

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaAs/AlAs

А. С. Игнатьев, А. В. Каменев, В. Б. Копылов,  
Г. З. Немцев, Д. В. Посвянский

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,  
103907, Москва, Россия  
(Получена 26 октября 1992 г. Принята к печати 13 ноября 1992 г.)

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на основе гетероструктур GaAs/AlAs изготовлены резонансно-туннельные диоды (РТД), исследованы их статические ВАХ. Обнаружены различия в характере ВАХ РТД, изготовленных на идентичных гетероэпитаксиальных структурах. Предложена эквивалентная схема РТД. В рамках этой модели рассчитаны ВАХ РТД в различных условиях.

В последние годы возрос интерес к структурам с резонансным туннелированием электронов. Приборы на основе этих структур могут быть использованы в качестве умножителей частоты, многоуровневой памяти, аналогово-цифровых преобразователей, генераторов, оптоэлектронных приборов [1]. В настоящей работе изучаются статические ВАХ двухбарьерных резонансных туннельных диодов (РТД) в зависимости от параметров структуры.

Одной из важнейших характеристик РТД является  $\gamma$  — отношение максимального резонансного тока к нерезонансной составляющей. Вследствие снижения нерезонансного тока участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) становится более выраженным. Поэтому при создании РТД использовались гетеропереходы на основе GaAs/AlAs, в которых достигаются большие по сравнению с GaAs/AlGaAs высоты потенциальных барьеров. Максимальные значения  $\gamma$ , достигнутые на таких структурах, составляли  $\gamma = 3$  при  $T = 300$  К [2].

РТД изготавливались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке MBE-1000 фирмы «Riber» на подложках монокристаллического полуизолирующего GaAs (100) с разориентацией  $2^\circ$  к плоскости (110) (рис. 1). На слое  $n^+$ -GaAs (легированном Si) толщиной 1.5 мкм с концентрацией примеси  $3 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ , выполняющем роль нижнего контактного слоя и барьера для диффузии примеси из подложки, выращивалась двухбарьерная структура (ДБС) со спейсером — слоем нелегированного GaAs толщиной 14 нм. В качестве барьеров ДБС наращивались слои AlAs толщиной 2.5 нм. Для формирования потенциальной ямы ДБС использовался слой GaAs толщиной 4.5 нм. Верхний спейсер-слой  $i$ -GaAs имел толщину 7 нм.

Особенностью выращивания данной структуры является различие оптимальных температур роста GaAs и AlAs, которое вызвано отличием энергии связи соединений GaAs и AlAs. В связи с этим температуру подложки изменяли в процессе выращивания. ДБС выращивалась при температуре подложки 690 °С, а слой GaAs — при температуре 620 °С.

Электрические свойства гетероструктур в значительной степени зависят от качества границ раздела AlAs/GaAs. Прерывание роста на поверхности GaAs при As-стабилизированных условиях приводит к повышению качества границы раздела за счет формирования более совершенной структуры, которое контролировали по увеличению интенсивности фотолюминесценции от квантовой ямы. Но при повышении длительности «прерывания» наблюдается уменьшение интенсивности фотолюминесценции, что, по видимому, связано с повышением концентрации глубоких безызлучательных центров. С другой стороны, прерывание роста на поверхности AlAs только на 10 с приводит к резкому уменьшению интенсивности люминесценции, т. е. к быстрому увеличению концентрации ловушек на поверхности. В соответствии с этим для изготовления эпитаксиальных структур в данной работе прерывание процесса роста слоя производилось на 20 с только перед ростом барьерных слоев.

50 нм	$n^+$ -GaAs(Si)	$3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
500 нм	$n^-$ -GaAs(Si)	$5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
7 нм	$i$ -GaAs	
2.5 нм	$i$ -AlAs	
4.5 нм	$i$ -GaAs	
2.5 нм	$i$ -AlAs	
14 нм	$i$ -GaAs	
1.5 мкм	$n^+$ -GaAs(Si)	$3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
$n^+$ -GaAs substrate		

Рис. 1. Схематическое изображение вертикального разреза РТД.

Контактный слой к ДБС состоял из двух последовательных слоев GaAs толщиной 500 и 50 нм, легированных кремнием до уровня  $5 \cdot 10^{17}$  и  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответственно, с плавным изменением концентрации Si между ними. Для формирования омических контактов использовалась система Au—Ni—(Au + 12% Ge) толщиной 0.28 мкм с последующим вжиганием при температуре подложки 475 °C в течение 30 с. РТД формировался в виде мезаструктур с радиусом эмиттерного контакта 7 мкм. Коллекторный контакт формировался сбоку от мезаструктуры на нижнем  $n^+$ -слое (рис. 1). В связи с неоднородностью травления возможно увеличение сопротивления омического контакта из-за неполного удаления спейсерного слоя на отдельных приборах.

