

## Характеристики тока в полупроводниковой сверхрешетке в присутствии возмущения концентрации легирующей примеси различной формы

А. Г. Баланов<sup>1,3</sup>, А. А. Короновский<sup>1,2</sup>, О. И. Москаленко<sup>1,2</sup>, А. О. Сельский<sup>1,2</sup>,\* А. Е. Храмов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра физики открытых систем  
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., кафедра автоматизация, управление, мехатроника  
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

<sup>3</sup>Loughborough University, Department of Physics. Loughborough LE11 3TU

Полупроводниковые сверхрешетки — сложные наноструктуры, состоящие из нескольких чередующихся тонких ( $\sim 10$  нм) слоев различных полупроводниковых материалов, которые возможно использовать для генерации и управления высокочастотными колебаниями. В последнее время большой интерес представляет исследование данных наноструктур с позиций нелинейной динамики. В настоящей работе рассмотрено, как динамика электронов в сверхрешетке, определяющая характеристики тока, изменяется в присутствии возмущений концентрации легирующей примеси.

PACS: 73.21.Cd, 72.20.Ht.

УДК: 530.182:621.385.6.

Ключевые слова: нелинейная динамика, нано-гетероструктуры, концентрация легирующей примеси.

Полупроводниковые сверхрешетки — сложные наноструктуры, состоящие из нескольких чередующихся тонких ( $\sim 10$  нм) слоев различных полупроводниковых материалов, которые возможно использовать для генерации и управления высокочастотными колебаниями [1, 2]. В последнее время большой интерес представляет исследование подобных наноструктур с позиций нелинейной динамики [3, 4]. Ранее было показано, что большое влияние на электронную динамику в сверхрешетках оказывают наклонное магнитное поле [3, 4], температура [5], и межминизонное туннелирование [6]. В настоящей работе рассмотрено, как динамика электронов в сверхрешетке, определяющая характеристики тока, изменяется в присутствии возмущений концентрации легирующей примеси.

Для моделирования процессов в полупроводниковой сверхрешетке будем использовать численную схему, подробно описанную в [2, 5], состоящую из уравнений Пуассона и непрерывности с учетом дрейфового приближения. В данной модели при достаточно большом значении напряжения, приложенного к наноструктуре (пороговое значение), возникает генерация электронных доменов, вызывающих высокочастотные колебания тока. Для построения вольт-амперных характеристик в области колебаний тока используется усредненное по времени значение тока [5]. На зависимости тока от напряжения генерация доменов характеризуется падающим участком.

Как правило, при моделировании процессов в полупроводниковых сверхрешетках используется постоянная концентрация легирующей примеси,  $n_D$ . Будем рассматривать случай, когда концентрация изменяется вдоль оси сверхрешетки, так как показано на рис. 1а. На профиле концентрации легирующей примеси вдоль оси сверхрешетки на длине  $L = 115.4$  нм наблюда-

ется возмущение постоянного значения концентрации  $n_{D0}$ . Данное возмущение можно охарактеризовать тремя параметрами: пространственной локализацией возмущения (в рамках данной работы центр возмущения находится в одной и той же точке для всех характеристик тока); превышением концентрации  $n_D$  относительно постоянного значения концентрации  $n_{D0}$ ,  $h$  (также можно говорить о высоте возмущения) и шириной возмущения  $w$ .

На рис. 1б можно видеть, как изменяется зависимость тока от напряжения с ростом ширины возмущения, от кривой 1 ( $W = 0$ , возмущения нет) к кривой 4 ( $w = 0.35$ ). С ростом ширины возмущения пороговое значение напряжения увеличивается. Максимальный ток, протекающий через структуру, также увеличивается. Аналогичный эффект заметен при увеличении высоты возмущения, рис. 1в. Однако, особый интерес вызывает то, что характеристики тока почти не изменяются если при изменении концентрации легирующей примеси выполняется условие  $h \times w = \text{const}$ , что соответствует сохранению площади профиля возмущения, рис. 1г.

Таким образом в настоящей работе показано, что при введении возмущения концентрации легирующей примеси характеристики тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, изменяются. Показано, что величина изменений характеристик связана с параметрами возмущения, при этом при выполнении условия  $h \times w = \text{const}$ , что соответствует сохранению площади профиля возмущения, характеристики тока практически не изменяются при различных параметрах возмущения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-32-60059, № 16-32-80125).

