

Моделирование транспорта заряда в цепочке полупроводниковых периодических наноструктур, разделенных сильнолегированными областями

В. А. Максименко^{1,2,*}, В. В. Макаров^{1,2}, А. А. Короновский^{1,2}, А. Е. Храмов^{1,2}, К. Н. Алексеев³, А. Г. Баланов³

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,
Россия, 410054, Саратов, Политехническая, 77

²Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83

³Университет города Лафборо, Великобритания, Лестершир, Лафборо, LE11 3TU

Предложена математическая модель для описания коллективного транспорта заряда в полупроводниковой гетероструктуре, представляющей собой цепочку полупроводниковых сверхрешеток, разделенных сильнолегированными областями. При помощи предложенной модели рассмотрена динамика данной структуры в режиме последовательной реинжекции доменов заряда из сверхрешетки в сверхрешетку.

PACS: 72.20.Ht, 05.45.-a, 73.21.-b, 03.65.Sq

УДК: 530.182:621.385.6

Ключевые слова: полупроводниковая гетероструктура, доменный транспорт, полуклассический подход, реинжекция домена.

Исследование полупроводниковых гетероструктур является перспективным направлением современной физики твердого тела, связанным как с выявлением фундаментальных закономерностей динамики отдельных заряженных частиц [1] и коллективного транспорта заряда [2], так и решением широкого круга прикладных задач по оптимизации существующих [3,4] и разработке новых твердотельных приборов электроники суб-ТГц и ТГц-диапазонов частот [5,6].

В настоящей работе рассматривается гетероструктура, представляющая собой N полупроводниковых сверхрешеток, разделенных областями сильнолегированного проводника. Подобные модели, в частности, структура, состоящая из $N=34$ сверхрешеток InAs-AlSb [7], и структура, основанная на сверхрешетках GaAs-AlGaAs [8], исследовались экспериментально и теоретически как системы, в которых возможна реализация терагерцового излучения за счет когерентных блоховских колебаний. При этом, нестационарный режим транспорта заряда, обусловленный эффектом Ганна, не рассматривался. В тоже самое время, согласно работам [9], нестационарный режим транспорта заряда (доменный транспорт) может быть также использован для генерации суб-ТГц и ТГц колебаний тока. Кроме того, в работе [10], установлено, что переход домена из одной среды в другую сопровождается нелинейными эффектами, влияющими на мощность возникающих колебаний тока. С учетом этого, исследование процессов коллективного транспорта заряда через гетероструктуру, состоящую из слоев полупроводника с различными свойствами, является интересным с позиций нелинейной динамики и прикладной физики.

На рис.1. представлена модель полупроводниковой гетероструктуры, состоящей из N сверхрешеток $SL_1 \dots SL_N$, разделенных слоями сильнолегированного полупроводника $H_1 \dots H_{N-1}$ ($n_H/n_d \sim 3$).

Значения n_C , n_D , n_H определяют равновесную концентрацию носителей заряда на эмиттере и коллекторе структуры, в сверхрешетках и в областях полупроводника H , соответственно L_C , L_D , L_H определяют длины этих областей.

Рассматриваемые в данном случае сверхрешетки представляют собой периодические структуры GaAs-AlGaAs с сильносвязанными квантовыми ямами (период сверхрешетки меньше чем длина волны электрона). Согласно работам [11,12], коллективная динамика носителей заряда в подобных сильносвязанных структурах, в рамках полуклассического приближения, может быть описана при помощи системы уравнений гидродинамики

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} &= -\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} (n - n_0), \\ \frac{\partial n}{\partial t} &= -\frac{1}{e} \frac{\partial J}{\partial x}. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом, для вычисления плотности тока необходимо использовать нелинейную зависимость средней дрейфовой скорости носителей заряда от напряженности электрического поля

$$J_{SL} = en \frac{\delta \Delta d}{2\hbar} \frac{eFd\tau/\hbar}{1 + (eFd\tau/\hbar)^2}. \quad (2)$$

Как было показано в работе [10], динамика носителей заряда в сильнолегированных полупроводниках может быть также описана при помощи системы (1), где плотность тока определяется на основании теории Друде [13] как

$$J_{C,H} = \frac{e^2 n \tau F}{m^*}. \quad (3)$$

Таким образом, интегрируя уравнения (1), (2), с учетом $n_0 = n_D$, вместе с уравнениями (1), (3), где $n_0 = n_C$ (для контактов) и $n_0 = n_H$ (для слоев сильнолегированного полупроводника), можно описать транспорт заряда через всю структуру.

