

## О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

*И. А. Обухов*

В последние годы в литературе активно обсуждаются вопросы создания и функционирования квантовых приборов различных типов [1,2]. В большинстве работ по этой тематике обсуждаются приборы, имеющие весьма специфические электрические характеристики [1-3]. Как правило, это структуры с немонотонными вольт-амперными характеристиками (ВАХ), использование которых в электронных схемах ограничено достаточно узким классом функциональных устройств. Заманчивой представляется возможность создания квантовых приборов, имеющих выходные характеристики, аналогичные обычным биполярным диоду и транзистору. Такие приборы могли бы послужить основой для элементной базы квантовых интегральных схем.

Любой квантовый прибор можно условно разделить на активную область, в которой собственно и проявляются квантовые свойства носителей заряда, и классические контактные области, на которые подается и с которых снимается сигнал. В контактных областях электроны, как правило, можно считать статистически равновесными. В активной же части прибора это не так [4-6]. Например, электронам, подающим в резонансно-туннельный диод [6] из разных контактов, приписывают различные значения электрохимических потенциалов, выравнивание которых происходит на длинах порядка

$$L_d = (\hbar\tau/m^*)^{1/2},$$

где  $\tau$  — время релаксации импульса [4]. Это свойство неравновесности различных электронных потоков и релаксацию их электрохимических потенциалов друг к другу и предлагается использовать при конструировании квантовых приборов.

Простейший такой прибор, который логично назвать релаксационным квантовым диодом (РКД), представляет собой контакт двух квантовых проводов (КП) различной ширины (см. рис. 1, а). Предположим, что электроны, попадающие в РКД из левого и правого контактов, образуют две фазы с различными электрохимическими потенциалами  $\Phi_L$  и  $\Phi_R$  соответственно. Для описания переноса заряда в

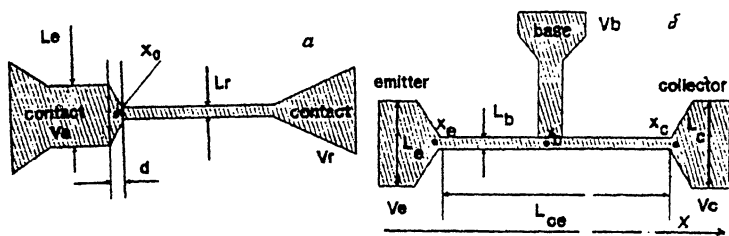


Рис. 1. Релаксационный квантовый диод. Вид сверху (а). Релаксационный квантовый транзистор. Вид сверху (б).

такой двухкомпонентной системе примем простейшую, линейную по  $\Phi_{L,R}$  модель [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_L}{\partial t} + (\nabla, \mathbf{i}_L) = \frac{e\gamma}{4\hbar} (\Phi_L - \Phi_R) (n_L + n_R), \\ \frac{\partial n_R}{\partial t} + (\nabla, \mathbf{i}_R) = \frac{e\gamma}{4\hbar} (\Phi_R - \Phi_L) (n_L + n_R), \\ \mathbf{i}_{L,R} = \frac{e\tau}{m^*} n_{L,R} \nabla \Phi_{L,R}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $n_{L,R}$  и  $L_{L,R}$  — концентрации и потоки “левых” и “правых” электронов;  $\gamma$  — некоторая безразмерная положительная постоянная.

Будем считать, что РКД сосредоточен в области  $x \leq [0, L_x]$ , а в точках  $x = 0$  и  $x = L_x$  находятся контакты:

$$\Phi_{L,R}(0) = 0, \quad \Phi_{L,R}(L_x) = V, \quad (2)$$

где  $V$  — приложенное напряжение.

