

Последовательный механизм транспорта электронов в резонансно-туннельном диоде с толстыми барьерами

© Н.В. Алкеев[¶], С.В. Аверин, А.А. Дорофеев*, Р. Velling⁺, Е. Khorenko⁺, W. Prost⁺, F.J. Tegude⁺

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
141190 Фрязино, Россия

* ГУП НПП „Пульсар“, Москва, Россия

⁺ Solid State Electronics Department, Gerhard-Mercator-University,
47057 Duisburg, Germany

(Получена 6 июня 2006 г. Принята к печати 15 июня 2006 г.)

Анализ частотной зависимости импеданса резонансно-туннельного диода на основе InGaAs/InAlAs с шириной ямы 5 нм и барьерами толщиной 5 нм в диапазоне частот 0.1–50 ГГц показал, что механизм транспорта в таком диоде в основном последовательный, а не когерентный, что совпадает с проведенными оценками. Обсуждается возможность определения долей когерентного и последовательного механизма транспорта электронов через резонансно-туннельный диод по частотной зависимости его импеданса.

PACS: 73.40.Gk, 85.30.Mn

1. Введение

В последнее время значительно вырос интерес к изучению полупроводниковых мезоскопических структур [1]. В первую очередь это обусловлено развитием полупроводниковой технологии, позволяющей создавать структуры с размерами порядка единиц и десятков нанометров. В таких структурах длина волны де Бройля электронов превышает размеры структуры, и транспорт электронов определяется в основном их волновыми свойствами, что ведет к появлению целого ряда новых эффектов [1]. Эти эффекты исчезают, если время сбоя фазы волновой функции электрона будет много меньше времени пролета электрона через структуру. Изучение механизмов транспорта носителей заряда в мезоскопических структурах представляет собой важную фундаментальную задачу.

К мезоскопическим структурам можно отнести резонансно-туннельный диод (РТД), впервые предложенный Есаки и Тсу [2] и являющийся одним из первых приборов нанoeлектроники [3]. Он состоит из слоя узкозонного полупроводника–квантовой ямы (КЯ), расположенной между двумя слоями полупроводника (барьерами) с более широкой запрещенной зоной. Эти слои в свою очередь расположены между слоями (спейсерами) слаболегированного узкозонного полупроводника, за которыми следуют сильнолегированные слои эмиттера и коллектора. В КЯ возникает один или несколько уровней размерного квантования. При приложении напряжения смещения ток через РТД течет лишь в том случае, если в эмиттере существуют электроны, которые могут резонансно (т.е. с сохранением энергии и поперечного импульса) туннелировать на уровень в КЯ и далее в коллектор. РТД обладает очень высоким быстродействием, например известно, что нелинейные свойства РТД сохраняются вплоть до ~ 10 ТГц [4]. РТД обладает и другими уникальными свойствами: он, в частности, является

единственным прибором нанoeлектроники, работающим при комнатной температуре, а на вольт-амперной характеристике (ВАХ) РТД имеются участки отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП).

Первоначально [2] предполагалось, что транспорт электронов через РТД когерентный, т.е. электроны проходят через барьеры РТД аналогично тому, как световая волна проходит через резонатор Фабри–Перо: прозрачность барьеров резонансно возрастает, когда энергия летящих из эмиттера на барьер электронов приближается к энергии одного из уровней размерного квантования в КЯ РТД. В работе [5] был предложен еще один механизм транспорта электронов в РТД, тоже резонансный, но некогерентный, часто называемый „последовательным“. Согласно этому механизму, электрон туннелирует через РТД в два этапа: сначала из эмиттера через первый барьер на уровень в КЯ, а затем с этого уровня через второй барьер в коллектор. При этом предполагается, что оба акта туннелирования происходят независимо, т.е. подразумевается, что за время нахождения электронов в КЯ в результате неупругих столкновений полностью теряется информация о первоначальной фазе его волновой функции. В работе [6] было замечено, что деление резонансного туннелирования на когерентное и некогерентное не имеет физического смысла, поскольку для дискретизации электронного спектра в яме необходима определенная степень когерентности, а именно, время сбоя фазы волновой функции должно превышать удвоенное время пролета электроном ямы. В противном случае встречные электронные волны в резонаторе оказываются некогерентными, и энергетический спектр электронов из дискретного превращается в непрерывный. Было также отмечено, что на „когерентность“ туннелирования сильно влияют неидентичность и неоднородность входного и выходного барьеров по площади РТД. В случае неидентичных барьеров неодинаковость амплитуд интерферирующих электронных волн приводит к уменьшению амплитуды волновой функции в

