Изв. АН Армянской ССР, Физика, т. 19, вып. 5, 257-263 (1984)

### УДК 621.382.3

ИЗМЕРЕНИЕ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ *п-р-п-р-п-*СТРУКТУР А. А. ДЖЕРЕДЖЯН, А. Г. МАНУКЯН, Б. М. ГЮРДЖЯН, Г. С. КАРАЯН Институт радиофизики и электроники АН АрмССР

(Поступила в редакцию 12 июля 1983 г.)

Предлагается методика определения исходных (технологических) параметров пятислойных структур с *p-n*-переходами путем измерения их электрофизических характеристик (BAX, вольт-емкостных, ампер-емкостных характеристик). Такие измерения проведены для конкретной структуры и найдены ее исходные параметры. Важным преимуществом предлагаемой методики является то, что структуры не подвергаются дополнительной обработке и не разрушаются. Метод можно распространить и на более сложные структуры.

## 1. Введение

Измерение исходных параметров готовой *п-р-п-р-п-с*труктуры является весьма важной и интересной задачей. До настоящего времени не существовало методики, позволяющей измерить все эти параметры, не разрушая структуру. Необходимо иметь в виду, что дополнительная обработка изменяет значения параметров, кроме того обычно измеряются их локальные, а не эффективные значения. Последний момент имеет важное значение, так как теория создается для идеальных моделей, и чтобы ею описать реальные структуры, надо их параметрам приписать некоторые эффективные значения взамен точных. При этом необходимо делать упрощающие предположения относительно исходных параметров, без чего невозможно проводить расчет задачи на ЭВМ (например, условие резкости или линейности переходов, условие постоянства координатного распределения

примесей в базах и т. д., которые необходимы для математизации задачи):

Таким образом, важными проблемами являются как задача теоретического расчета структур, так и задача измерения значений их эффективных (интегральных) параметров. В настоящей работе предлагается способ решения обеих проблем, а именно, путем измерения электрических параметров структур определяются эффективные значения исходных параметров и на их основе проводится теоретический и машинный расчет структур.

## 2. Методика

Модель рассматриваемой структуры показана на рис. 1. Исходными параметрами являются:  $\chi_k$  — концентрация примесей,  $\tau_k$  — время жизни,  $L_k$  — диффузионная длина неосновных носителей в k-ой базе (k=1+5),  $W_k$  — ее ширина,  $r_k$  — величина сопротивления омического шунта k-перехода (k=1+4). Задача заключается в эксперименталь-

257

ном определении значений этих величин. Часть исходных параметров (ИП) можно непосредственно измерить опытным путем, остальные параметры, например  $\chi_1$ ,  $\chi_5$ ,  $W_1$ ,  $W_5$ , не входят в формулы токопро-



 $w_1$ ,  $w_5$ , не входят в формулы токопрохождения через *p*-*n*- переходы, и достаточно знать лишь порядок их величины. Параметры  $r_k$  можно измерить, снимая ВАХ и вольт-емкостные характеристики переходов, параметры  $\chi_4$  и  $\tau_4$ (а также  $U_{04}$ , входящий в зависимость  $m_4(U)$ ) определяются методом, предложенным в работах [1, 2], значение  $\chi_2$ можно определить, снимая вольт-емкостную характеристику обратно-смещенного первого перехода  $C_1(U_1)$ . Остается определить значения параметров  $\tau_1 - \tau_3$ ,  $\tau_5$ ,  $W_2$ ,  $W_3$ ,  $W_4$ .

Основываясь на теории, выберем теперь те электрофизические характеристики структуры, с помсщью которых можно определить вышеуказанные неизвестные ИП [4, 6].

(1)

Так как пока не существует способа экспериментального изучения коэффициента  $m_2$  лавичного умножения во втором коллекторном переходе, то во избежание методических ошибок будем пользоваться только характеристиками, снятыми при малых или отрицательных значениях напряжения  $U_2$  на нем, либо будем считать их не зависящими от процесса лавинного умножения.

