

Взаимодействие полупроводниковых гетероструктур, связанных через внешний резонансный контур

В. В. Макаров^{1,*}, В. А. Максименко^{1,†}, А. А. Короновский², А. Г. Баланов³, А. Е. Храмов¹

¹Саратовский Государственный Технический Университет имени Гагарина Ю. А.,
НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем»
Россия, 410054, Саратов, Политехническая, д. 77

²Саратовский Государственный Университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, д. 83

³Loughborough University, Department of Physics, Loughborough, LE11 3TU, UK

В настоящей работе исследовано взаимодействие полупроводниковых сверхрешеток, находящихся в режиме нестационарного доменного транспорта и связанных посредством добротного резонансного контура. Обнаружено, что подключение второй сверхрешетки существенно влияет на амплитудно-частотные характеристики системы, определены области хаотической генерации.

PACS: 73.21.-b, 72.20.Ht.

УДК: 530.182:621.385.6

Ключевые слова: полупроводниковая сверхрешетка, резонансный контур, хаотическая генерация.

В последнее время все большее внимание исследователей привлекают вопросы коллективной динамики наноразмерных активных сред, связанных полем внешней электродинамической системы [1, 2]. Очевидно, что эффекты, наблюдаемые в подобных системах, могут быть интересны не только для понимания фундаментальных принципов синхронизации и взаимодействия динамических элементов через общее поле, но и для практических приложений, таких как реализация широкополосного излучения или ТГц-генерация [3].

В качестве такой активной среды могут выступать полупроводниковые сверхрешетки, являющиеся перспективными устройствами, взаимодействующими с суб-ТГц и ТГц излучением [4]. Они представляют из себя структуру, состоящую из чередующихся слоев нескольких (обычно двух) полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны [5]. Появление такого дополнительного потенциала способствует возникновению в сверхрешетке энергетических минизон, в которых возможно возникновение движущихся доменов заряда. Экспериментально показано, что частота прохождения таких доменов может достигать до 200 ГГц, что делает сверхрешетки перспективными устройствами ТГц диапазона [6, 7]. Кроме того, так как принцип их работы основан на процессах сброса-накопления заряда, форма колебаний тока, снимаемых со сверхрешетки обуславливает наличие в их спектре большого числа мощных высших гармоник, которые также могут быть использованы для генерации и усиления электромагнитного излучения [8].

Ранее нами было показано, что подключение внешнего резонатора может способствовать появлению хаотических режимов колебаний заряда в сверхрешетке, которая в автономном случае демонстрирует толь-

ко периодическую динамику [9]. В настоящей работе рассмотрена нелинейная динамика двух полупроводниковых сверхрешеток, связанных через внешний добротный колебательный контур.

Для того, чтобы численно смоделировать динамику заряда в сверхрешетках используется полуклассическое приближение, предполагающее, что транспорт электронов происходит только в первой минизоне [10]. В соответствии с таким подходом динамика сверхрешетки описывается с помощью самосогласованной системы уравнений Пуассона и непрерывности [11]. Для того, чтобы не конкретизировать тип внешнего резонатора, его динамика описывается в рамках одномодового приближения, что позволяет вычислить изменение величины тока и напряжения в резонаторе с помощью уравнений Кирхгофа.

Была исследована динамика такой системы при изменении напряжения питания одной из наноструктур, в то время как напряжение второй сверхрешетки было постоянным. Обнаружено, что даже при малых напряжениях питания одной из сверхрешеток и ее работе в линейном режиме (отсутствие доменов заряда), динамика второй сверхрешетки сильно меняется по сравнению с автономным случаем (сверхрешетка в резонаторе). В частности, сильно изменяется форма колебаний второй сверхрешетки и возрастает ее частота генерации, наряду с существенным уменьшением мощности колебаний.

Для того, чтобы исследовать нелинейную динамику связанных сверхрешеток была построена бифуркационная диаграмма колебаний напряжения в резонаторе при изменении напряжения, приложенного к одной из сверхрешеток, которая показана на рис. 1. Хорошо видно, что на напряжениях питания меньше ≈ 0.63 В наблюдаются в основном периодические режимы колебаний. Исключение составляет небольшая область хаоса, находящаяся около 0.34 В и ассоциирующая с возникновением дополнительного участка генерации, вызванного подключением внешнего резонатора [9]. На напряжениях более 0.63 В наблюдается в основном ха-