[¶] E-mail: alkeev@ms.ire.rssi.ru

КЯ и, следовательно, к уменьшению коэффициента прохождения. Отметим, что неидентичность барьеров РТД намного сильнее будет проявляться в тонких барьерах, а не в толстых, у которых коэффициент отражения близок к единице.

В одной из последних работ [7], посвященной анализу механизмов транспорта электронов в РТД, предложено различать три механизма транспорта: „когерентный“, „последовательный“ и „полностью некогерентный“. При когерентном механизме основная часть электронов туннелирует через РТД с сохранением фазы, а для описания этого режима лучше всего подходит модель, предложенная в [2]. При последовательном механизме транспорта почти все электроны теряют фазовую память и термализуются в КЯ. При этом резонансные уровни в КЯ строго определены. Для описания этого механизма транспорта наиболее адекватна модель, предложенная в работе [5]. И наконец, в случае полностью некогерентного механизма транспорта время сбоя фазы волновой функции электронов стремится к нулю, и резонансные уровни в КЯ исчезают, а плотность состояний в КЯ стремится к объемной. В этом случае также исчезают и области ОДП на ВАХ РТД [8].

Расчеты, выполненные в [9], показали, что как когерентный, так и последовательный механизмы транспорта электронов в РТД приводят к одной из той же форме ВАХ, т.е. из анализа статических ВАХ невозможно определить, какой механизм транспорта электронов реализуется в конкретном РТД. Интересный метод присутствия доли когерентного тока в полном токе через РТД предложен в работе [10]. Было известно, что спектральная плотность дробового шума при последовательном туннелировании электронов через два барьера не может быть меньше половины пуассоновской величины $S_I = 2eI$. Однако расчеты, проведенные в [10], показали, что при когерентном транспорте электронов через РТД спектральная плотность дробовых шумов может быть существенно меньше, чем eI . Приведенные в работе результаты экспериментов по измерению дробовых шумов у РТД с тонкими (2 нм) барьерами продемонстрировали наличие когерентной составляющей в полном токе РТД.

В настоящей работе мы предлагаем метод обнаружения доли тока, обусловленного последовательным механизмом транспорта, в полном токе РТД, основанный на анализе частотной зависимости его импеданса. Суть метода заключается в следующем. Как уже отмечалось выше, при последовательном механизме транспорта электрон туннелирует через барьеры независимо, поэтому при туннелировании электрона через один из барьеров, через другой барьер должен течь ток смещения, что обеспечивает непрерывность полного тока [11]. Регистрация этого тока смещения позволяет судить о вкладе последовательного механизма транспорта в общий ток через РТД.

2. Анализ экспериментальных результатов [12]

В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) полупроводниковые приборы принято характеризовать малосигнальными эквивалентными схемами (ЭС). Такой подход дает возможность лучше понять механизмы транспорта носителей заряда в различных полупроводниковых приборах и оптимальным образом проектировать различные СВЧ устройства. На основе малосигнальной ЭС РТД создаются нелинейные ЭС.

Было предложено большое количество ЭС РТД [13–18], однако все они получены исходя из последовательного механизма транспорта электронов. Мы не нашли в литературе ЭС РТД, описывающую его высокочастотные свойства при когерентном механизме транспорта, но полагаем, что в этом случае высокочастотные свойства РТД лучше всего могут быть представлены ЭС (рис. 1). Действительно, при когерентном механизме транспорта электроны туннелируют через барьеры РТД как через единое целое, поэтому дифференциальную проводимость структуры можно характеризовать величиной G_D . На рис. 1 C_D — геометрическая емкость между сильно легированными эмиттером и коллектором РТД, а r_s — сопротивление омических контактов. Отметим, что ЭС, представленная на рис. 1, является ЭС обычного туннельного диода и диода с барьером Шоттки.

