

# Электрические характеристики интерференционных транзисторов с одним затвором на различных полупроводниковых материалах

© И.И. Абрамов, А.И. Рогачев

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
220027 Минск, Белоруссия

(Получена 19 декабря 2000 г. Принята к печати 14 апреля 2001 г.)

Проведено теоретическое исследование вольт-амперных и частотных характеристик однозатворных интерференционных  $T$ -транзисторов на квантовых проволоках различных полупроводниковых материалов, а именно Si, Ge, GaAs, InAs, GaSb, InSb, GaP, InP. Осуществлен учет двух механизмов рассеяния в модели  $T$ -транзистора с целью оценки их влияния на электрические характеристики приборов. Адекватность предложенной модели проверена путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Приведенные в работе расчеты выполнены с помощью подсистемы моделирования приборов на квантовых проволоках QW-NANODEV.

## Введение

Качественно новые возможности открываются для создания сверхинтегрированных систем твердотельной электроники в связи с разработкой приборных структур на квантовых проволоках [1–3]. С одной стороны, это связано с хорошей совместимостью методов создания таких структур как с отработанной планарной технологией традиционных интегральных схем, так и методами современной нанотехнологии. С другой стороны, ожидается, что приборы на квантовых проволоках будут обладать приемлемыми, а в ряде случаев уникальными, электрическими характеристиками. В частности, недавно было показано, что для интерференционных  $T$ -транзисторов возможно наличие области насыщения на выходных вольт-амперных характеристиках (ВАХ) при малых смещениях на стоке [4]. В результате допустимо их применение как в аналоговых, так и в цифровых нанoeлектронных интегральных схемах. При этом данные приборы могут обладать очень высокими рабочими частотами [4]. По изложенным причинам в ближайшее время, как и для резонансно-туннельных структур [5], одноэлектронных структур [6,7], следует ожидать создание нанoeлектронных интегральных схем, включающих приборы на квантовых проволоках. Экспериментальные образцы таких приборов уже созданы [8].

Цель данной работы — теоретическое исследование с использованием предложенной модели электрических характеристик интерференционных  $T$ -транзисторов с одним затвором на квантовых проволоках различных полупроводниковых материалов и выявление наиболее предпочтительных из них.

## Модель

В данной статье анализируется однозатворная структура интерференционного  $T$ -транзистора [2], приведенная на рис. 1. В качестве основы разработанной модели использовался метод матрицы рассеяния [1,2].

Рассмотрим ключевые модификации в модели по сравнению с [2]. Во-первых, в модели учтена зависимость эффективной массы электрона от геометрических размеров квантовой проволоки и концентрации примеси в ней согласно [9]. Вследствие трансцендентности модели [9] использовался самосогласованный расчет эффективной массы в отличие от [4]. Заметим, что сходимость итерационного процесса достигалась за 5–7 итераций.

Во-вторых, с помощью модели допустим учет механизмов рассеяния, характерных для исследуемых структур. В данной работе использовались модели рассеяния на удаленной заряженной примеси (влияние подложки) и на неоднородностях поверхности квантовой проволоки.

Так, интенсивность рассеяния на удаленной заряженной примеси вычисляется по формуле [10]

$$\tau_r^{-1} = \frac{n_l m^* q^4}{4\pi^2 \hbar^3 (\epsilon \epsilon_0)^2 k_x} K^2 \left[ 2d_0 k_x \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right], \quad (1)$$

где  $n_l$  — линейная концентрация примеси в подложке;  $m^*$  — эффективная масса электрона в квантовой проволоке;  $q$  — заряд электрона;  $\hbar$  — приведенная постоянная Планка;  $\epsilon \cdot \epsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала;  $k_x$  — волновой вектор;  $d_0$  — расстояние между примесным центром и началом координат, расположенным в центре квадратного сечения проволоки;  $\theta$  — угол рассеяния;

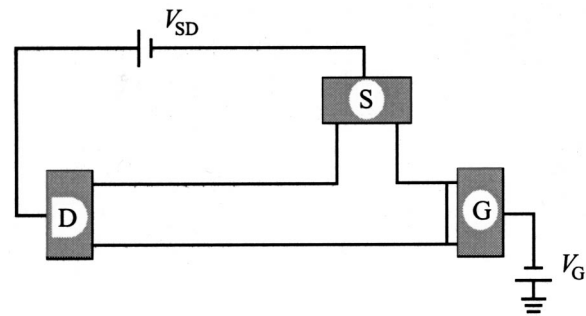


Рис. 1. Однозатворный интерференционный  $T$ -транзистор на квантовой проволоке ( $S$  — исток,  $D$  — сток,  $G$  — затвор).

