

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОКАХ

А. В. Борздов, В. М. Борздов, В. В. Милошевский

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: borzdov@bsu.by

Представлены результаты численного моделирования процессов нелинейного переноса электронов в GaAs-квантовой проволоке при воздействии внешнего гармонического электрического поля. Моделирование проведено в рамках самосогласованного подхода на основе многочастичного метода Монте-Карло. Показано, что нелинейность процессов переноса электронов в структуре может быть использована для генерации электрических колебаний терагерцового диапазона. Численное моделирование позволяет оценивать эффективность генерации кратных гармоник в квантовой проволоке при заданных внешних условиях и конструктивных параметрах структуры.

Ключевые слова: квантовая проволока; метод Монте-Карло; нелинейный перенос.

Современные технологии позволяют создавать полупроводниковые приборные структуры очень малых размеров различной геометрии. В частности, большой интерес представляют полупроводниковые структуры с квазиодномерным электронным газом, или квантовые проволоки, являющиеся перспективными для разработки элементов наноэлектроники. Разработка новых приборов для наноэлектроники является непростой задачей, требующей численного моделирования их электрофизических свойств и электрических характеристик. Одним из наиболее эффективных методов моделирования является метод Монте-Карло [1, 2]. Данный метод является мощным средством для исследования процессов переноса носителей заряда в полупроводниковых приборных структурах, а также изучения различных режимов работы приборов на основе таких структур. Применительно к квантовым проволокам метод Монте-Карло особенно эффективен, когда определяющее влияние на перенос оказывают процессы рассеяния, хотя применение метода не ограничивается только этим случаем, а возможно и для моделирования структур с баллистическим переносом носителей заряда. В тонких и достаточно длинных квантовых проволоках на основе GaAs наиболее важными механизмами рассеяния носителей заряда являются рассеяние на шероховатостях поверхностей и границ раздела материалов, акустических и полярных оптических фононах, а также ионизированной легирующей примеси. Ранее интенсивности рассеяния электронов в GaAs-квантовых проволоках исследовались нами в работах [3–6]. В частности, в этих работах были получены выражения для интенсивностей рассеяния элек-

тронов на акустических и полярных оптических фононах в прямоугольных квантовых проволоках с учетом столкновительного уширения в приближении первого порядка. Модель процесса рассеяния электронов на шероховатостях поверхности и границах раздела с учетом столкновительного уширения представлена в [6, 7].

Особое внимание уделяется изучению нелинейных эффектов в процессах переноса носителей заряда в полупроводниковых приборных структурах. Исследования нелинейных эффектов, связанных с процессами переноса носителей заряда в объемных полупроводниках и приборных структурах на их основе при воздействии достаточно сильных внешних переменных электрических полей, проводились, в частности, с помощью многочастичного метода Монте-Карло в работах [8, 9]. С помощью вычислительного эксперимента показана возможность использования нелинейных эффектов для генерации колебаний терагерцового диапазона в таких полупроводниковых структурах. С этой точки зрения определенный интерес для исследователей представляют также полупроводниковые квантовые проволоки. Так, авторами [10] была рассмотрена возможность использования кремниевой квантовой проволоки с длиной канала порядка 200 нм для генерации колебаний терагерцового диапазона, обусловленной особенностями процессов баллистического переноса электронов.

В данной работе с помощью самосогласованного моделирования на основе многочастичного метода Монте-Карло исследованы особенности нелинейного переноса электронов в GaAs квантовой проволоке при воздействии внешнего гармонического электрического поля. Рассмотрено приближение бесконечно длинной квантовой проволоки, когда характер переноса электронов определяется процессами их рассеяния. Результаты моделирования на основе многочастичного метода Монте-Карло позволяют оценить эффективность генерации электрических колебаний терагерцового диапазона в проволоке, а также определить необходимые параметры для создания оптимальных условий генерации [11, 12].

Рассматриваемая в данной работе транзисторная структура схематически представлена на рис. 1. Она представляет собой GaAs-квантовую проволоку прямоугольного сечения размером 10×10 нм² в матрице AlAs с алюминиевым затвором. Толщина барьерного слоя AlAs составляет 5 нм.

Для расчета электронных состояний в структуре самосогласованно решается система двумерных уравнений Пуассона и Шредингера в плоскости квантования XY. Перенос электронов происходит в направлении Z под действием электрического поля, направленного вдоль этой оси. При моделировании переноса учитывается рассеяние электронов на

акустических и полярных оптических фононах, а также на шероховатостях границы раздела GaAs/AlAs с учетом столкновительного уширения (провода предполагается не легированной).