На полученных РТД проводились измерения статических ВАХ при температурах 77 и 300 К на приборе фирмы «Tektronix» (модель 370A). На рис. 2, 3 (кривые 1) представлены типичные ВАХ РТД. На рис. 2 ВАХ носит бистабильный характер (участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) отсутствует на ВАХ), а на рис. 3 на ВАХ наблюдается область с ОДС и на этом участке имеется особенность. Природа этой особенности изучалась в работах [3, 4]. В работе [3] она объяснялась генерацией РТД незатухающих нелинейных колебаний. Эквивалентная схема РТД представлялась в виде, изображенном на рис. 4, а. Такая схема описывается дифференциальным уравнением второго порядка

$$LC \frac{d^2 v}{dt^2} + [RC + LG(v)] \frac{dv}{dt} + RI(v) + v = V, \quad (1)$$

где  $L$ ,  $R$  — соответственно индуктивность и сопротивление контактов,  $C$  — емкость РТД,  $G = d I/d V$  — нелинейная проводимость,  $v$  — напряжение на нелинейной

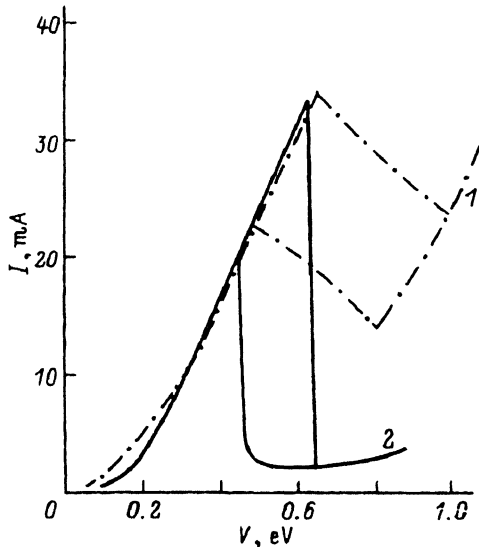


Рис. 2. ВАХ РТД при контактном сопротивлении  $R = 15 \text{ Ом}$ : 1 — экспериментальная ВАХ, 2 — расчетная.

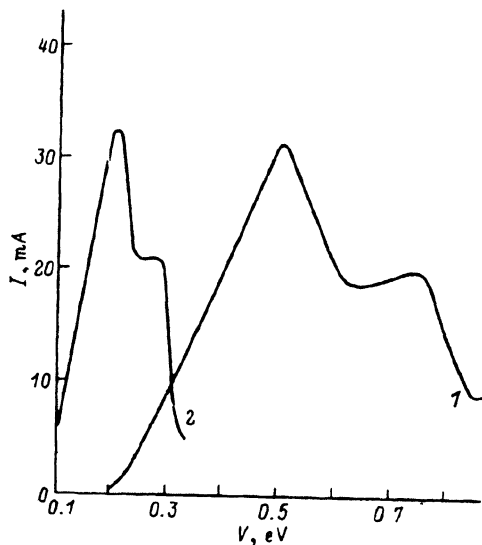


Рис. 3. ВАХ РТД при контактном сопротивлении  $R = 1.5 \text{ Ом}$ : 1 — экспериментальная ВАХ, 2 — расчетная.

проводимости,  $V$  — напряжение, приложенное к РТД,  $I(v)$  — ВАХ резонансной структуры.

В случае малых нагрузочных сопротивлений

$$R > R_c = (V_p - V_p)/(I_p - I_v), \quad (2)$$

где индексы  $p$  и  $v$  относятся соответственно к максимальному и минимальному значениям тока, уравнение (1) теряет устойчивость (имеет положительные показатели Ляпунова) при

$$G(v) < -\frac{RC}{L}. \quad (3)$$

В диапазоне напряжений, определяемом соотношением (3), в схеме самопроизвольно возникают незатухающие нелинейные колебания. Усреднение этих колебаний по времени приводит к возникновению особенности на падающем участке ВАХ. Индуктивность, необходимую для существования незатухающих колебаний, можно оценить из условия

$$L > \frac{RC}{G_{\max}}, \quad (4)$$

$$G_{\max} = (e^2 m^* / 4\pi^2 \hbar^3) \Gamma,$$

где  $\Gamma$  — ширина первого резонансного уровня,  $m^*$  — эффективная масса электронов в квантовой яме.

Недостатком предложенного объяснения является то, что в ряде случаев для возникновения осцилляций необходимы индуктивности порядка нескольких десятков мкГн [3]. Причина появления столь большой индуктивности не вполне ясна.