Введем следующие обозначения, которые имеют физический смысл коэффициентов переноса, рекомбинации, генерации и тока насыщения через переходы соответственно:

$$\beta_{k} = \begin{cases} (1 + v_{k-1}/v_{k})^{-1} \operatorname{ch}^{-1} \eta_{k}, & \text{если } k \text{ четно} \\ (1 + v_{k}/v_{k-1})^{-1} \operatorname{ch}^{-1} \eta_{k}, & \text{если } k \text{ нечетно} \\ \beta_{4}^{9} \Phi = \beta_{4} + \frac{\beta_{3}\beta_{4} i_{3}\beta_{2}^{*}}{\theta_{2}^{*}}, \\ \delta_{k} \simeq \left[ \frac{\pi \varepsilon n_{i}^{2} k T (\chi_{k} + \chi_{k+1})}{8 i_{k}^{2} \tau_{k} \tau_{k+1} \chi_{k} \chi_{k+1} \ln \left(\frac{\chi_{k} \chi_{k+1}}{n_{i}^{2}}\right)} \right]^{1/2}, \\ i_{k}^{*} = eGc_{k}, \quad i_{k} = v_{k} + v_{k+1}, \end{cases}$$

где

$$v_{k} = \frac{en_{l}^{2}D_{k}}{L_{k}\chi_{k} \operatorname{th} \eta_{k}}, \quad \eta_{k} = \frac{W_{k}}{L_{k}},$$

$$C_{k} = \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon}{2\pi e} \frac{\chi_{k} + \chi_{k+1}}{\chi_{k} \cdot \chi_{k+1}}\right)^{1/2}, \text{ если переход резкий} \\ \frac{\sqrt[3]{3\varepsilon}}{4\pi e \rho_{k}}, & \text{если переход линейный,} \end{cases}$$
Нент ноимесей в k-переходе

Р<sub>к</sub> — градиент примесей в k-переходе. 258 В реальных структурах, изготовленных диффузионной технологией,  $i_i \approx v_{i_1}$  поэтому из (1) с помощью выражений [4—6]

$$\tau_2 = \frac{e^2 n_i^4 D_2}{\chi_2^2 i_1^2 (1 - \beta_2)}, \quad W_2 = \frac{e n_i^2 D_2}{\chi_2 i_1 \sqrt{1 - \beta_2^2}} \ln\left(\frac{\beta_2}{1 - \sqrt{1 - \beta_2^2}}\right)$$
(2)

нетрудно найти  $\tau_2$  и  $W_2$ , а значение  $\tau_1$  легко определить, если известна правая часть выражения

$$\tau_1 = \frac{\pi \varepsilon n_l^2 k T (\chi_1 + \chi_2)}{8 i_1^2 \tau_2 \delta_1^2 \chi_1 \chi_2 \ln \left(\frac{\chi_1 \chi_2}{n_l^2}\right)}$$
(3)

Из аналогичного выражения можно определить  $\tau_5$ , если снять прямую ветвь ВАХ четвертого перехода, а параметры  $\tau_3$ ,  $\chi_3$ ,  $W_3$  и  $W_4$  можно найти, если измерить  $i^*$ ,  $v_3$ ,  $\eta_3$  и  $\eta_4$ .

Таким образом, электрофизическими характеристиками, позволяющими определить ИП, могут быть  $i_1$ ,  $i^*$ ,  $\beta_2$ ,  $\delta_1$ ,  $\nu_3$ ,  $\nu_4$ ,  $\eta_3$ ,  $\eta_4$ .

Укажем величины, которые можно измерить. Из кривой зависимости  $\alpha_4(J)$  [3] можно определить коэффициенты  $\beta_4^{3\phi}$  и  $\beta_4$ , а также ток инверсии знака напряжения второго перехода  $\int_{2^{\circ} HIB}$ . Из полной ВАХ



структуры (кривая 1 на рис. 3) и из ВАХ первых трех переходов  $U_0(J) = U_1(J) + U_2(J) + U_3(J)$ (кривая 2 на рис. 3) определяются минимальное напряжение на первых трех переходах  $U_0 \min$  и напряжение срыва второго перехода  $U_{2 \text{ ср}}$ , ток срыва четвертого перехода  $J_{4 \text{ ср}}$  и ток  $J_{\text{B}}$ . Путем измерения емкости



второго перехода в двух режимах определяются тип перехода и градиент концентрации примесей в нем р<sub>k</sub>.

Приведем систему уравнений, лежащую в основе этих измерений:

$$\exp\left(\frac{e U_{0 \min}}{kT}\right) = \frac{\delta_1^2}{4\gamma_2} (b-1)^2 \frac{\theta_2^2/i_3 + \beta_3\beta_2^2 - 2\gamma_1\beta_2\beta_3/(b+1)}{\theta_2^2/J_{0 \min} + \beta_2^2 - 2\gamma_1\beta_2/(b+1)},$$