Следует также заметить, что ряд ЭС, описывающих высокочастотные свойства РТД, при последовательном механизме транспорта электронов содержит индуктивность [13–15]. Так, в работе [13] индуктивность была введена для объяснения особенностей частотной зависимости импеданса РТД. В работах [14,15] индуктивность моделировала задержку электронов в КЯ РТД при протекании через него тока. В работе [16] была предложена ЭС РТД, состоящая из двух последовательно соединенных параллельных ZC-цепочек, причем импеданс Z может зависеть от частоты. Каждая ZC-цепочка моделировала один из барьеров РТД. Эта ЭС получила дальнейшее развитие в работах [17,18].

На рис. 2 представлена ЭС из [18], с которой практически совпадает ЭС из работы [17]. Проводимости G_1 и G_2 этой ЭС являются туннельными проводимостями первого и второго барьеров. Наличие емкостей C_1 и C_2

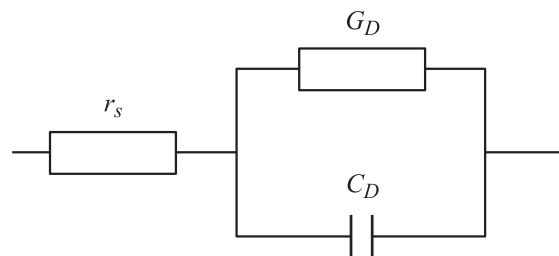


Рис. 1. Высокочастотная ЭС РТД при когерентном механизме транспорта.

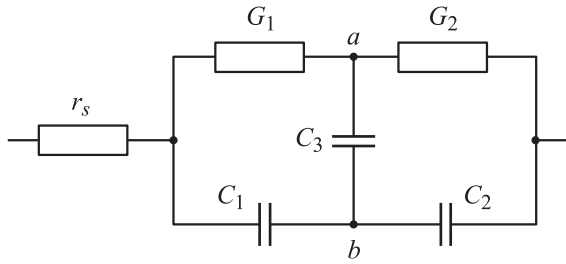


Рис. 2. ЭС РТД из работы [18].

позволяет учесть токи смещения через первый и второй барьеры, в то время как соответственно через второй и первый барьеры туннелируют электроны. Емкость C_3 , согласно [18], моделирует накопление заряда в КЯ РТД. Наконец, в работе [19] было предложено описывать импеданс РТД с помощью функциональной зависимости, которой невозможно поставить в соответствие какую-либо ЭС.

В связи с большим количеством предложенных ЭС РТД встает вопрос — как выбрать ЭС, которая наилучшим образом описывала бы измеренную частотную зависимость импеданса конкретного РТД? В работе [12] для подбора ЭС мы предложили использовать метод нелинейной регрессии, который заключается в следующем. Во всех точках f_i частотного диапазона, в которых измерялся импеданс $Z_m(f_i)$ РТД, рассчитывался импеданс $Z_c(f_i)$ предполагаемой ЭС РТД. Затем строилась целевая функция:

$$G = \sum_{i=1}^n |Z_m(f_i) - Z_c(f_i)|^2. \quad (1)$$

Путем варьирования величин элементов ЭС находили минимум G_{\min} функции (1) и за величины элементов ЭС РТД принимались значения элементов, при которых $G = G_{\min}$. О степени соответствия измеренного импеданса и импеданса предполагаемой ЭС РТД можно судить по величине G_{\min} , а также визуально по степени совпадения кривых измеренного импеданса РТД и импеданса предполагаемой ЭС на диаграмме Смита [20]. Более обоснованно судить о том, какая теоретическая зависимость лучше соответствует экспериментальной кривой, можно опираясь на методы математической статистики. В случаях, подобных нашему, чаще всего используют критерий Пирсона (критерий χ^2) [21].