В одномерном стационарном случае, предполагая, что

$$n_L(0) \gg n_R(L_x), \quad L_d/L_x \ll (n_L(0)/n_R(L_x))^{1/2}, \quad d \ll L_x \quad (3)$$

из (1) и (2) нетрудно получить:

$$V = i \left( \frac{m^*}{e\tau} \int_0^{L_x} \frac{dx}{n_L + n_R} + \frac{\hbar}{e\gamma d} \frac{1}{(n_L(x_0) + n_R(x_0))} \right). \quad (4)$$

Здесь:  $i = i_L + i_R$  — суммарная плотность потока электронов,  $d$  — ширина переходной области между КП, а  $x_0$  — некоторая точка в этой области.

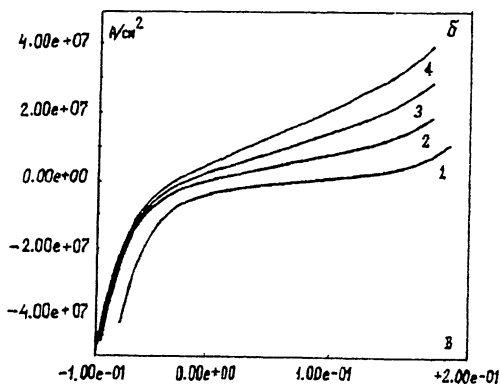
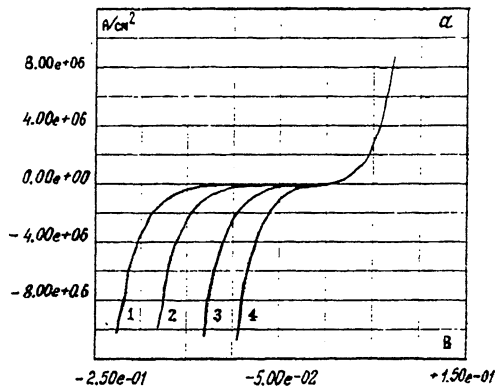


Рис. 2. Семейство ВАХ РКД (а). Семейство ВАХ РКТ при включении по схеме с общей базой (б).

Выражение (4) определяет ВАХ РКД. Его можно еще упростить, если пренебречь омическим падением напряжения в КП (первым слагаемым в (4)). Это возможно при:

$$dL_x \ll L_d^2. \quad (5)$$

При комнатной температуре ( $T = 300$  К) в КП, сформированном на основе AlGaAs/GaAs гетероструктуры с модулированным легированием,  $L_d \sim 10^{-6}$  см. Второе из условий (3) выполнено при  $L_x > 10^{-6}$  см, а условие (5) — только для достаточно резких переходов ( $d < 10^{-7}$  см). Первое условие (3) при субмикронных  $L_L$  справедливо если  $L_R < 3 \cdot 10^{-6}$  см. С учетом (5), для плотности тока в РКД найдем:

$$j = ei = \frac{e^2}{\hbar} \gamma dV (n_L(x_0) + n_R(x_0)).$$

На рис. 2,а показаны характеристики прибора, полученные при численном моделировании для  $L_L = 500$  Å,  $T = 300$  К

и: 1 —  $L_R = 50 \text{ \AA}$ , 2 —  $L_R = 60 \text{ \AA}$ , 3 —  $L_R = 70 \text{ \AA}$ ,  
4 —  $L_R = 100 \text{ \AA}$ .

Если создать структуру, содержащую два перехода между КП различной ширины и три контакта, как показано на рис. 1,б, то можно получить транзисторный эффект. Небольшие изменения напряжения базы  $V$  будут модулировать ток неравновесных электронов, попадающих в базу из эмиттера, и передаваться на коллектор в усиленном виде. Конструкцию, представленную на рис. 1,б, назовем релаксационным квантовым транзистором (РКТ). При условиях (3) и (5) для плотностей тока коллектора и эмиттера можно получить:

