

Переменяемость в полупроводниковой сверхрешетке, помещенной во внешнюю резонансную систему

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

¹ Саратовский 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, д. 7

В работе исследован переход к хаосу в полупроводниковой сверхрешетке, помещенной во внешнюю добротную резонансную систему. Показано, что при увеличении напряжения питания сверхрешетки переход к хаосу в системе происходит по сценарию переменяемости типа I, что подтверждено зависимостью средней длительности ламинарных фаз в зависимости от параметра надкритичности и видом отображения Пуанкаре.

PACS: 72.20.Ht, 05.45.-a, 73.21.-b. УДК: 530.182:621.385.6.

Ключевые слова: полупроводниковая сверхрешетка, переменяемость, хаос, резонатор.

Исследование различных явлений в полупроводниковых сверхрешетках в настоящее время является важной и активно исследуемой задачей электроники сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов [1–3].

В контексте использования полупроводниковых сверхрешеток в высокочастотной электронике важной задачей является изучение взаимодействия сверхрешетки с внешними электродинамическими системами, с которыми может быть связана наноструктура. Такая постановка задачи может быть рассмотрена в двух аспектах. Во-первых, на высоких частотах невозможно избавиться от паразитных емкостей и индуктивностей элементов подключения сверхрешетки (провода, контакты и т. п.), которые образуют паразитные резонансные контуры, воздействующие на сверхрешетку. Поэтому при изучении режимов генерации сверхрешетки необходимо учитывать влияние такого внешнего «паразитного» резонансного контура. Во-вторых, хорошо известно, что внешние электродинамические системы часто являются эффективным способом управления сложными нелинейными колебательными процессами в диапазоне сверхвысоких частот, в частности, введение дополнительных резонансных систем может приводить к возбуждению хаотических колебаний в генераторах (например, в резонансной ЛОВ [6]).

Ранее нами было показано, что подключение внешней добротной резонансной системы способствует возникновению хаотических и квазипериодических режимов колебаний в полупроводниковой сверхрешетке [7]. С точки зрения нелинейной динамики твердого тела представляет интерес изучение механизма перехода к хаосу в данной системе.

В настоящей работе детально исследован переход к хаосу в полупроводниковой сверхрешетке, помещенной во внешнюю резонансную систему. Показано, что переход к хаосу происходит по сценарию переменяемости типа I, что подтверждено статистическими характеристиками и видом отображения Пуанкаре.

Для описания коллективной динамики заряда в полупроводниковой сверхрешетке используется стандартная модель, основанная на самосогласованной системе уравнений Пуассона и непрерывности, которые интегрируются численно [5]. Предполагается, что в резонансной системе возбуждается только одна мода колебаний, что позволяет нам моделировать внешний резонатор с помощью нестационарных уравнений Кирхгофа. Считается, что полупроводниковая сверхрешетка находится при низкой температуре $T = 4, 2$ К.

Как уже было показано ранее, в сверхрешетке, помещенной во внешний резонатор наблюдается как периодическая, так и нерегулярная динамика, тогда как автономная сверхрешетка демонстрирует только периодические колебания. Было обнаружено, что при увеличении напряжения питания сверхрешетки в резонаторе на временной реализации появляются короткие турбулентные фазы. С дальнейшим увеличением напряжения питания их число резко возрастает и длина ламинарных отрезков уменьшается. Такой тип поведения говорит о переходе к хаосу через переменяемость [8].

Для определения типа переменяемости, реализующейся в системе, была рассчитана средняя длительность ламинарных фаз в зависимости от параметра надкритичности (рис. 1). Аппроксимация полученных значений дает нам степенной закон с показателем степени близким к $-0,5$, что соответствует переменяемости типа I [9].

*E-mail: vladmak404@gmail.com

†E-mail: hramovae@gmail.com

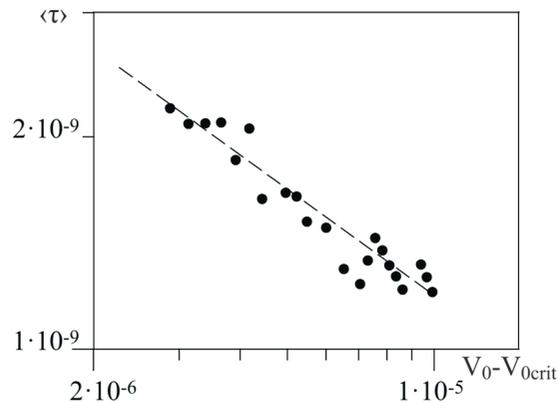


Рис. 1: Средняя длина ламинарной фазы (точки) в зависимости от параметра надкритичности, $V_0 - V_{crit}$. Пунктирной линией показан график $\langle \tau \rangle = (V_0 - V_{crit})^{-0.5}$. Частота внешнего резонатора $f_Q = 13,81$ ГГц, добротность внешнего резонатора $Q = 150$

Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ (12-02-33071), а также Президентской программы поддержки молодых российских учёных-докторов наук (МД-345.2013.2), а также программой поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-828.2014.2) и Фонда «Династия».

- [1] *Esaki L., Tsu R.* IBM J. Res. Develop. E. **14**, No 1. P.61. (1970).
 [2] *Шук А.Я.* ФТП. **8**. С.1841. (1974).
 [3] *Bonilla L.L., Grahn H.T.* Rep. Prog. Phys. E. **68**, No 3. P.577. (2005).
 [4] *Tsu R.* Superlattices to nanoelectronics. (Amsterdam: Elsevier Science, 2005).
 [5] *Wacker A.* Semiconductor superlattices: A model system for nonlinear transport. Phys. Rep. **357**, No 1. P. 121. (2002).
 [6] *Трубецков Д. И., Кузнецов С. П., Рыскин Н. М., Храмов*

- А. Е.* Нелинейные волны-2004. (Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2005). С. 287.
 [7] *Hramov A.E., Makarov V.V., Koronovskii A.A. et al.* Phys. Rev. Lett. **112**, No 11. P. 116603. (2002).
 [8] *Schuster H. G., Jus W.* Deterministic chaos. An Introduction. (Weinheim: Wiley-VCH, 2005).
 [9] *Pomeau Y., Manneville P.* Comm. Math. Phys. **74**. P. 189. (1980).

Intermittency route to chaos in semiconductor superlattice coupled to external resonator

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

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: ^avladmak404@gmail.com, ^bhramovae@gmail.com

The transition to chaos in semiconductor superlattice coupled to external resonant system had been investigated. We have shown that transition to chaos goes through type I intermittency in the system under study. This fact is approved by dependence of the mean laminar phase length versus criticality parameter, and form of Poincare mapping.

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

Keywords: semiconductor superlattice, intermittency, chaos, resonator.

Сведения об авторах

- Макаров Владимир Владимирович — аспирант, младший научный сотрудник; тел.: 8(8452)51-42-94, e-mail: vladmak404@gmail.com.
- Храмов Александр Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: 8(8452)51-42-94, e-mail: hramovae@gmail.com.

3. Короновский Алексей Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: 8(8452)51-42-94, e-mail: alkor@nonlin.sgu.ru.
4. Москаленко Ольга Игоревна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: 8(8452)51-42-94, e-mail: o.i.moskalenko@gmail.com.
5. Максименко Владимир Александрович — аспирант, младший научный сотрудник; тел.: 8(8452)51-42-94, 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.