

Модель для исследования пространственно–временной динамики заряда в полупроводниковых сверхрешетках с омическими контактами

В. А. Максименко^{1,3,*}, А. А. Короновский^{1,3}, В. В. Макаров³,
О. И. Москаленко^{1,3}, К. Н. Алексеев², А. Г. Баланов^{2,3}, А. Е. Храмов^{1,3}

¹Саратовский Государственный Университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, д. 83

²Department of Physics, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, United Kingdom

³Саратовский Государственный Технический Университет имени Ю. А. Гагарина
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Предложена математическая модель для исследования пространственно-временной динамики концентрации носителей заряда на омических контактах полупроводниковой наноструктуры (сверхрешетки). При помощи разработанной модели изучены процессы перехода электронного домена, образовавшегося в полупроводниковой структуре GaAs–AlGaAs, в область коллекторного контакта и рассмотрено влияние параметров контакта на характеристики генерации.

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

УДК: 530.182:621.385.6.

Ключевые слова: полупроводниковая сверхрешетка, полуклассический подход, доменная генерация.

В последнее время исследование полупроводниковых наноструктур (сверхрешеток) [1] представляет большой интерес в контексте проектирования приборов и устройств суб–ТГц и ТГц диапазона частот [2, 3]. Известно, что в подобных периодических структурах возможна реализация доменного транспорта, сопровождающегося возникновением высокочастотных (до нескольких сотен ГГц) колебаний тока [4]. Кроме того, большое количество нелинейных явлений, сопровождающих транспорт заряда через полупроводниковую сверхрешетку, делают её важным объектом для изучения фундаментальных нелинейно-динамических закономерностей физики твердого тела [1, 5].

Следует отметить, что в реальных устройствах и экспериментальных установках на основе сверхрешетки на динамику полупроводниковой структуры влияет электродинамическая цепь, образованная омическими контактами эмиттера и коллектора, что оказывает существенное воздействие на характеристики доменного транспорта. В частности, наличие внешней электродинамической структуры обуславливает формирование паразитных резонансных контуров, которые могут приводить к появлению дополнительного участка отрицательной дифференциальной проводимости [6] и, в ряде случаев, к усложнению режимов колебаний тока [7].

Таким образом, детальное изучение процессов транспорта заряда на омических контактах полупроводниковой сверхрешетки представляется важным как с фундаментальной точки зрения, так и для решения различных прикладных задач. В то же время, процессы накопления и сброса заряда на контактах полупроводниковой сверхрешетки, а также их влияние на характеристики генерации на настоящий момент изучены слабо и в большинстве работ учитывается только падение напряжения на контактах в рамках приближенной мо-

дели [8].

В настоящей работе представлена математическая модель, описывающая пространственно-временную динамику заряда в сильносвязанной полупроводниковой сверхрешетке с протяженными омическими контактами эмиттера и коллектора. Модель основана на решении самосогласованной системы дифференциальных уравнений непрерывности и Пуассона как для полупроводниковой структуры, так и для сильнолегированных контактов с граничными условиями

$$\begin{aligned} J_c^1(L_c, t) &= J_{SL}(0, t), \\ J_c^2(0, t) &= J_{SL}(L_{SL}, t), \end{aligned} \quad (1)$$

соответствующими выполнению закона сохранения заряда, где $J_c^1(x, t)$, $J_{SL}(x, t)$, $J_c^2(x, t)$ — плотность тока, текущего через контакт эмиттера, сверхрешетку и контакт коллектора, соответственно, $L_c = 50$ нм — длина контактов, $L_{SL} = 115,2$ нм — длина полупроводникового образца.

Для определения величины плотности тока используется дрейфовое приближение

$$J(x) = en(x)v_d(F), \quad (2)$$

где $v_d(F)$ определяет дрейфовую скорость носителей заряда в веществе для $e > 0$ (e — заряд электрона).

Для моделирования движения носителей заряда в минизоне сильносвязанной полупроводниковой сверхрешетки используется зависимость, описанная в одной из первых работ, посвященных изучению полупроводниковых периодических наноструктур [9].

$$v_d^{SL}(F) = \frac{\delta\Delta}{2e\tau_{SL}} \cdot \frac{F}{F^2 + \hbar^2/(e^2d^2\tau_{SL}^2)}. \quad (3)$$

В данном случае $\Delta = 19,1$ МэВ — ширина энергетической минизоны, $d = 8,3$ нм — период полупроводниковой структуры, $\tau_{SL} = 250$ фс — время рассеяния

*E-mail: maximenkov1@gmail.com

носителей заряда в полупроводнике, $\delta = 1/8,5$ — параметр, характеризующий рассеяние носителей заряда.