$$\begin{cases} j_e = \frac{e^2}{\hbar} \gamma \frac{V_{be} + V_{cb} \exp\{-L_{ce}/L_d\}}{\alpha_e (1 - \exp\{-2L_{ce}/L_d\})}, \\ j_c = \frac{e^2}{\hbar} \gamma \frac{V_{cb} + V_{be} \exp\{-L_{ce}/L_d\}}{\alpha_c (1 - \exp\{-2L_{ce}/L_d\})}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\alpha_e = (d_e(n(x_e) + n_b(x_e)))^{-1}$ ,  $\alpha_c = (d_c(n(x_c) + n_b(x_c)))^{-1}$ ,  
 $n = n_e + n_c$ . Легко вычислить и коэффициент усиления РКТ по току при включении по схеме с общим эмиттером:

$$\begin{cases} \beta = \partial j_c / \partial j_b = \alpha_0 / (1 - \alpha_0), \\ \alpha_0 = \partial j_c / \partial j_e = \frac{d_c(n)(x_c + n_b(x_c))}{d_e(n(x_e) + n_b(x_e))} \exp\{-L_{ce}/L_d\}. \end{cases}$$

Из этого выражения следует, что для увеличения  $\beta$  нужно уменьшать  $d_e$  и  $L_{ce}$ . На рис. 2,б показаны ВАХ РКТ при включении по схеме с общей базой при  $L_e = 500 \text{ \AA}$ ,  $L_b = 50 \text{ \AA}$ ,  $L_c = 100 \text{ \AA}$ ,  $d_e = 10 \text{ \AA}$ ,  $d_c = 16 \text{ \AA}$ ,  $l_{CE} = 100 \text{ \AA}$ ,  $T = 300 \text{ К}$  и: 1 —  $V = 0.01 \text{ В}$ , 2 —  $V = -0.025 \text{ В}$ , 3 —  $V = -0.03 \text{ В}$ , 4 —  $V = -0.05 \text{ В}$ . Как следует из расчетов, при соответствующем выборе рабочей точки  $\beta$  может быть достаточно большим (200 и более).

Численное моделирование дает для удельной емкости перехода между КП значения порядка  $0.1 \text{ мкФ/см}^2$ . Характерное сопротивление РКТ —  $10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ . Для предельной частоты прибора получим:  $f = (RC)^{-1} \sim 10^{15} \text{ Гц}$ . Ясно, что это только грубая оценка и реально частоты будут несколько ниже.

Все приведённые здесь характеристики рассчитаны при  $T = 300 \text{ К}$ . Поэтому ограничения на размеры активных областей приборов оказываются весьма жесткими:  $d_{e,c} \sim 10^{-7} \text{ см}$ ,  $L_{ce} \sim 10^{-6} \text{ см}$  и т.д. При низких температурах РКД и РКТ могут быть реализованы уже при суб-

микронных размерах, вполне достижимых для современных технологий.

В заключение хочу поблагодарить Генерального директора МНТК "Техвополис" Л.Н.Неустроева за финансовую поддержку работ, а В.И.Рыжия и всех участников его семинара за полезную дискуссию.

### Список литературы

- [1] *Datta S.* // Superlattices and Microstructures. 1989. V. 6. N 1. P. 83-93.
- [2] *Bate R.T.* // Nanotechnology. 1990. V. 1. P. 1-7.
- [3] *Reed A.M., Randai J.N., Luscombe J.H.* // Nanotechnology. 1990. V. 1. P. 63-66.
- [4] *Mc Lennan M.J., Lee Y., Datta S.* // Phys. Rev. B. 1991. V. 43. N 17. P. 13846-13884.
- [5] *Landauer R.* // Z. Phys.B. — Condensed Matter. 1987. V. 68. P. 217-228.
- [6] *Landheer D., Aers G.C.* // Superlattices and Microstructures. 1990. V. 7. N 1. P. 17-21.
- [7] *Петров Н., Бранков И.* Современные проблемы термодинамики. М.: Мир, 1986. 288 с.

Поступило в Редакцию  
2 апреля 1993 г.

---