*E-mail: maximenkov1@gmail.com

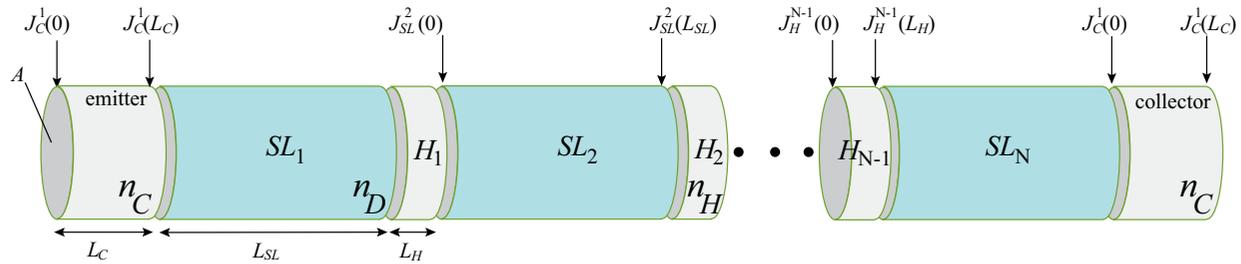


Рис. 1: Схематическое изображение полупроводниковой гетероструктуры, состоящей из полупроводниковых сверхрешеток GaAs-AlGaAs ($SL_1 \dots SL_N$), разделенных сильнолегированными областями ($H_1 \dots H_{N-1}$). n_C , n_D , n_H — равновесная концентрация носителей заряда на контактах, в сверхрешетках (SL) и в областях (H), A — площадь поперечного сечения, J — плотность тока.

На основании данного подхода в настоящей работе исследуется нестационарная динамика коллективного транспорта носителей заряда через полупроводниковую гетероструктуру и проводится анализ влияния ширины слоев полупроводника H на характеристики генерации. В частности, показана возможность работы данной связанной структуры в режиме последовательной реинжекции доменов заряда из сверхрешетки в сверх-

решетку, что может позволить увеличить мощность генерируемых колебаний.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-32-20299) и Фонда некоммерческих программ «Династия».

- [1] *Selskii A. O. et al.* Phys. Rev. B. **84**. P.235311. (2011).
 [2] *Koronovskii A. A. et al.* Phys. Rev. B. **88**. P.165304. (2013).
 [3] *Eisele H. et al.* IEEE TransMicrow. Theory. **48**. P. 626. (2000).
 [4] *Kamoua R.* Solid-State Electronics. **38**, N2. P. 269. (1995).
 [5] *Eisele H., Kamoua R.* IEEE TransMicrow. Theory. 52. P.2371. (2004).
 [6] *Hyart T. et al.* Phys. Rev. Lett. **102**. P.140405. (2009).
 [7] *Savvidis P. G.* Phys. Rev. Lett. **92**. P.196802. (2004).

- [8] *Schmidt J. C.* Superlattices and Microstructures. **52**. P. 1143. (2012).
 [9] *Schomburg E. et al.* Appl. Phys. Lett. **74**. P. 2179. (1999).
 [10] *Maksimenko V. A. et al.* Europhysics Letters. **109**. P. 47007. (2015).
 [11] *Fromhold T. M. et al.* Nature. **428**. P.726. (2004).
 [12] *Esaki L., Tsu R.* IBMJ. Res. Dev. **14**. P. 61. (1970).
 [13] *Drude P.* Ann. Phys. **306**. P. 566. (1900).

The stimulation of charge transport through the chain of semiconductor superlattices divided by the heavy doped regions

V. A. Maksimenko^{1,2,a}, V. V. Makarov^{1,2}, A. E. Hramov^{1,2}, A. A. Koronovskii^{1,2}, K. N. Alekseev³,
 A. G. Balanov³

¹Gagarin State technical university of Saratov, Saratov, 410054, Russia

²Saratov State University, Saratov, 410014, Russia

³Loughborough University, Leicestershire, UK, LE11 3TU

E-mail: ^amaximenkool@gmail.com

We proposed the mathematical model for the collective dynamics of charge in a semiconductor heterostructure which presents itself as a chain of semiconductor superlattices divided by heavy doped regions. Using the developed model we considered this structure operated in a mode characterized by the reinjection of charge domains from one superlattice to another.

PACS: 72.20.Ht, 05.45.-a, 73.21.-b, 03.65.Sq.

Keywords: semiconductor heterostructure, domain transport, semiclassical approach, domain reinjection.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Максименко Владимир Александрович — заведующий лабораторией «Геоинформационное и сетевое моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.; тел.: 7(905)3248118, e-mail: maximenkovl@gmail.com.
2. Макаров Владимир Владимирович — младший научный сотрудник НОЦ "Нелинейная динамика сложных систем" Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.; тел.: 7(905)0331215, e-mail: vladmak404@gmail.com.
3. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник НОЦ "Нелинейная динамика сложных систем" Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.; тел.: 7(8452) 99-85-54, e-mail: hramovae@gmail.com.
4. Короновский Алексей Александрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, начальник Научно-исследовательской части Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского; тел.: 7 (8452) 51-72-06, e-mail: alexey.koronovskii@gmail.com.
5. Алексеев Кирилл Николаевич — канд. физ.-мат. наук, лектор физического факультета университета Лафборо; тел.: 44(0) 1509 223311, e-mail: K.Alekseev2@lboro.ac.uk.
6. Баланов Александр Геннадьевич — канд. физ.-мат. наук, лектор физического факультета университета Лафборо; тел.: 44(0) 1509 227112, e-mail: A.Balanov@lboro.ac.uk.