Параметры исследуемых материалов

Параметр	GaSb	GaP	InP	Ge	Si	GaAs	InAs	InSb
Диэлектрическая постоянная, $\epsilon$	15.7	11.1	12.5	16.2	11.7	12.9	15.15	16.8
Ширина запрещенной зоны, $E_g$ , эВ	0.726	2.26	1.344	0.661	1.12	1.424	0.354	0.17
Продольная эффективная масса электрона, $m_l/m_0$	0.041	1.12	0.08	1.6	0.98	0.063	0.023	0.014
Поперечная эффективная масса электрона, $m_t/m_0$	0.041	0.22	0.08	0.08	0.19	0.063	0.023	0.014
Спин-орбитальное расщепление, $\Delta$ эВ	0.8	0.08	0.11	0.29	0.044	0.34	0.41	0.8

$K$  — модифицированная функция Бесселя второго рода. Интенсивность рассеяния на неоднородностях поверхности квантовой проволоки вычисляется согласно [11]:

$$\tau_{sr}^{-1} = \frac{2\pi^{\frac{9}{2}} \Lambda \Delta^2 \hbar}{m^* L k_x \exp[k_x^2 \Lambda^2 \sin^2(\theta/2)]}. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta$  и  $\Lambda$  — корреляционная длина и средняя амплитуда неоднородностей соответственно;  $L$  — длина квантовой проволоки. Суммарная интенсивность рассеяния определяется из соотношения

$$\tau_{\Sigma}^{-1} = \tau_r^{-1} + \tau_{sr}^{-1}. \quad (3)$$

При учете процессов рассеяния дополнительно использовались следующие допущения. Так как квантовая проволока является существенно одномерной структурой, угол рассеяния  $\theta$  предполагается равным  $\pi$ , что соответствует "полному" рассеянию, а  $d_0$  бралось равным толщине проволоки.

В-третьих, с целью учета влияния механизмов рассеяния на ток стока использовалась не формула Тсу–Есаки, а следующее модифицированное выражение:

$$I_{SD} = \frac{2q}{h} \int_0^{E_F} |t(E, V_G)|^2 D(E) [f(E) - f(E + qV_{SD})] dE, \quad (4)$$

где  $I_{SD}$  — ток стока,  $|t(E, V_G)|^2$  — коэффициент прохождения электронной волны, определяемый с помощью матрицы рассеяния [2],  $V_G$  — напряжение на затворе,  $V_{SD}$  — напряжение на стоке,  $f(E)$  — функция распределения Ферми–Дирака,  $h$  — постоянная Планка,  $E_F$  — энергия Ферми,  $D(E)$  — коэффициент, характеризующий затухание электронной волны вследствие рассеяния, вычисляется с помощью соотношения

$$D(E) = \exp(-\alpha \cdot t_T \cdot \tau_{\Sigma}^{-1}), \quad (5)$$

где  $t_T$  — время пролета носителей заряда через структуру в режиме баллистического транспорта,  $\tau_{\Sigma}^{-1}$  — суммарная интенсивность механизмов рассеяния,  $\alpha$  — постоянный коэффициент, определяемый взаимным влиянием механизмов рассеяния, и, строго говоря, должен идентифицироваться по экспериментальным данным. Время пролета рассчитывается исходя из скорости Ферми и определяется в виде

$$t_T = L \cdot \frac{m^*}{\hbar k_F}, \quad (6)$$

где  $k_F$  — волновой вектор Ферми.

Для однозатворных  $T$ -транзисторов максимальная рабочая частота вычисляется по формуле [2]

$$f_{\max} = \frac{I_{SD}^{\max}}{4\pi q}. \quad (7)$$

Здесь  $I_{SD}^{\max}$  — максимальный ток стока, рассчитываемый согласно (4).