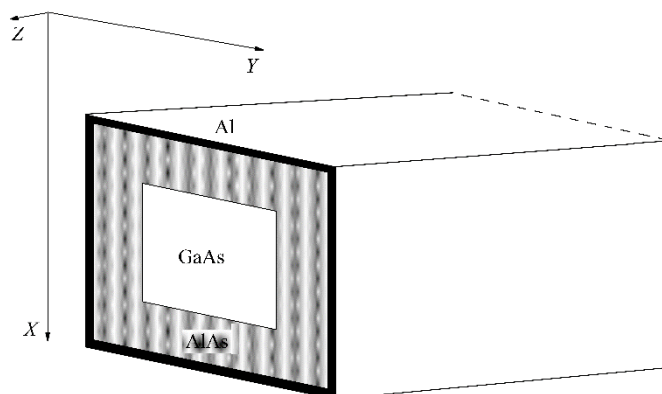


Рис. 1. Поперечное сечение моделируемой квантовой проволоки

Для рассеяния на шероховатостях границы раздела были взяты следующие параметры: средняя амплитуда шероховатостей — 0,5 нм, длина корреляции — 6 нм. Температура моделирования — 300 К. Зависимость напряженности переменного продольного электрического поля от времени $E(t)$ имеет следующий вид:

$$E(t) = E_m \sin(2\pi ft),$$

где E_m — амплитуда напряженности, f — частота, t — время.

Перенос электронов в проволоке носит нелинейный характер прежде всего за счет особенностей фоновых процессов рассеяния и перезаселения электронных подзон размерного квантования. При воздействии внешнего гармонического электрического поля в зависимости дрейфовой скорости электронов от времени появляются составляющие, соответствующие частотам, кратным основной частоте f . Это обстоятельство может быть использовано для генерации электрических колебаний с частотами, кратными основной. Эффективность генерации кратных гармоник с интенсивностью I_k относительно основной I_1 , может быть оценена в соответствии с моделью, предложенной в [9, 10].

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости эффективностей генерации трех кратных гармоник с индексами $k = 3, 5$ и 7 от амплитуды напряженности продольного электрического поля (в отсутствие постоянной составляющей электрического поля присутствуют только нечетные гармоники). Основная частота $f = 0.2$ ТГц. Для третьей гармоники, соответствующей частоте 0.6 ТГц, в рассмотренном диапазоне амплитуды электрического поля наблюдается практически монотонный рост эф-

фективности генерации, в то время как для пятой и седьмой гармоник, соответствующих частотам 1 и 1.4 ТГц, существует максимум данной зависимости.