где

$$\begin{split} u &= \frac{3\beta_{2}\gamma_{1}}{2\beta_{2}^{*}} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{8\beta_{2}^{*}}{9\beta_{2}\gamma_{1}}} \right) - 1, \ b = \sqrt{1 + \frac{4\gamma_{1}\gamma_{2}}{i_{1}\hat{o}_{1}^{*}}} J_{B}, \\ \gamma_{1} &= 1 - \frac{\beta_{2}i_{1}(1 - \beta_{3})}{\theta_{2} - \beta_{3}^{*}i_{3}}, \ \gamma_{2} &= 1 - \frac{\beta_{2}^{*}i_{1}}{\theta_{2} - \beta_{3}^{*}i_{3}}, \ \gamma_{5} &= \frac{i_{3}\beta_{2}\beta_{3}\beta_{4}\beta_{2}^{*}}{\theta_{2}^{*}}, \\ \theta_{2} &= \beta_{2}i_{1}\operatorname{ch} \gamma_{2} + \beta_{3}i_{3}\operatorname{ch} \gamma_{3}, \ \theta_{2}^{*} &= \theta_{2} - \beta_{2}^{2}i_{1} - \beta_{3}^{2}i_{3}, \\ m_{4}\operatorname{cp} &= \sqrt{\frac{U_{4}\operatorname{cp}}{U_{04}}}, \ \beta_{2}^{*} &= \beta_{2} + \beta_{3} - 1, \end{split}$$

 $J_{0 \min}$  — ток при  $U_0 = U_{0\min}$ . Измеряемые величины  $J_{4 cp}$  и  $U_{4 cp}$  берутся из кривой 3 рис. 3.

#### 3. Экспериментальная часть

1. С помощью методов работ [1, 7, 8] из кривой 1 рис. 2 находим, что для данной структуры  $\chi_4 = 2,7 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>,  $\tau_5 + \tau_4 = 6,4 \cdot 10^{-7}$  с. Зная эти величины, получаем  $i_{h}^* = (en_l/\tau_4) (\epsilon/2 \pi e \chi_4)^{1/2} = 3,5 \cdot 10^{-4}$  мА · В<sup>-1/2</sup>,  $r_4 \simeq 66$  кОм,  $U_{04} = 500,5$  В.

2. Приложив постоянное напряжение к электродам  $\mathcal{P}_1$  и  $\mathcal{P}_2$  (минус — к  $\mathcal{P}_1$ , плюс — к  $\mathcal{P}_2$ ), с помощью  $\mathcal{P}_1$  и  $\mathcal{P}_3$  измеряем барьерную емкость практически второго перехода (кривая 2 на рис. 2). На основе зависимости C(U) определяем тип перехода. В нашем случае второй переход является линейным, а градиент концентрации примесей в нем  $\rho_2 = 3.9 \cdot 10^{16}$  см<sup>-4</sup>.

3. С помощью электродов  $\partial_1$  и  $\partial_3$  измеряем диффузионную емкость при токе  $J \ge J_{2 \text{ инв.}}$  (протекающем между  $\partial_1$  и  $\partial_2$ ). Эная ее, определяем значение суммы  $\tau_2 + \tau_3 = 1.5 \cdot 10^{-4}$  с.

4. С помощью электродов  $\Im_1$  и  $\Im_3$  снимаем вольт-емкостную характеристику первото *p*-*n*-перехода в коллекторном включении для случая, когда третий переход находится в инверсном состоянии (кривая 3 на рис. 2). Выясняется, что первый переход является резким. Находим  $\chi_2 = 1,2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. При той же полярности снимаем ВАХ первых трех переходов, которая в данном случае практически совпадает с ВАХ первого перехода. На основе этой ВАХ оцениваем значение омической утечки в первом переходе —  $r_1 > 300$  кОм.

5. Снимая зависимость коэффициента усиления n-p-n-составного транзистора от тока  $\alpha(I)$  и сравнивая ее с теоретической кривой (см. рис. 2 работы [3]), находим, что:

а) коэффициент лавинного умножения второго коллекторного перехода
 m₂ ≤ 0,015;

6) утечка в третьем эмиттерном переходе относительно мала —  $i_1\delta_3^2 \sim 22$  нА,  $r_3 > 15$  МОм;

в) коэффициент переноса четвертой базы  $\beta_1^\circ = \beta_4|_{U_1-0} = 0,7712$ ,

$$\beta_4^{\text{pacus}} = \beta_4|_{U_2} = U_{\text{max}} = 0,7146, \quad \beta_4^{9\Phi} = \beta_4^0 \left(1 + \frac{\beta_3^0 \beta_2^{0^*}}{\theta_2^*}\right) = 0,8893.$$

