к минимуму, чтобы в структуре доминировал только эффект взаимодействия. Простейшей структурой, в которой это можно осуществить, является пятислойная. Участок ОДС на ВАХ ее крайнего коллекторного перехода в определенных условиях может формироваться благодаря существованию утечек тока в первом эмиттерном переходе (т. е. под влиянием действия эффекта). Необходимо только, чтобы центральный эмиттерный переход структуры не имел утечек. Изготовление таких структур трудно, но вполне реально.

Условия возникновения эффекта взаимодействия в них можно обеспечить путем высокого легирования баз, что исключает возможность действия других механизмов образования ОДС, связанных как с объемным зарядом, так и с изменением коэффициентов усиления составных транзисторов из-за сужения ширины баз с ростом напряжения.

Таким образом, при исследовании эффекта взаимодействия в пятислойных структурах важной задачей является проверка существования утечек тока в центральном эмиттерном переходе. Самостоятельный интерес представляет также решение на ЭВМ обратной задачи теории МСС: определение исходных (технологических) параметров структуры путем измерения ее электрических параметров.

2. Некоторые вопросы конструнрования структур

Из результатов работ [4, 5] следует, что требуемые структуры должны удовлетворять некоторым заранее заданным условиям. Отметим, что не все технологические параметры структуры можно варьировать и не все параметры входят в аналитические выражения, описывающие те свойства структур, которые мы выбрали для данного случая.

Исходным материалом для изготовления структур был кремний *п*-типа с $\chi_3 = 2,4 \cdot 10^{14}$ см⁻³ и $\tau_3 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ с (обозначения см. в [4, 8, 9]). Выбор материала с такими значениями χ_3 и τ_3 не случаен и сделан исходя из следующих соображений:

а) четвертый переход должен быть резким, поэтому нужно взять материал с небольшим значением χ_3 (так как переход создается путем диффузии примеси);

б) значение величины i, 8² должно быть относительно малым;

в) значение m₂ должно стремиться к нулю.

Для возникновения эффекта взаимодействия необходимо выполнение следующих соотношений:

$$\frac{\beta_3\beta_4\beta_2\,i_3}{\theta_2^*}=0,12,\ \beta_2=0,98,\ m_{4\,cp}=0,2. \tag{1}$$

Первое из них представляет обусловленную эффектом добавку к коэффициенту переноса четвертой базы — β_4 . Второе необходимо для того, чтобы выполнялось первое (числа 0,12 и 0,98 оценочные, но реальные с точки зрения технологии). Третье условие получено из соотношения $m_4 = (U_4/U_{04})^{1/2}$, которое выполняется для данного случая [10].

Для повышения точности измерений и упрощения методики исследований необходимо, чтобы ширина четвертой базы W_4 была меньше ширины второй базы W_2 . С другой стороны, чтобы в первом эмиттерном переходе была интенсивная рекомбинационная утечка (большое эначение $i_1 \delta_1^2$), необходимо иметь малое значение τ_2 во второй базе. Но тогда может нарушиться условие $\beta_2 = 0.98$, и, чтобы этого не произошло, вторую базу нужно делать узкой. Большое значение W_4 нежелательно, так как с увеличением W_4 уменьшается β_4 и увеличивается $m_{4\,cp}$, что может привести к на• рушению первого и третьего условий в (1) и затруднит разработку методики исследований. Кроме того, методику работы [10] уже нельзя применять. Существенным становится изменение ширины четвертого перехода в зависимости от напряжения. Целесообразно принять условие

$$W_{2} - W_{4} = 10^{-3} \,\mathrm{cm}. \tag{2}$$

Тогда W_2 и W_4 можно одновременно взять малыми. Чтобы иметь замкнутую систему уравнений, из которой можно было бы определить исходные параметры структур, нам нужно иметь еще несколько соотношений, причем таких, чтобы входящие в них величины были точно измеримы, а их характерные значения известны. Возьмем, например, следующие:

$$J_{2 \text{ MHB}} = 2,5 \cdot 10^{-3} A, \ J_{4 \text{ op}} = 2 J_{2 \text{ MHB}},$$

$$J_{0 \text{ min}} = 3 J_{2 \text{ MHB}}, \ U_{0 \text{ min}} = 0,5 B.$$
 (3)

Таким образом, систему уравнений, состоящую из (1)—(3), можно задать ЭВМ и вычислить исходные параметры структур. Это — пример обратной задачи теории МСС. В таблице приведены результаты вычислений.