В работе [12] при различных напряжениях смещения мы измерили импеданс РТД в 401 точке, равномерно распределенной в диапазоне частот 0.1–50 ГГц. Исследуемый РТД имел InAlAs-барьеры толщиной 5 нм, ширина его InGaAs-КЯ составляла также 5 нм. Более подробно детали эксперимента описаны в работе [12]. На рис. 3 представлена часть диаграммы Смита с изображенными на ней тремя кривыми зависимостями импеданса от частоты. Кривая 1 — экспериментальная зависимость импеданса РТД от частоты при смещении

0.3 В, кривая 2 — зависимость импеданса от частоты для ЭС рис. 1 при оптимальных значениях ее элементов (т.е. при $G = G_{\min}$). Видно, что между этими двумя кривыми есть характерное отличие, т.е. когерентный механизм не совсем адекватно описывает транспорт электронов в исследуемом РТД. Отметим, что мы проанализировали влияние неоднородности барьеров по площади РТД на форму кривой частотной зависимости его импеданса в случае когерентного транспорта электронов. Проведенный анализ показал, что изменения формы кривой незначительны и лежат в пределах ошибки эксперимента.

Из рис. 3 видно, что точность проведенных нами измерений позволяет выбрать более подходящую ЭС для исследуемого РТД, чем ЭС, представленная на рис. 1, поэтому в настоящей работе мы провели поиск G_{\min} для всех известных нам ЭС РТД с целью поиска наилучшего варианта эквивалентной схемы. Оказалось, что для ЭС, содержащих индуктивность [13–15], при $G = G_{\min}$ величина индуктивности $L \rightarrow 0$, т.е. ЭС с индуктивностями сводились к ЭС, представленной на рис. 1, и имели ту же величину G_{\min} , из чего можно сделать вывод, что эти ЭС недостаточно точно описывают высокочастотные свойства нашего РТД. Достаточно хорошее совпадение с экспериментальной кривой при всех напряжениях смещения на РТД было получено для ЭС из работ [16–18]. Кривая 3 на рис. 3 представляет зависимость импеданса от частоты для ЭС из работы [18] при $G = G_{\min}$. Видно, что она гораздо лучше совпадает с экспериментальной кривой 1, чем кривая 2. В количественном отношении G_{\min} для ЭС из [18] (см. рис. 2) более чем на порядок меньше G_{\min} для ЭС (рис. 1).

В таблице приведены величины элементов ЭС, представленной на рис. 2 при $G = G_{\min}$. Видно, что $C_1 > C_2$, на основании чего можно сделать вывод о том, что

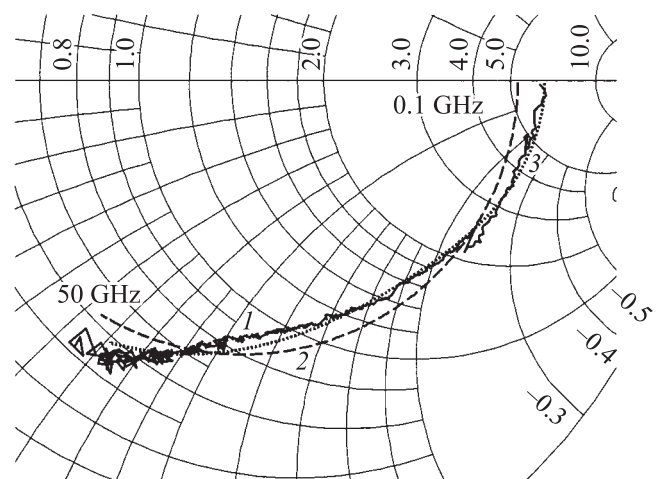


Рис. 3. Зависимости импеданса от частоты в диапазоне 0.1–50 ГГц: 1 — экспериментальная зависимость импеданса РТД от частоты при смещении 0.3 В; 2 — зависимость импеданса оптимизированной ЭС РТД, изображенной на рис. 1; 3 — зависимость импеданса ЭС РТД, изображенной на рис. 2.

C_1 , пФ	R_1 , Ом	C_2 , пФ	R_2 , Ом	C_3 , пФ	r_s , Ом
0.55	180	0.098	116	0.34	21

цепочка R_1C_1 описывает эмиттерный барьер, а цепочка R_2C_2 — коллекторный. В самом деле, вблизи эмиттера образуется обогащенный электронами слой и емкость эмиттер–КЯ увеличивается. Наоборот, вблизи коллектора существует слой, обедненный электронами, поэтому емкость коллектор–КЯ уменьшается. Средне-квадратичные отклонения величин элементов ЭС можно вычислить таким же образом, как это делалось в [12].