6. Снимаем ВАХ четвертого перехода в изолированном эмиттерном включении и строим график функции

$$\ln\left(J - \frac{U_4}{Sr_4}\right) = \ln v_4 + \frac{eU_4}{kT} + \ln\left[1 + \frac{\delta_4}{\exp\left(eU_4/2\,kT\right)}\right]$$

в зависимости от  $U_4$ , откуда определяем обратный ток насыщения четвертого перехода  $i_4 \approx v_4 = 6,12 \cdot 10^{-10}$  А и коэффициент рекомбинации  $\delta_4 = 650$ . Подставляя значение  $\delta_4$  в выражение  $\tau_5 = \pi \epsilon k T$  th  $\eta_4 \cdot (8 v_4 \delta_4^2 e L_4 \times 30)^{-1}$ , находим  $\tau_5 \sim 10^{-9}$  с. Из  $\tau_4 + \tau_5 = 6,4 \cdot 10^{-7}$  с следует, что  $\tau_4 = 6,4 \cdot 10^{-7}$  с, т. е.  $\tau_5 \ll \tau_4$ .

Далее, подставляя в выражение

$$\mathbf{v}_4 = \frac{en_1^2 D_4}{\sqrt{D_4 \tau_4} \chi_4 \cdot \text{th} \left( W_4 / \sqrt{D_4 \tau_4} \right)}$$

найденные значения  $\chi_4$ ,  $\tau_4$  и  $\nu_4$ , получаем уравнение относительно ширины четвертой базы  $W_4$ , решение которого дает  $W_4 = 12$  мкм.

Подставляя значения  $\beta_4$ ,  $v_4$  и  $W_4$  в определение  $\beta_4 = (1 + v_3/v_4)^{-1} \times ch^{-1} (W_4/L_4)$ , находим  $v_3 = 1,53 \cdot 10^{-10}$  А.

Из выражения  $\beta_4^{\text{pacm}} = (1 + \nu_3^{\text{pacm}} / \nu_4)^{-1} \operatorname{ch}^{-1} (W_4/L_4)$  получаем  $\nu_3^{\text{pacm}} = 2,13 \cdot 10^{-10}$  А, а из соотношения

$$v_{3}^{\text{pacur}} = v_{3} \frac{\text{th } \eta_{3}}{\text{th} \left(\eta_{3} - \sqrt[3]{4 \frac{3 \varepsilon U_{3} cp}{\pi e \rho_{2} L_{3}^{3}}}\right)}$$

определяем  $\eta_3 = \frac{W_3}{L_3} = 0,5476.$ 

7. Подставляя найденные выше значения величин в (4), получаем замкнутую систему уравнений относительно неизвестных  $v_2$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\delta_4$ . Вычислив на ЭВМ их значения, из (3) находим  $\tau_1 \sim 10^{-9}$  с.

Используя обозначения  $v_3$  и  $\beta_3$ , получаем замкнутую систему относительно  $W_3$  и  $\chi_3$ . Решение этой системы дает для них значения  $W_3 = 230$  мкм,  $\chi_3 = 2.4 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, а из (2) определяются значения  $\tau_3 = 4 \cdot 10^{-6}$  с и  $W_2 = 22$  мкм.

Подставляя найденные значения величин в уравнение тока через второй переход

$$-\frac{\beta_{2\,cp}^{*\,pacus}}{\lambda} = i_2^* \sqrt[3]{U_{2\,cp}} + \frac{U_{2\,cp}}{Sr_2} \left(\beta_{2\,cp}^{*\,pacus} - \frac{\beta_2}{\lambda}\right) - \frac{\beta_2 i_1 \delta_1^2}{2} (\lambda - 1), \quad (5)$$

где  $\lambda = \sqrt{1 + \frac{4 \int_{2} cp}{i_1 \delta_1^2}}$ , находим неизвестную величину омической утечки  $r_2 = 17$  МОм.

#### 4. Обсуждение результатов

В работе [3] приведена таблица ориентировочных исходных параметров рассмотренной здесь структуры. Она изготовлена на основе этих параметров. Сравнибая табличные значения величин со значениями, полученными в настоящей работе, замечаем, что наибольшее отклонение значений соответствующих параметров составляет ~ 9%. Мало отличаются и ковффициенты, и электрофизические характеристики, что подтверждает также и статистика. Аналогичные исследования других таких приборов, изготовленных нами, показали, что процент отклонения параметров практически сохраняется.