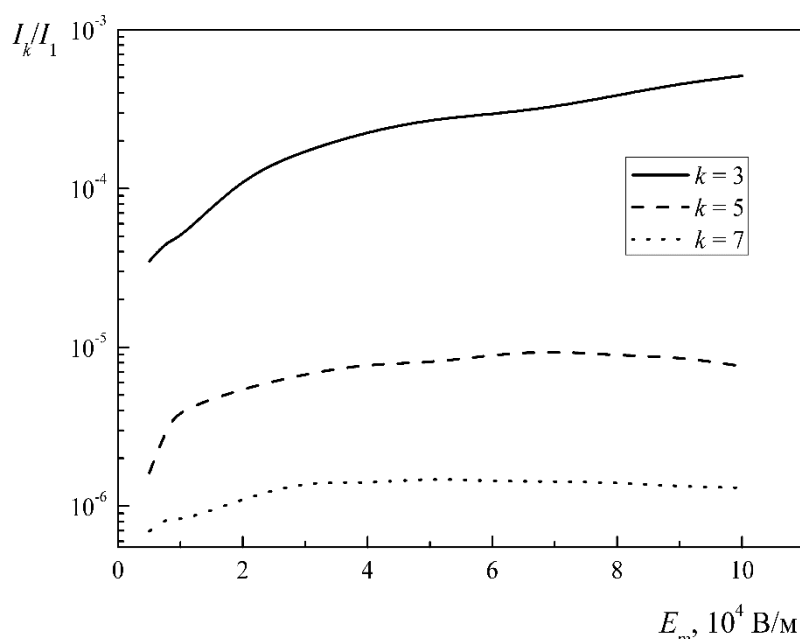


Рис. 2. Эффективность генерации кратных гармоник в квантовой проволоке

Результаты расчетов показывают, что эффективность генерации гармоник в квантовой проволоке ниже, чем в объемном полупроводнике при одинаковых значениях амплитуды напряженности поля. При этом мы ограничились максимальным значением амплитуды 105 В/м, поскольку рассмотренная в данной работе модель переноса электронов включает только нижайшую Г-долину GaAs. Для более сильных электрических полей учет высших долин является необходимым. Тем не менее, в данных условиях результаты численного моделирования, полученные с помощью использованной модели, позволяют сделать вывод о возможности генерации электрических колебаний в квантовой проволоке и оценить оптимальные условия для этого процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Hess E. K. Monte Carlo device simulation: full band and beyond. Boston: Kluwer Academic publishers, 1991. 310 p.
2. Jacoboni C., Lugli P. The Monte Carlo method for semiconductor device simulation. Wien: Springer-Verlag, 1989. 357 p.
3. Borzdov A. V., Pozdnyakov D. V., Galenchik V. O. et al. Self-consistent calculations of phonon scattering rates in the GaAs transistor structure with one-dimensional electron gas // Phys. Status Solidi (b). 2005. Vol.242, No.15. P. R134–R136.

4. Борздов А. В., Поздняков Д. В. Рассеяние электронов в транзисторной структуре GaAs/AlAs // ФТТ. 2007. Т. 49, вып. 5. С. 913–916.
5. Борздов А. В., Поздняков Д. В., Борздов В. М. и др. Моделирование влияния поперечного электрического поля на дрейфовую скорость электронов в GaAs квантовой проволоке // Микроэлектроника. 2010. Т. 39, № 6. С. 436–442.
6. Pozdnyakov D., Borzdov A., Borzdov V., Labunov V. Calculation of electrophysical parameters of thin undoped GaAs-in-Al₂O₃ quantum nanowires and single-wall arm-chair carbon nanotubes Proc. SPIE: Micro- and Nanoelectronics 2009. 2010. Vol. 7521. P. 75210S-1–75210S-9.
7. Pozdnyakov D. Influence of surface roughness scattering on electron low-field mobility in thin undoped GaAs-in-Al₂O₃ nanowires with rectangular cross-section // phys. stat. sol. (b). 2010. V. 247, No. 1. P. 134–139.
8. Persano Adorno D., Zarccone M., Ferrante G. Far-infrared harmonic generation in semiconductors: A Monte Carlo simulation // Laser Physics. 2000. V. 10, No. 1. P. 310–315.
9. Persano Adorno D., Capizzo M. C., Zarccone M. Monte Carlo simulation of harmonic generation in GaAs structures operating under large-signal conditions // J. Comput. Electron. 2007. No. 6. P. 27–30.
10. Fedichkin L., V'yurkov V. Quantum ballistic channel as an ultrahigh frequency generator // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 2535–2536.
11. Borzdov A. V., Borzdov V. M., Labunov V. A. Monte Carlo simulation of terahertz harmonic generation in GaAs quantum wire structure // International Journal of Materials. 2017. V. 4. P. 70–73.
12. Borzdov A. V., Borzdov V. M., Labunov V. A., V'yurkov V. V. Efficiency of terahertz harmonic generation in GaAs quantum wire structure: a Monte Carlo simulation // Proc. SPIE. 2019. V. 11022. P. 11022L-1–11022L-5.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛОСОВОГО РАДИОЧАСТОТНОГО ФИЛЬТРА НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Д. А. Бучинский, А. М. Огурцов, С. Н. Семенович

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
E-mail: buchynskiDA@bsu.by, ogurtsov@bsu.by, semenovich@bsu.by

Предложена методика экспериментальных испытаний параметров полосового фильтра радио тракта наноспутника с использованием программно-аппаратного физического моделирования виртуального векторного анализатора цепей в интегрированной среде разработки LabVIEW (IDE). Создана автоматизированная система натурных научных исследований – программно-аппаратный комплекс на базе контрольно-измерительных средств и вычислительной техники. Проведённые измерения позволили определить соответствие изготовленного образца и спроектированной модели. Произведена корректировка параметров фильтра для обеспечения максимальной чувствительности и помехозащищённости приёмного тракта и оценки уровня подавления гармоник высших порядков при передаче радио сигнала от бортового передатчика.