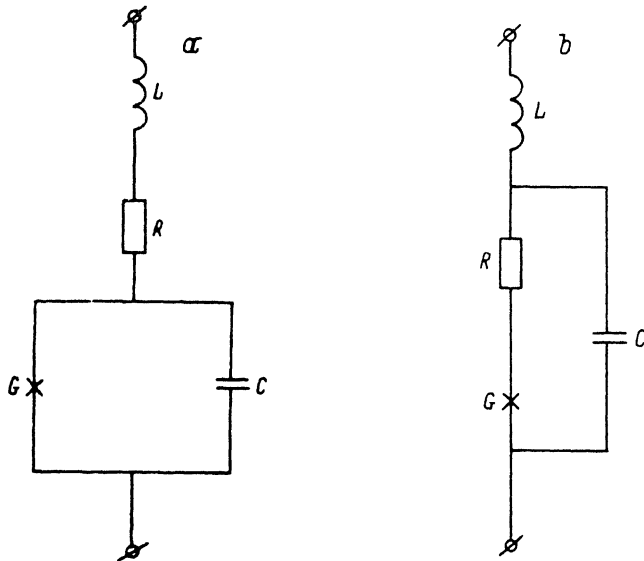


Рис. 4. Эквивалентные схемы РТД.

Эта трудность не возникает в измененной эквивалентной схеме РТД рис. 4, *b*. В этой схеме емкость перехода шунтирует не только двухбарьерную структуру, но и нагрузочное сопротивление. Это можно обосновать тем, что основной вклад в сопротивление  $R$  для проводящих подложек вносят обедненные слои, непосредственно примыкающие к двухбарьерной структуре, так как концентрация примеси в нелегированном GaAs не превышает в полученных образцах  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Поэтому концентрация носителей в примыкающей ДБС области примерно на 3 порядка меньше, чем в соседнем контактном слое. В этой схеме описанная выше неустойчивость имеет место во всей области ОДС уже при малой индуктивности  $L$ .

Эквивалентная схема на рис. 4, *b* описывается уравнением

$$[1 - RG(v)] LC \frac{d^2 v}{dt^2} + LG(v) \frac{dv}{dt} + RI(v) + v = V. \quad (5)$$

Мы не учитываем наличие «квантовой индуктивности» [5]

$$L_Q = \tau / G(v),$$

где  $\tau = \hbar / \Gamma$ , так как она намного меньше, нежели индуктивность подводящих проводов.

$$I = (em^* kT / 2\pi^2 \hbar^3) \int_0^{\infty} D(E) \ln F(E_f, E, v) dE, \quad (6)$$

$$F = (1 + \exp[(E_f - E)/kT]) / (1 + \exp[(E_f - E - v)/kT]),$$

где  $D$  — прозрачность структуры,  $E_f$  — уровень Ферми в контактах.

Прозрачность структуры рассчитывалась из решения одномерного уравнения Шредингера (так как прозрачность структуры зависит только от перпендикулярной барьеру составляющей импульса), при этом предполагалось, что все электрическое поле сосредоточено в структуре и напряженность поля не зависит

от координаты, а эффективная масса электронов в слоях AlAs отличается от массы в слоях GaAs. Волновая функция электронов  $\psi$  представлялась в виде

$$\psi(x) = \begin{cases} e^{ikx} + R(k) e^{-ikx}, & x \rightarrow -\infty, \\ C_j(k) Ai(x) + D_j(k) Bi(x), & 0 < x < d, \\ T(k) e^{ikx}, & x \rightarrow \infty, \end{cases} \quad (7)$$

где индекс  $j$  относится к квантовой яме или туннельным барьерам, а константы  $R, T$  — соответственно коэффициенты отражения и прохождения через структуру,  $d$  — толщина РТД. Прозрачность структуры находится из формулы  $D = T(k)T^*(k)$ . При расчетах ВАХ учитывалось изменение химического потенциала в контактах при изменении температуры. Химический потенциал  $\mu$  как функция температуры находился из уравнения

$$N = \int_0^{\infty} f(E, T, \mu) G(E) dE,$$

где  $G(E)$  — плотность электронных состояний в контактах,

$$G(E) = (2m^*)^{3/2} \sqrt{E} (2\pi^2 \hbar^3),$$

$f(E, T, \mu)$  — функция распределения Ферми—Дирака,  $N$  — концентрация носителей.