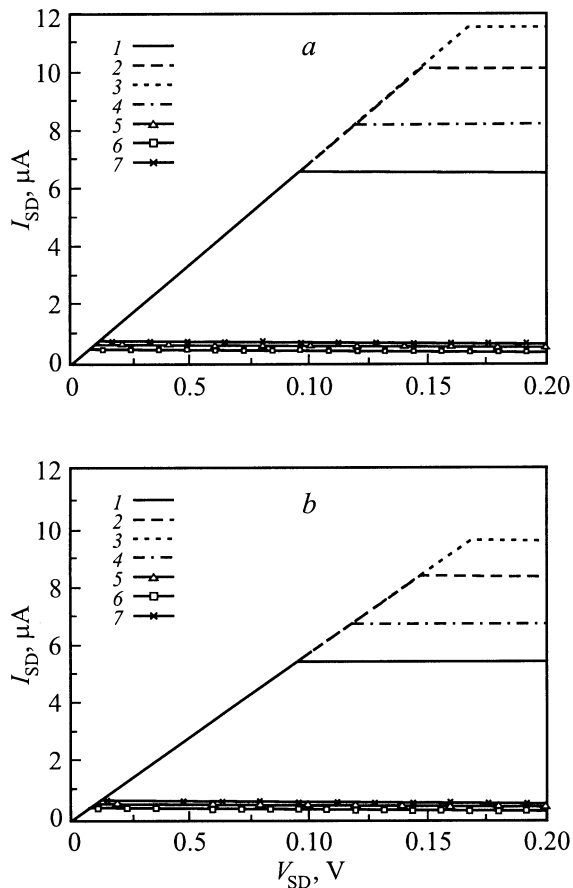
Описанная модель была реализована в подсистеме моделирования приборных структур на основе квантовых проволок QW-NANODEV, входящей в систему моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV на эффектах резонансного, одноэлектронного туннелирования и квантовой интерференции [6].

## Результаты и их обсуждение

Было проведено теоретическое исследование однозатворных интерференционных  $T$ -транзисторов на восьми полупроводниковых материалах. Их основные параметры, использовавшиеся при моделировании, сведены в таблицу [12].

Анализировались структуры с малыми размерами. Длина приборов  $L$  выбиралась равной 100 нм для достаточно сильного проявления квантовых эффектов и снижения влияния механизмов рассеяния. Толщина квантовой проволоки  $d_0$  принималась равной 10 нм для работы транзистора в одномодовом режиме и в полном соответствии с современными возможностями нанотехнологии. Для снижения влияния процессов фононного рассеяния моделирование проводилось для низкой температуры 4.2 К. Зависимость эффективной массы от температуры не учитывалась. Корреляционная длина бралась  $\Delta = 0.3$  нм, а средняя амплитуда неоднородностей  $\Lambda = 0.15$  нм, что соответствует экспериментальным данным для наноразмерных пленок [13]. Концентрация примеси в квантовой проволоке полагалась  $N_c = 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . При этом выбиралась слабо легированная подложка с концентрацией примеси  $N_0 = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Коэффициент  $\alpha$  в формуле (5) в данных теоретических исследованиях принимался равным 1.

На рис. 2 приведены расчетные ВАХ интерференционных  $T$ -транзисторов на различных материалах без учета (рис. 2, *a*) и с учетом рассеяния (рис. 2, *b*) при напряжении на затворе  $V_G = 0.2$  В. Из результатов видно, что для всех материалов получаются области насыщения на стоковых характеристиках транзисторов как в случае



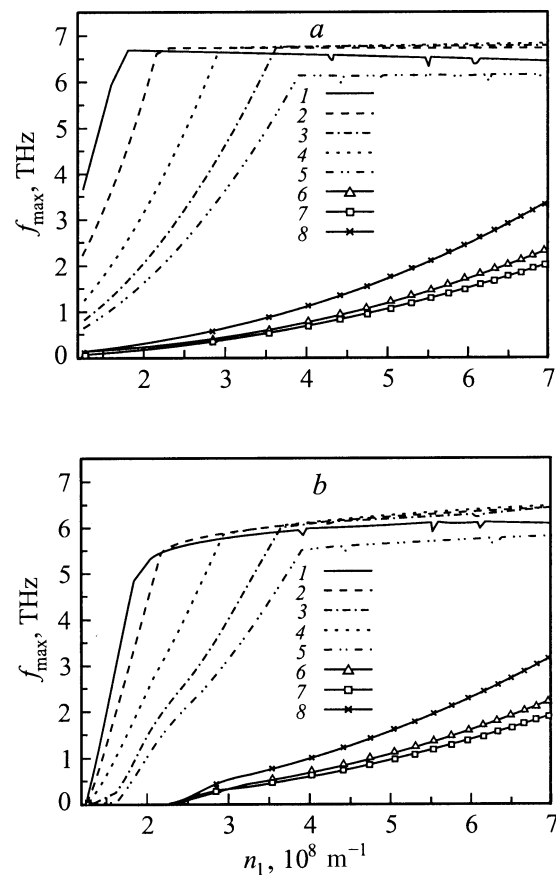
**Рис. 2.** ВАХ однозатворного интерференционного  $T$ -транзистора без учета механизмов рассеяния ( $a$ ) и с учетом рассеяния ( $b$ ). 1 — InSb, 2 — GaSb, InAs, 3 — GaSb, 4 — InP, 5 — Si, 6 — GaP, 7 — Ge.