- 1. AL - 1.	AND THE REAL	1 Hausen Elli	Таблица	
Номер базы (слоя)	X (cm ⁻³)	τ(c)	W (MRM)	
1		10-9	2. 2%	
2 .	1,2.1016	4.10-6	22	
3	2,4.1014	1,5.10-4	230	
4	2,68.10 ¹⁵	6,45.10-7	12	
5	1.	10-9	Della tilet	

3. Утечки в переходах

На рис. 1 изображена модель исследуемой структуры. Омические утеч-



ки возникают в основном в четвертом переходе, рекомбинация интенсивна в первом переходе (так как т, очень мало). Значения омических утечек можно определить, измерив реактивные параметры переходов. У выбранной структуры величины сопротивлений омических шунтов первых трех переходов достаточно велики (больше 1 МОм), и током через них можно пренебречь.

Сравнительно сложным является вопрос исследования процесса рекомбинации (коэффициента рекомбинационной утечки) в третьем эмиттерном переходе, что является целью настоящей работы. Следуя [8, 9], коэффициент рекомбинации определим так $\delta_3 = I_3 \, \text{рек}/i_3$, где i_3 — ток насыщения третьего пе рехода, а $I_3 \, \text{рек}_{\circ}$ можно считать постоянной величиной.

Вопрос нахождения значения δ₃ целесообразно связать с рассмотрением изменения с током коэффициента усиления крайнего транзистора α₄, в некотором интервале, вплоть до возникновения эффекта взаимодействия. Согласно [4] имеем

$$\alpha_{i} = \beta_{4} \left(1 - \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4J}{i_{3} \delta_{i}^{2}}}} \right), \qquad (4)$$

где β, определяется так же, как коэффициент переноса носителей тока в четвертой базе.

В общем случае β_4 зависит от значений напряжения во втором и четвертом переходах (U_2 и U_4), но если $\chi_4 \gg \chi_3$ и β_4 зависит от U_4 слабо, эта зависимость будет иметь вид

$$\beta_4(U_2) = \frac{1}{\operatorname{ch} \eta_4} \frac{1}{1 + A \operatorname{cth} \left(\eta_2 - g \sqrt[3]{U_2}\right) \operatorname{th} \eta_4}, \quad (5)$$

.....

$$g \equiv \left(\frac{3}{4} \frac{\varepsilon}{\pi e L_3^3 |\text{grad} \chi_3|}\right)^{1/3}, \quad A = \frac{D_3 L_4 \chi_4}{D_4 L_3 \chi_3}, \quad \eta_i = \frac{W_i}{L_i},$$

g характеризуется эффективным градиентом распределения примесей во втором переходе.

Из (5) следует, что для малого значения тока J' и для токов, близких J_{20100} , справедливо соотношение

$$\beta_4[U_2(J')] \simeq \beta_4[U_2(J_{2 \text{ unb}})]$$
(6)

(так как в этих случаях $U_2 \approx 0$).

Тогда из (4) и (6) получаем выражение

$$\frac{\frac{\alpha_4(J')}{\sqrt{1+\frac{4J'}{i_3\delta_3^2}-1}} - \frac{\alpha_4(J_{2 \text{ HHB}})}{\sqrt{1+\frac{4J_{2 \text{ BHB}}}{i_3\delta_3^2}-1}} = \frac{\alpha_4(J_{2 \text{ HHB}})-\alpha_4(J')}{2}, \quad (7)$$

откуда можно найти і, б², если его правая часть известна.

Преобразуем уравнение плотности тока через четвертый переход к следующему виду:

$$a_{4} = f(J) = 1 - m[U_{4}(J)] - \frac{1}{J} \left[i^{*} V \overline{U_{4}(J)} + \frac{U_{4}(J)}{r_{4}} (1 - m) \right].$$
(8)

Измерив с помощью метода работы [10] параметры $m(U_4)$ и i^* ($i^* = 3,4\cdot 10^{-4}$ м $A\cdot B^{-1/2}$), а также значения тока и напряжения, можно вычислить правую часть (8), а затем и (7).