Емкость РТД может быть оценена по простой формуле  $C = \epsilon \epsilon_0 S/d$ , где  $S$  — площадь РТД,  $\epsilon = 12$  (значение берется для GaAs). Мы не учитывали влияния накапливаемого в квантовой яме заряда  $Q_w$  на полную емкость РТД, так как он оказывается меньше, чем заряд  $Q_k$ , создаваемый в контактной области диода

$$Q_k = 1/6 e \pi^2 k_f^3 L_s,$$

где  $L_s$  — ширина слоя спейсера,  $k_f = (2m^* E_f)^{1/2} / \hbar$ .

$$Q_w = L_w (em^* kT / \pi^2 \hbar^2) \int_0^{\infty} F(k_x) \ln [1 + \exp(E_f - E_x) / kT] dk_x,$$

$$F = (1 + R_2) / T_2 D(k_x),$$

$$E_x = (\hbar k_x) / 2m^*,$$

где  $R_2, T_2$  — соответственно коэффициенты отражения и прохождения от второго барьера,  $L_w$  — ширина квантовой ямы. Значения емкости РТД составляли примерно  $(1 + 3)$  пФ. Влияние заряда квантовой ямы на статическую ВАХ РТД изучалось в работе [6].

На рис. 2, 3 (кривые 2) изображена ВАХ РТД (с параметрами, указанными выше), рассчитанная по формуле (2) при различных температурах. При расчетах предполагалось, что эффективная масса электронов в слоях из GaAs  $m^* = 0.067 m$ , а в слоях AlAs  $m^* = 0.1 m$ , где  $m$  — масса свободного электрона. Следует отметить, что при температуре 77 К максимальный ток через РТД ( $I_p$ ) совпадает с экспериментальным значением, а при 300 К эти значения начинают сильно различаться (для расчетных ВАХ значение  $I_p$  увеличивается, а для экспериментальных ВАХ оно немного понижается). На наш взгляд, это вызвано тем, что при высоких температурах необходимо учитывать процессы рассеяния электронов на фононах, что может снизить значение  $I_p$ . В случае, когда

$$R > R_c \cong 3 \text{ Ом},$$

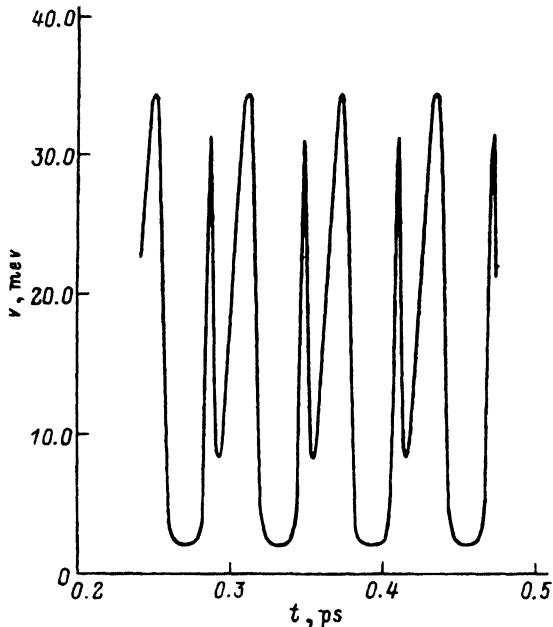


Рис. 5. Генерация нелинейных колебаний РТД на участке с ОДС.

положение равновесия, отвечающее пересечению нагрузочной прямой с падающей ВАХ, оказывается неустойчивым. Это приводит к тому, что участок с ОДС не может быть зарегистрирован — ВАХ носит бистабильный характер (рис. 2). При малых нагрузочных сопротивлениях, как уже отмечалось ранее, в схеме возникают нелинейные затухающие колебания (рис. 4), усреднение которых ведет к образованию особенности на участке с ОДС (рис. 5). В связи с тем что все РТД создавались по идентичной технологии, а самой невоспроизводимой операцией при создании РТД является формирование контактов, то наличие гистерезиса на одних ВАХ и его отсутствие на других позволяет сделать предположение, что природа бистабильности носит чисто электротехнический характер (внешняя бистабильность [6]) и не связана с накоплением заряда в квантовой яме (внутренняя бистабильность [7]).

Таким образом, изменяя контактное сопротивление РТД, сформированных на одинаковых эпитаксиальных структурах, можно получать приборы как с бистабильной ВАХ, так и с участком ОДС. Особенность на падающем участке ВАХ, по-видимому, связана с генерацией высокочастотных колебаний, наличие которых может являться показателем хорошего качества самой ДБС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. С. Тарер. Электрон. техн., Сер. Электроника СВЧ, вып. 9, 21 (1987).
- [2] H. G. Maro, U. K. Chen, U. K. Redby. Appl. Phys. Lett., 49, 70 (1986).
- [3] C. Y. Belhadj. Appl. Phys. Lett., 57, 54 (1990).
- [4] M. G. Boudreau, H. C. Liu. Superlatt. a. Microstruct., 8, 429 (1990).
- [5] H. C. Liu. Phys. Rev. B, 43, 12538 (1991).
- [6] J. O. Sofo, C. A. Balserio. Phys. Rev. B, 42, 7292 (1990).
- [7] B. Joagi, E. T. Koenig. Appl. Phys., 69, 3381 (1991).