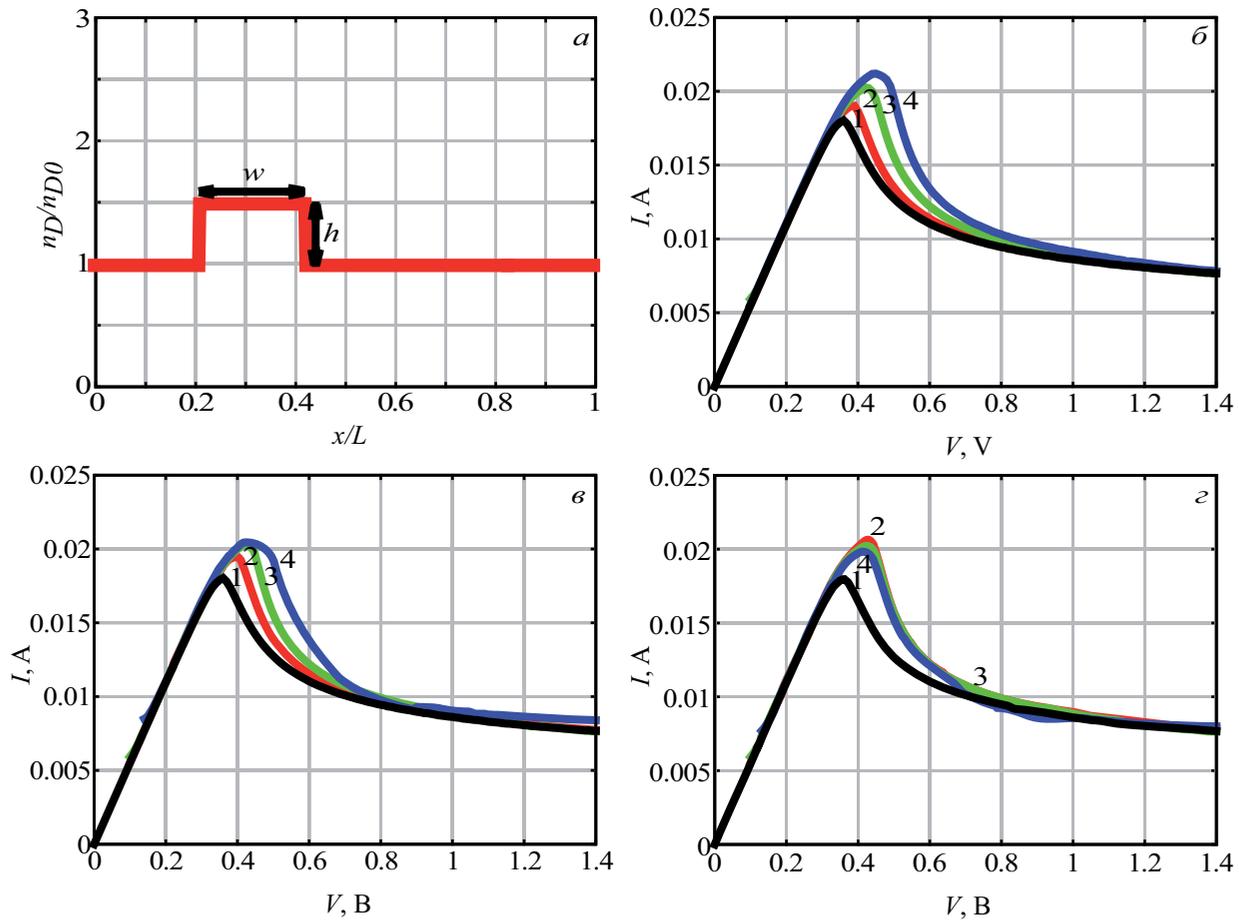


Рис. 1: (а — Пример профиля возмущения концентрации легирующей примеси в полупроводниковой сверхрешетке при значении параметров  $h = 0.5$ ,  $W = 0.21$ . (б–з) Зависимости среднего тока от напряжения, приложенного к полупроводниковой сверхрешетке при различных параметрах возмущения: кривая 1 — в отсутствие возмущения; б: 2 —  $h = 0.5$ ,  $w = 0.07$ , 3 —  $h = 0.5$ ,  $w = 0.21$ , 4 —  $h = 0.5$ ,  $w = 0.35$ ; в: 2 —  $h = 0.25$ ,  $w = 0.21$ , 3 —  $h = 0.5$ ,  $w = 0.21$ , 4 —  $h = 1$ ,  $w = 0.21$ ; з: 2 —  $h = 0.3$ ,  $w = 0.35$ , 3 —  $h = 0.5$ ,  $w = 0.21$ , 4 —  $h = 1.5$ ,  $w = 0.07$

[1] Esaki L., Tsu R. IBM J. Res. Develop. **14**. P. 61. (1970).

[2] Wacker A. Phys. Rep. **357**. P. 1. (2002).

[3] Greenaway M. T. et al. Phys. Rev. B. **80**. P. 205318. (2009).

[4] Alexeeva N. et al. Phys. Rev. Lett. **109**. P. 024102.

(2012).

[5] Selskii A. O. et al. Phys. Rev. B. **84**. P. 235311. (2011).

[6] Сельский А. О. и др. ЖТФ. **85**, № 4. С. 62. (2015).

## The current characterizations on the semiconductor superlattice with perturbation of the doping concentration from different shape

A. G. Balanov<sup>1,3</sup>, A. A. Koronovskii<sup>1,2</sup>, O. I. Moskalenko<sup>1,2</sup>, A. O. Selskii<sup>1,2,a</sup>, A. E. Hramov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Open Systems Physics, Faculty of Nonlinear Processes, Saratov State University. Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>Department of automation, control and mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov Saratov 410054, Russia

<sup>3</sup>Loughborough University, Department of Physics. Loughborough LE11 3TU  
E-mail: <sup>a</sup>jeanorberserk@gmail.com

The semiconductor superlattice is a compound nanostructures is consist on the several thin layers of different semiconductor materials, that can be used for generation and control of the high-frequency oscillations. At the last time to be of interest the investigation of this structure in the context of the nonlinear dynamics. In this work we consider changes of the electron dynamic is defined the current characterizations for different shape of the perturbation of the doping concentration.

PACS: 73.21.Cd, 72.20.Ht.

Keywords: nonlinear dynamics, nano-heterostructures, doping concentration.

#### Сведения об авторах

1. Баланов Александр Геннадьевич — канд. физ.-мат. наук, Lecturer in Physics; тел.: +44 (0) 1509 22 7112, e-mail: a.balanov@lboro.ac.uk.
2. Короновский Алексей Александрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (452) 51 45 40, e-mail: alexey.koronovskii@gmail.com.
3. Москаленко Ольга Игоревна — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (452) 51 45 40, e-mail: o.i.moskalenko@gmail.com.
4. Сельский Антон Олегович — аспирант; тел.: (452) 51 45 40, e-mail: feanorberserk@gmail.com.
5. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (452) 51 45 40, e-mail: hramovae@gmail.com.