Для вычисления дрейфовой скорости носителей заряда на сильнолегированных контактах используется формула Друде

$$v_d^C(F) = \frac{e\tau_C}{m} F, \quad (4)$$

где $\tau_C = 90$ фс — время рассеяния носителей заряда на контактах, m — эффективная масса электрона. Параметры полупроводниковой сверхрешетки и контактов были выбраны согласно экспериментальным работам [7, 10].

При помощи предложенной модели исследована пространственно-временная динамика концентрации

носителей заряда в области коллекторного контакта и изучены процессы перехода образовавшегося в полупроводниковой сверхрешетке домена в сильнолегированную коллекторную область. В работе также рассмотрено влияние параметров коллекторного контакта (проводимость материала) на характеристики (частоту и мощность) доменной генерации полупроводниковой наноструктуры.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-33071), Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-345.2013.2), программой поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-828.2014.2) и Фонда «Династия».

- [1] *Tsu R.* Superlattices to nanoelectronics. (N.Y.: Elsevier, 2005).
- [2] *Greenaway M.T., Balanov A.G., Schöll E., Fromhold T.M. et al.* Phys. Rev. B. **80**. P. 205318. (2009).
- [3] *Hyart T., Mattas J., Alekseev K.N. et al.* Phys. Rev. Lett. **103**. P. 117401. (2010).
- [4] *Schomburg E., Henini M., Chamberlain J.M., Steenson D.P., Brandt S., Hofbeck K., Renk K.F., Wegscheider W.* Appl. Phys. Lett. **74**. N 15. P. 2179. (1999).
- [5] *Шук А.Я.* ФТП. **8**. С. 1841. (1974).

- [6] *Макаров В.В., Куркин С.А., Короновский А.А., Алексеев К.Н., Храмов А.Е., Баланов А.Г.* Изв. Ран. Серия Физическая. **77**, № 12. С. 1743. (2013).
- [7] *Hramov A.E., Makarov V.V., Koronovskii A.A. et al.* Phys. Rev. Lett. **112**, N 11. P. 116603. (2014).
- [8] *Wacker R.* Physics Reports. **357**, N 1. P. 1. (2002).
- [9] *Esaki L., R. Tsu* IBM J. Res. Dev. **14**, N 1. P. 61. (1970).
- [10] *Fromhold T.M., Patané A., Bujkiewicz S.* Nature. **428**. P. 726. (2004).

The model of the spatio-temporal dynamics of charge in semiconductor superlattices with ohmic contacts

V. A. Maximenko^{1,3,a}, A. A. Koronovskii^{1,3}, V. V. Makarov^{1,3}, O. I. Moskalenko^{1,3}, K. N. Alexeev², A. G. Balanov^{2,3}, A. E. Hramov^{1,3}

¹Saratov State University. Saratov, 410012, Russia

²Department of Physics, Loughborough University. Loughborough LE11 3TU, United Kingdom

³Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Saratov, 410054, Russia

E-mail: ^amaximenkovl@gmail.com

We proposed a mathematical model for the study of the spatio-temporal dynamics of charge on the Ohmic contacts of the semiconductor nanostructures (superlattice). Using the developed model, we study the processes, accompanying the transition of the domain of charge, formed in semiconductor structure GaAs-AlGaAs, to the collector contact. We also discussed the influence of the collector parameters on the characteristics of domain generation.

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

Keywords: semiconductor superlattice, semi classical approach, domain generation.

Сведения об авторах

1. Макаров Владимир Владимирович — аспирант, младший научный сотрудник, тел.: 8(8452)514294, e-mail: vladmak404@gmail.com.
2. Храмов Александр Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, тел.: 8(8452)514294, e-mail: hramovae@gmail.com.
3. Короновский Алексей Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор, тел.: 8(8452)514294, e-mail: alkor@nonlin.sgu.ru.

4. Москаленко Ольга Игоревна — канд. физ.-мат. наук, доцент, тел.: 8(8452)514294, e-mail: o.i.moskalenko@gmail.com.
5. Максименко Владимир Александрович — аспирант, младший научный сотрудник, тел.: 8(8452)514294, e-mail: maximenkov1@gmail.com.
6. Алексеев Кирилл Николаевич, канд. физ.-мат. наук, лектор физического факультета, тел.: +44(0) 1509 22 7112, e-mail: k.alekseev2@lboro.ac.uk.
7. Баланов Александр Геннадьевич, канд. физ.-мат. наук, лектор физического факультета, тел.: +44 (0) 1509 22 7112, e-mail: a.balanov@lboro.ac.uk.