Ближние величины для G_{\min} для ЭС из работ [16,18] можно объяснить тем, что эти ЭС отличаются элементами, соединяющими точки a и b на рис. 2 (в [18] — это емкость, а в [16] точки a и b соединены). Если потенциалы точек a и b близки, а это будет, когда оба барьера РТД одинаковы, ЭС из работ [16,18] практически не отличаются друг от друга, и точность проведенных экспериментов не позволяет заметить разницу в G_{\min} у этих схем.

С учетом того что транспорт электронов в РТД может идти одновременно по когерентному и по последовательному механизмам, нами также осуществлялась минимизация целевой функции для ЭС, состоящей из двух параллельных ветвей, одна из которых описывает когерентный транспорт (схема рис. 1), а другая — последовательный (схема рис. 2). Проведенный анализ показал, что G_{\min} в этом случае практически не отличается от G_{\min} для ЭС, приведенной на рис. 2. Для обнаружения заметной разницы между величинами минимумов целевых функций в первом и втором случаях, а значит, и определения долей когерентного и последовательного механизмов транспорта в протекающем через РТД токе, необходимо увеличить точность измерений импеданса РТД и расширить частотный диапазон измерений, что вполне достижимо для современной измерительной аппаратуры.

Таким образом, ЭС, соответствующая последовательному механизму транспорта [18], гораздо лучше описывает зависимость импеданса РТД от частоты, чем ЭС, соответствующая когерентному механизму транспорта электронов. На основании этого можно заключить, что основная часть электронов туннелирует в исследованном нами РТД по последовательному механизму.

Проведем оценки, подтверждающие, что в исследованном РТД транспорт электронов осуществляется большей частью по последовательному механизму. Как отмечено в работе [6], последовательный механизм транспорта электронов в РТД осуществляется при выполнении условий

$$\tau_0 < \tau_p < \tau_n. \quad (2)$$

Здесь τ_0 — удвоенное время пролета электроном ямы, τ_p — время сбоя фазы волновой функции электрона, которое в [6] отождествляется с временем свободного

пробега электрона, а τ_n — это так называемое „радиационное“ время жизни, или время жизни электрона по отношению к его туннелированию из ямы. Первое неравенство выражает условие образования резонансных уровней в КЯ. При ширине ямы a $\tau_0 = 2a/v_1$, где $v_1 = (2\varepsilon_1/m^*)^{1/2}$ — скорость поперечного движения электрона на первом резонансном уровне в яме с энергией ε_1 . Для исследованного нами РТД $\varepsilon_1 = 70$ мэВ и $v_1 = 6.1 \cdot 10^5$ м/с, откуда следует, что $\tau_0 \approx 1.7 \cdot 10^{-14}$ с. По оценкам, при комнатной температуре в InGaAs $\tau_p \approx 10^{-12}$ с. Отметим, что при этом не учитывалась шероховатость гетерограниц, которая в первую очередь обусловлена несовершенством технологии выращивания слоев РТД и приводит к уменьшению времени сбоя фазы. Поэтому в нашем случае τ_p — это верхняя оценка. При невыполнении второго неравенства в (2) большая часть электронов будет туннелировать через барьеры РТД когерентно. Время τ_n можно оценить по формулам, приведенным в работе [6], и для нашего случая $\tau_n \approx 5 \cdot 10^{-10}$ с. Таким образом, приведенные оценки показывают, что в исследованном нами РТД в основном реализуется последовательный механизм транспорта электронов.

3. Заключение

1. Анализ частотной зависимости импеданса РТД на основе InGaAs/InAlAs с относительно толстыми (5 нм) барьерами показал, что эквивалентная схема РТД, соответствующая когерентному механизму транспорта электронов, а также все известные эквивалентные схемы, соответствующие последовательному механизму транспорта и содержащие индуктивность, не подходят для описания высокочастотных свойств исследованного РТД.