4. Эксперимент

По результатам измерений построена кривая 1 (рис. 2). Подставляя эначения токов и напряжений $J' \simeq 60$ иА, $J_{2 \text{ инв}} \simeq 2,4$ мА, $U_2(J') \approx 0,3$ В и $U_2(J_{2\text{вив}}) \approx 0,3$ В в выражение (7), получаем $i_2\delta_3^2 = 60$ CGSE (20 нА). Таким образом, мы нашли зависимость β_4 (U_2). С ее помощью можно объяснить механизм образования участка ОДС на ВАХ четвертого перехода и решить вопрос о существовании утечек тока на третьем переходе. Ошибки в значениях полученных результатов могут быть обусловлены двумя причинами — погрешностями измерения и особенностями методики. Например, по методике вместо нулевого значения U₂ мы берем



Рнс. 2. Зависимость α_4 (*J*) (1) — экспериментальная кривая; 2) $l_3 \delta_3^2 = 0, 3$) $i_3 \delta_3^2 = 16,7$ нА, 4) $l_3 \delta_3^2 = 133,3$ нА — расчетные кривые, для которых $m_2 = 0,015$) в интервале токов (в мкА): a) 0 — 0,4 (точки сверху и снизу у каждой расчетной кривой соответствуют значениям $m_2 = 0,03$ н $m_2 = 0$); 6) 0—40 (качественная кривая).

 $U_{2}(J') = U_{2}(J_{2'H^{HB}}) = 0,3 B$, что приводит к определенной ошибке и в (6), и в конечном результате. Аналогичная ошибка возникает при пренебрежении зависимостью β_{4} от U_{4} . Чтобы оценить суммарную погрешность, необходимо определить величину g. Для этого строится вольт-емкостная характеристика

$$C_2(U_2) \simeq [C_1^{-1}(U_1) + C_2^{-1}(U_2) + C_3^{-1}(U_3)]^{-1}.$$
(9)

При этом опять допускается ошибка, так как $C_2(U_2)$ непосредственно измерить невозможно, поэтому используется приближение (9). В этом случае величина ошибки для интервала напряжений 4—180 В не превышает 2%. На рис. 3 приведена экспериментальная характеристика $C_2(U_2)$, из которой следует, что в интервале 4—180 В второй переход является линейным и g = 0.0188 В^{-1/3} (определяется по наклону прямой).

Если подставить значение g в (5) и записать его-для трех значений U_2 , например для 20, 200 и 700 В, получим систему уравнений относительно η_3 , η_4 и A. Задавая разумные пределы изменения этих величин с учетом технологии изготовления структур и решая указанную систему на ЭВМ, для η_3 , η_4 и A получаем следующие значения: $\eta_3 = 0,5476$, $\eta_4 = 0,2727$, A = 0,4679. Зависимость β_4 (U_2) уже можно записать в явном виде, подставляя в (5) значения η_3 , η_4 , A и g.

Оценка ошибок, обусловленных приближениями $U_2(J_{2 \text{ нив}}) \approx 0$ и $U_2(J') \approx 0$, значений величин $a_4(J)$, th η_3 и $i_3\delta_3^2$ показала, что они не превышают 3%. Отметим, что минимум на кривой 1 (рис. 2) при $J \approx J_{2 \text{ ср}}$ физически можно объяснить расширением третьей базы структуры с уменьшением U_2 . Однако такое утверждение не является строго обоснованным.

5. Сравнение результатов эксперимента и машинного расчета

Экспериментальные значения величин (21 эначение), описывающих ВАХ второго перехода, вводятся в ЭВМ. С помощью выражений (4) и (5) для трех значений $i_2 \delta_3^2 = 0,50$ и 400 CGSE (т. е. 0, 16,7 и 133,3 нА) н $m_2 = 0, 0,015$ и 0,03 с учетом расширения объема второго перехода и роста напряжения на нем вычисляется α_4 . Соответствующие кривые приводятся на рис. 2. Сравнение кривых показывает, что реальному экспери-216 менту соответствует кривая 3, для которой $i_s \delta_s^2 = 50$ CGSE (16,7 нА). Вариации этой кривой на ЭВМ с малым шагом дают значение $i_s \delta_s^2 = 67$ CGSE (22,3 нА). Это сравнение подтверждает предположение о том, что минимум на экспериментальной кривой 1 обусловлен чередованием расширения и сужения области пространственного заряда второго перехода с изменением напряжения на нем.