учета, так и неучета механизмов рассеяния, что хорошо согласуется с результатами работы [4]. Насыщение начинается, когда напряжение на стоке определяется значением энергии Ферми. Из графиков следует, что для всех материалов значения токов стока различаются. Это связано с комплексным влиянием параметров материалов, однако наиболее сильное влияние оказывает именно эффективная масса электрона в квантовой проволоке. С одной стороны, для материалов с малой эффективной массой ( $m^* < 0.1 \cdot m_0$ , где  $m_0$  — масса свободного электрона), таких как GaAs, InAs, GaAs, InSb, InP, возможно получение больших токов, чем в случае использования материалов с "тяжелыми" электронами в квантовой проволоке (Ge, Si, GaP). С другой стороны, для первой группы материалов процессы рассеяния оказывают большее влияние на характеристики приборов, в частности для них наблюдается более значительное снижение величин тока стока (рис. 2,  $b$ ).

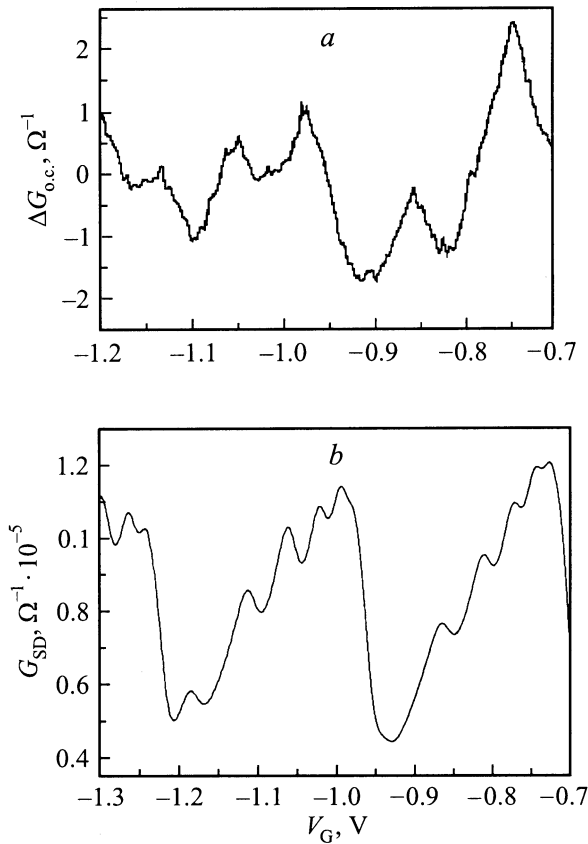
С помощью предложенной модели был проведен расчет максимальной рабочей частоты в зависимости от линейной концентрации примеси в квантовой проволоке для указанных восьми материалов. В отличие от

работы [4] напряжение на затворе принималось равным 0.01 В для минимизации его влияния на частотные характеристики. Кроме того, в данных исследованиях взята большая толщина квантовой проволоки. Для определения степени влияния рассеяния проводилось моделирование без его учета при  $D(E) = 1$  (рис. 3,  $a$ ) и с учетом рассеяния (рис. 3,  $b$ ). Из приведенных графиков видно, что процессы рассеяния наиболее сильно снижают частотные характеристики приборов в области низких концентраций примеси в квантовой проволоке для всех исследуемых материалов. Это связано с тем, что при низких концентрациях примеси доля электронов, претерпевающих рассеяние, становится соизмеримой с общим количеством носителей заряда, участвующих в переносе тока. Это приводит к снижению тока стока практически до нуля, что в свою очередь отражается на частотных характеристиках. Однако отмеченная выше тенденция, согласно которой транзисторы на материалах с меньшей эффективной массой электрона в квантовой проволоке имеют лучшие характеристики, сохраняется и на приведенных частотных зависимостях.

С целью проверки адекватности используемой модели было проведено сравнение результатов моделирования



**Рис. 3.** Частотные характеристики однозатворного интерференционного  $T$ -транзистора без учета механизмов рассеяния ( $a$ ) и с учетом рассеяния ( $b$ ). 1 — InSb, 2 — InAs, 3 — GaAs, 4 — GaSb, 5 — InP, 6 — Si, 7 — GaP, 8 — Ge.



**Рис. 4.** Экспериментальная зависимость [8] изменения проводимости  $T$ -транзистора от напряжения на затворе ( $a$ ), результаты моделирования проводимости структуры ( $b$ ).