2. Хорошее совпадение с экспериментом было получено для эквивалентной схемы, соответствующей последовательному механизму транспорта, в которой каждый из барьеров РТД описывается параллельной RC-цепочкой. Таким образом, транспорт электронов в исследованном РТД осуществляется в основном по последовательному механизму. Проведенные оценки подтвердили справедливость этого вывода.

3. Была предпринята попытка определить доли когерентного и последовательного механизмов транспорта в полном токе электронов через РТД, однако точность проведенных экспериментов оказалась недостаточной.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 04-02-17177).

Список литературы

- [1] C.W.J. Berenakker, H. van Houten. Sol. St. Phys., **44**, 1 (1991).
- [2] R. Tsu, L. Esaki. Appl. Phys. Lett., **22**, 562 (1973).
- [3] European Commission IST programme Future and Emerging Technologies, *Technology Roadmap for Nanoelectronics*, 2nd ed., November 2000.

- [4] W.R. Frensley. Appl. Phys. Lett., **51**, 448 (1987).
- [5] S. Luryi. Appl. Phys. Lett., **47**, 490 (1985).
- [6] А.С. Тарер. Электрон. техн. сер. Электроника СВЧ, вып. **9** (403), 21 (1987).
- [7] G. Iannaccone, B. Pellegrini. Phys. Rev. B, **52**, 17 406 (1995).
- [8] Y. Hu, S. Stapleton. J. Appl. Phys., **73**, 8633 (1993).
- [9] T. Weil, B. Vinter. Appl. Phys. Lett., **50**, 1281 (1987).
- [10] V.Ya. Aleshkin, L. Reggiani, N.V. Alkeev, V.E. Lyubchenko, C.N. Ironside, J.M.L. Figueiredo, C.R. Stanley. Phys. Rev. B, **70**, 115 321 (2004).
- [11] Ya.M. Blanter, M. Büttiker. Phys. Rep., **336**, 1 (2000).
- [12] Н.В. Алкеев, В.Е. Любченко, П. Веллинг, Е. Хоренко, В. Прост, Ф. Тегуде. РЭ, **49** (7), 886 (2004).
- [13] J.M. Gering, D.A. Crim, D.G. Morgan, P.D. Coleman. J. Appl. Phys., **61**, 271 (1987).
- [14] E.R. Brown, C.D. Parker, T.C.L.G. Solner. Appl. Phys. Lett., **54**, 934 (1989).
- [15] M.N. Feiginov. Appl. Phys. Lett., **78**, 3301 (2001).
- [16] F.W. Sheard, G. Toombs. Sol. St. Electron., **32**, 1443 (1989).
- [17] J. Genoe, S. Stapleton, O. Berolo. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-38** (9), 2006 (1991).
- [18] J.P. Mattia, A.L. McWhorter, R.J. Aggarwal, F. Rana, E.R. Brown, P. Maki. J. Appl. Phys., **84**, 1140 (1998).
- [19] H.P. Joosten, H.J.M.F. Noteborn, K. Kaski, D. Lenstra. J. Appl. Phys., **70**, 3141 (1991).
- [20] В. Фуско. *СВЧ цепи* (М., Радио и связь, 1990). [Пер. с англ.: V.F. Fusco, *Microwave Circuits: Analysis and Computer-Aided Design* (Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987)].
- [21] С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. *Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии* (М., Высш. шк., 1978).

Редактор Л.В. Беляков

A successive approach to the electron transport in a resonant tunneling diode with thick barriers

N.V. Alkeev, S.V. Averine, A.A. Dorofeev*, P. Velling⁺, E. Khorenko⁺, W. Prost⁺, F.J. Tegude⁺

Institute of Radio Engineering and Electronics
Russian Academy of Sciences,
141190 Fryazino, Russia

* R&D Corporation „Pulsar“,
Moscow, Russia

⁺ Solid State Electronics Department,
Gerhard-Mercator-University,
47057 Duisburg, Germany

Abstract A frequency dependent impedance analysis (0.1–50 GHz) of an InGaAs/InAlAs based resonant-tunnelling diode with 5 nm well and 5 nm barriers shows that the electron transport is mostly sequential but not a coherent one which is in agreement with our estimations. The evaluation possibility of coherent and sequential fraction of the transport mechanisms in RTD by means of frequency dependent diode impedance is discussed.