*E-mail: avladmak404@gmail.com

†E-mail: maximenkovi@gmail.com

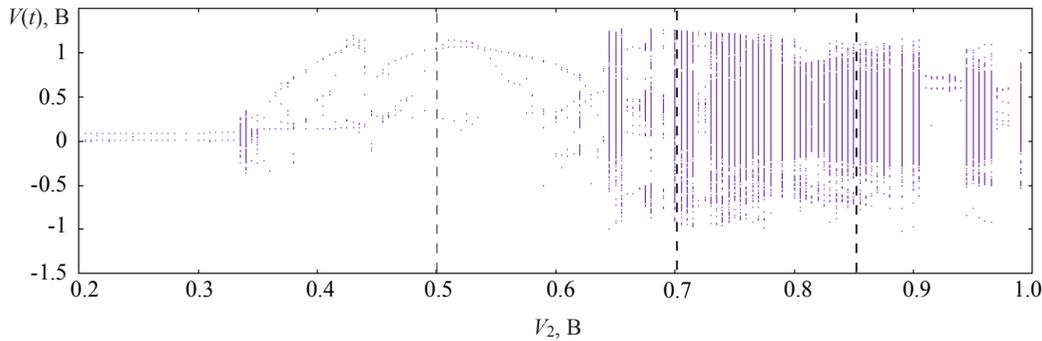


Рис. 1: Бифуркационная диаграмма колебаний напряжения в резонансном контуре при изменении напряжения питания одной из сверхрешеток

отическая динамика, при этом расположение точек на рисунке свидетельствует о реализации развитых хаотических колебаний в широком диапазоне управляющего параметра. Последнее свидетельствует о возможности практического использования данной системы

как генератора широкополосных хаотических колебаний.

Работа поддержана РФФИ в рамках проектов 15-02-00624 и 16-32-80125, а также Министерством образования и науки РФ (соглашения 3.23.2014/К и 931).

- [1] *Chen H.-T.* et al. *Nature*. **444**. P. 597. (2006).
 [2] *Blais A.* et al. *Phys. Rev. Lett.* **90**. P. 127901. (2003).
 [3] *Walther C.* et al. *Science*. **327**. P. 1495-7. (2010).
 [4] *Greenaway T.M.* et al. *Phys. Rev. B*. **80**. P. 205318. (2009).
 [5] *Patane A.* et al. *Appl. Phys. Lett.* **81**. P. 661. (2002).
 [6] *Maksimenko V.A.* et al. *Europhysics Letters*. **109**. P. 47007. (2015).

- [7] *Hyart T.* et al. *Phys. Rev. Lett.* **103**. P. 117401. (2010).
 [8] *Schmidt J.C.* et al. *Superlattices and Microstructures*. **52**. P. 1143. (2012).
 [9] *Hramov A.E.* *Phys. Rev. Lett.* **112**. P. 116603. (2014).
 [10] *Esakiand L., Tsu R.* *IBM J. Res. Develop.* **14**. P. 61. (1970).
 [11] *Selskii A.O.* et al. *Phys. Rev. B*. **84**. P. 235311. (2011).

Interaction of semiconductor heterostructures connected via an external resonant circuit

V. V. Makarov^{1,a}, V. A. Maksimenko^{1,b}, A. A. Koronovskii², A. G. Balanov³, A. E. Hramov¹

¹*REC «Nonlinear Dynamics of Complex Systems», Saratov State Technical University, Saratov, 410054, Russia*

²*Saratov State University, Saratov, 410012, Russia*

³*Department of Physics, Loughborough University, Loughborough, LE11 3TU, UK*

E-mail: ^aavladmak404@gmail.com, ^bmaximenkovl@gmail.com

In this paper we study the interaction between semiconductor superlattices, working in the non-stationary charge transport regime, and coupled via the quality resonant circuit. We found that the connection of the second superlattice significantly affects the amplitude-frequency characteristics of the system, the areas of chaotic generation are discovered.

PACS: 73.21.-b, 72.20.Ht.

Keywords: semiconductor superlattice, resonant circuit, chaos generation.

Сведения об авторах

1. Макаров Владимир Владимирович — аспирант, мл. науч. сотрудник, доцент; e-mail: vladmak404@gmail.com.
2. Максименко Владимир Александрович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; e-mail: maximenkovl@gmail.com.
3. Короновский Алексей Александрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, проректор по НИР, тел.: (452) 27-14-96, e-mail: kotonovskyya@info.sgu.ru.
4. Баланов Александр Геннадьевич — канд. физ.-мат. наук, лектор физического факультета университета Лафборо; тел.: +44(0)1509227112, e-mail: A.Balanov@lboro.ac.uk.
5. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник; (452) 51-42-94, e-mail: hramovae@gmail.com.