При изготовлении приборов после каждого технологического процесса на контрольных образцах известными способами измерялись некоторые исходные параметры. Результаты этих измерений существенно отличались от соответствующих эначений параметров как таблицы работы [3], так и полученных в настоящей работе, причем последние мы считаем более точными и реальными. Чтобы в этом убедиться, мы вводили в ЭВМ программу расчета ВАХ структур и их отдельных частей, а именно, U<sub>0</sub>(I) и U<sub>4</sub>(J). Сравнение полученных расчетных кривых с экспериментальными дачными показало, что лучшее приближение дают значения параметров настоящей работы. Так, например, отклонение друг от друга расчетных и экспериментальных значений напряжения при фиксированном значении тока и отклонение значений тока при фиксированном напряжении на расчетных и опытных кривых составило ~ 2%, что меньше погрешности измерения ~ 5%. Это показывает, что предлагаемая методика измерения ИП имеет точность не более 5%. Наибольшее отклонение имеется вблизи точки срыва напряжения второго перехода, что, вероятно, обусловлено неточным выбором значения коэффициента лавинного умножения  $m_2(U)_{.}$ Дело в том, что этот коэффициент оценивался способом работ [1, 2], т. е. измерялись градиент концентрации примесей второго перехода 0, и напояжение срыва на нем, а потом оценивалось максимальное электрическое поле в нем Е max ~ 1,5 · 10<sup>5</sup> В/см. При этом для m2 было получено значение т₂ ≤ 0,015, что нельзя считать точным. Вопросом точного значения т. мы не занимались и опраничились лишь опробированием различных значений  $m_2 = 0; 0,015; 0,03.$  Хорошее приближение к опытному результату дает значение 0,015, которое и было взято нами для m2. Это привело к определенной ошибке (методической), которая нами не оценивалась и которая стала причиной сравнительно небольшого расхождения теоретической и экспериментальной кривых вблизи точки А (рис. 3). Но эта неточность не носит принципиального характера и не приводит к существенному изменению предложенной методики, так как в использованные нами выражения m<sub>2</sub> не входит. Мы специально избегали использования любого выражения, относящегося к точке А, кроме (5), но и (5) получено путем исключения т.

Таким образом, при определении ИП по нашему методу допущенная неточность несущественна и ею обусловлена лишь степень расхождения теоретического и экспериментального значений  $U_{z_{\rm CP}}$ . По той же причине несущественна также аналогичная ошибка определения величины шунта

второго перехода, которая составляет ~ 1%. В заключение отметим, что использование значений некоторых точек на электрофизических характеристиках структур не является интерполяцией, так как использованные уравнения имеют разные трансцендентности и тремя-четырьмя точками невозможно их интерполировать с точностью ~ 2%.

### ЛИТЕРАТУРА

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

- 2. Джереджян А. А. и др. Тезисы докладов Первой конференции молодых ученых НИИ АН АрмССР Аштаракского района. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1979, с. 13. 3. Джереджян А. А. и др. Изв. АН АрмССР, Физика, 19, 212 (1984).
- 4. Авакьяни Г. М., Караян Г. С., Джереджян А. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 5, 402 (1974).
- 5. Караян Г. С., Джереджян А. А. ДАН АрмССР, 8, 151 (1974).
- 6. Авакьяни Г. М., Караян Г. С., Джереджян А. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 7, 435 (1972).

7. Шокли В. Теория электронных полупроводников. Пер. с англ., под ред. В. П. Жузе. Изд. ИЛ. М., 1953.

8. Берман Л. С. Введение в физику варикапов. Изд. Наука, Л., 1968.

## n-p-n-p-n կԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՍԿԶԲՆԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՉԱՓՈՒՄԸ

2. 2. ՋԵՐԵՋՅԱՆ, Ա. 2. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Բ. Մ. ԳՅՈՒՐՋՅԱՆ, Հ. Ս. ԿԱՐԱՅԱՆ

Առաջարկվում է p-n անցումներ ունեցող հնգաշերտ կառուցվածքների սկզբնական (տեխъпјадршцши) պшпшившрарр прозиши авроп, пре сробијот է вршив усвушршфрарцицши բնութագրերի չափման վրա։ Կատարվել են չափումներ կոնկրետ սարքի համար և որոշվել նրա սկզբնական պարամետրերը։ Մեթոդի կարևոր առավելություններից մեկը այն է, որ կառուցվածքները չեն ենթարկվում լրացուցիչ մշակման և չեն փչանում։

# MEASUREMENT OF INITIAL PARAMETERS OF n-p-n-p-n STRUCTURES

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

A technique for the determination of initial (technological) parameters of fivelayer n-p-n-p-n structures by measuring their electrophysical characteristics (currentwoltage, voltage-capacitance, current-capacitance etc.) is proposed. The technique provides non-destructive measurements and requires no supplementary preparations of the sample. It may be used for measurements with more complex structures.