не только с результатами расчета [4], но и с экспериментальными данными. К сожалению, в настоящее время экспериментальные результаты для  $T$ -транзисторов с приведенными выше малыми размерами отсутствуют, поэтому для такого исследования была выбрана транзисторная структура работы [8]. Длина и толщина квантовой проволоки в структуре — 8 мкм и 280 нм соответственно. Прибор функционирует в многомодовом режиме (9 мод), материал квантовой проволоки — GaAs. Был проведен расчет проводимости канала исток-сток в зависимости от приложенного к затвору напряжения по известной формуле Ландауэра [2]. В результате было получено хорошее качественное согласование с подобными экспериментальными характеристиками. Данные работы [8] и результаты моделирования приведены на рис. 4,  $a$  и  $b$  соответственно. Более детальное сравнение, к сожалению, невозможно ввиду отсутствия полной информации о структуре [8].

## Заключение

Предложена модель однозатворного интерференционного  $T$ -транзистора на квантовой проволоке, позволяющая учитывать механизмы рассеяния. С помощью

разработанной модели проведен расчет вольт-амперных и частотных характеристик  $T$ -транзисторов на восьми материалах с учетом рассеяния на удаленной заряженной примеси и неоднородностях поверхности. Размеры структуры были выбраны в соответствии с современными возможностями нанотехнологии. Показано, что при использовании материала с низкой эффективной массой электрона в квантовой проволоке возможно получение больших значений тока и максимальной рабочей частоты, чем в случае использования материалов с тяжелыми электронами. В то же время установлено, что учитываемые механизмы рассеяния сильнее влияют на характеристики транзисторов на материалах с низкой эффективной массой электрона в квантовой проволоке. Получено согласование результатов моделирования с экспериментальными данными, подтверждающее допустимость использования разработанной модели для теоретического исследования рассматриваемого типа транзисторов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Республиканских научно-технических программ "Информатика", "Низкоразмерные системы" и "Наноэлектроника".

## Список литературы

- [1] S. Datta. *Superlat. Microstruct.*, **6**, 83 (1989).
- [2] S. Subramaniam, S. Bandyopadhyay, W. Porod. *J. Appl. Phys.*, **68**, 4861 (1990).
- [3] Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **32**, 3 (1998).
- [4] И.И. Абрамов, Ю.А. Берашевич, А.Л. Данилюк. *ЖТФ*, **69**, 130 (1999).
- [5] J.I. Bergman, J. Chang, Y. Joo, B. Matinpour, J. Laskar, N.M. Jokerst, M.A. Brooke, B. Brar, E. Beam, III. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **20**, 119 (1999).
- [6] И.И. Абрамов, Е.Г. Новик. *Численное моделирование металллических одноэлектронных транзисторов* (Минск, Бестпринт, 2000).
- [7] A.C. Irvine, Z.A.K. Durrani, H. Ahmed. *J. Appl. Phys.*, **87**, 8594 (2000).
- [8] J. Appenzeller, Ch. Schoer, Th. Schapers, A. v. d. Hart, A. Forster, B. Lengeler, H. Luth. *Phys. Rev. B*, **53**, 9959 (1996).
- [9] A. Ghoshal, B. Mitra, K.P. Ghatak. *Nuovo Cimento*, **12**, 891 (1990).
- [10] C.-C. Wu, C.-J. Lin. *J. Appl. Phys.*, **83**, 1390 (1998).
- [11] J. Motohisa, H. Sakaki. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 1315 (1992).
- [12] M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev. *Handbook Series on Semiconductor parameters* (London, World Scientific, 1996).
- [13] В.М. Борздов, Ф.Ф. Комаров. *Моделирование электрофизических свойств твердотельных слоистых структур интегральной электроники* (Минск, Изд-во Белорус. ун-та, 1999).

Редактор Л.В. Беляков

## Electrical characteristics of single-gate interference transistors based on various semiconductor materials

I.I. Abramov, A.I. Rahachou

Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics,  
220027 Minsk, Belarus

**Abstract** Results of theoretical investigations of electrical characteristics of single-gate interference  $T$ -transistors based on various semiconductor materials Si, Ga, GaAs, InAs, GaSb, InSb, GaP, InP are presented. An account of scattering mechanisms in a  $T$ -transistor model was carried out alongside with an estimate of their influence on characteristics for various materials. The adequacy of the model suggested has been checked by means of a comparison of the simulation results with experimental data, the results being obtained using simulation subsystem QW-NANODEV for quantum wires based devices.