При токах $J < J_{2 cp} \alpha_4 (J)$ с током растет: а) из-за возрастания $\beta_4 (U_2)$ с уменьшением U_2 ; б) из-за существования рекомбинационной утечки на третьем переходе. Но, как следует из результатов эксперимента, скорость роста $\alpha_4 (J)$ при $J < J_{2 cp}$ мала и недостаточна для формирования ОДС на ВАХ четвертого перехода. В этом нетрудно убедиться, снимая ВАХ этото перехода (рис. 4).

Можно думать, что используя (5), мы тем самым интерполировали экспериментальную кривую 1 другой кривой (кривой 3). Но это не так. Такую сложную кривую, обладающую высокой трансцендентностью, невозможно интерполировать тремя точками, кроме того ЭВМ задается экспериментальная таблица ВАХ $U_1(I)$, обеспечивающая независимость подобной процедуры от интерполяции экспериментальной кривой.

В заключение отметим, что такие исследования можно провести и другим путем, а именно, вместо электрических параметров можно измерить исходные параметры структуры (ширины баз, концентрации примесей и т. д.), но из-за трудоемкости работы и больших потрешностей измерений (до 50—60% иной раз) этот путь нецелесообразен. В нашем случае максимальная дисперсия значений токов составляла 7%, а напряжений — 5%.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Грехов И. В., Шуман В. Б. Сб. «Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов». Изд. Наука, Л., 1969, с. 202.
- 2. Лебедев А. А. Сб. «Физика электровно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов». Изд. Наука, Л., 1969, с. 291.
- 3. Стафеев В. И. ФТП, 5, 408 (1971).
- 4. Авакьянц Г. М., Караян Г. С., Джереджян А. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 9, 402 (1974).
- 5. Авакьянц Г. М., Караян Г. С., Джереджян А. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 9, 498 (1974).
- 6. Евсеев Ю. А., Челноков В. Е. Физические принципы работы силовых полупроводниковых приборов. Изд. Энергия, М., 1973.
- 7. Караян Г. С., Джереджян А. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 14, 38 (1979).
- 8. Авакьянц Г. М., Караян Г. С., Джереджян А. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 7. 44 (1972).
- 9. Авакьяну Г. М., Караян Г. С., Джереджян А. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 7, 435 (1972).

10. Avakyants G. M. et al. Phys. Stat. Sol. (a), 62, 547 (1980).

n- p-n-p-n-ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ԿԵՆՏՐՈՆԱԿԱՆ ԷՄԻՏԵՐԱՑԻՆ ԱՆՑՄԱՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ԱՐՏԱՀՈՍՔԻ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

2. 2. APPERSUL, U. 2. UULAPHSUL, P. U. ASAPPRSUL, 2. U. AUPUSUL

Սկզբնական տեխնոլոդիական պարաժնարերի որոշակի ընտրությամբ պատրաստված են n-p-n-p-n-կառուցվածջներ, որոնց կենտրոնական էժիտերային անցումը հոսանջի արտահոսը չունի։ Այդ պատճառով վերջին կոլեկտորային անցման վոլտ-ամպերային բնությագծի վրա բացասական դիմադրության տիրույթ կարող է առաջանալ շնորհիվ առաջին էմիտերային անցումում եղած հոսանջի արտահութիւ

- and with

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CURRENT LEAKAGE ON CENTRAL EMITTER JUNCTION IN *n-p-n-p-n*-TYPE STRUCTURE

A. A. DZHEREDZHYAN, A. G. MANUKYAN, B. M. GURDZHYAN, G. S. KARAYAN

The current leakage on the central emitter junction in n-p-n-p-n-type structure has been experimentally investigated. For definite initial technological parameters of the structure the samples were made in which this junction practically had no leakage. In this case, the part of negative differential resistance on the current voltage characteristic of the edge collector junction may be formed under the influence of current leakage on the first emitter junction.