

Коллективная динамика адаптивно связанных полупроводниковых гетероструктурВ. В. Макаров¹, В. А. Максименко^{1,*}, А. А. Короновский², А. Г. Баланов³, А. Е. Храмов¹¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,
НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем»
Россия, 410054, Саратов, Политехническая 77²Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского,
факультет нелинейных процессов
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83³Loughborough University, Department of Physics, Loughborough, LE11 3TU, United Kingdom

(Статья поступила 25.07.2017; Подписана в печать 16.10.2017)

Исследована коллективная динамика наноразмерных гетероструктур полупроводниковых сверхрешеток, связанных адаптивной связью, в качестве которой выступает внешний резонансный контур. Показано, что взаимодействие исследуемых активных сред через резонансный контур приводит к возникновению широких областей хаотической динамики и широкополосной генерации.

PACS: 73.21.-b, 72.20.Ht.

УДК: 538.9, 530.182, 621.385.6

Ключевые слова: минизонная сверхрешетка, адаптивная связь, широкополосная генерация.

ВВЕДЕНИЕ

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

1. ИССЛЕДУЕМАЯ СИСТЕМА И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Исследуемая модель (рис. 1) представляет из себя две полупроводниковые сверхрешетки, параллельно подключенные к внешнему добротному резонатору. К каждой сверхрешетке приложено постоянное напряжение питания, обозначенное как V_{01} и V_{02} . Для того, чтобы не конкретизировать вид используемого резонатора мы воспользуемся одномодовым приближением, которое позволит моделировать его динамику с помощью метода эквивалентных схем.

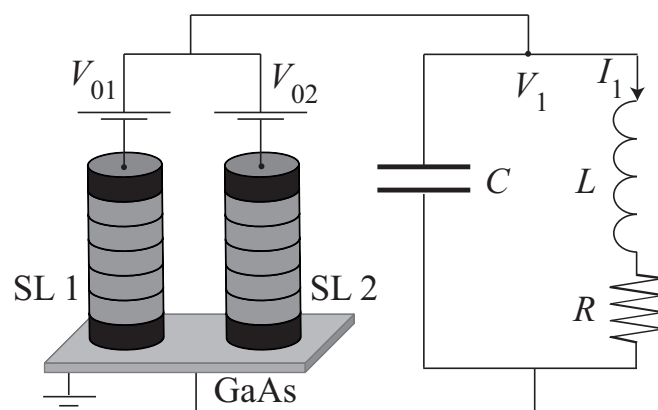


Рис. 1: Схематическое изображение полупроводниковых сверхрешеток и эквивалентная схема внешнего резонатора. Частота внешнего резонатора $f_Q = 13.81$ ГГц, добротность $Q = 150$

*E-mail: maximenkovi@gmail.com

Для того, чтобы численно смоделировать динамику заряда в сверхрешетках используется полуклассическое приближение, предполагающее, что транспорт электронов происходит только в первой мини-зоне [10]. В соответствии с таким подходом динамика сверхрешетки описывается с помощью самосогласованной системы уравнений Пуассона и непрерывности [11]. Параметры анализируемой сверхрешетки были выбраны аналогично сверхрешеткам, описанным в работах [6, 9], где предполагалось, что проводящий участок мини-зоны разбит на $N = 480$ слоев, ширина которых достаточно мала $\Delta x = L/N$ нм.

Изменение плотности заряда в каждом слое nm (правая граница которого $x = m\Delta x$) задается дискретным аналогом уравнения непрерывности

$$e\Delta x \frac{dn_m}{dt} = J_{m-1} - J_m, \quad m = 1 \dots N, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, J_{m-1} и J_m — плотность тока на левой и правой границах слоя m . Плотность тока определена как

$$J_m = en_m v_d(F_m), \quad (2)$$

где F_m — среднее электрическое поле в слое m , скорость дрейфа $v_d(F_m)$ определяется соотношением

$$v_d = \frac{d\Delta}{2\hbar} \frac{\tau\omega_B}{(1 + \tau^2\omega_B^2)}, \quad (3)$$

где \hbar — постоянная Планка, τ — скорость рассеивания электронов, $\omega_B = eFd/\hbar$ — угловая частота Блоховских колебаний электронов (более подробно см. [1, 8]).

Электрическое поле F_m на границе слоя m может быть определено из уравнения Пуассона, которое в дискретном виде выглядит как

$$F_{m-1} = \frac{e\Delta x}{\epsilon_0\epsilon_r} (n_m - n_D) + F_m, \quad m = 1 \dots N \quad (4)$$

где $n_D = 3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ — плотность легирования в слоях сверхрешетки. Для определения тока на контактах использовались омические граничные условия, $J_0 = \sigma F_0$, в сильно легированном эмиттере с электрической проводимостью $\sigma = 3788 \text{ Ом}^{-1}$. Напряжение V_{SL} , приложенное к устройству, определяется выражением

$$V_{SL} = U + \frac{\Delta x}{2} \sum_{m=1}^N (F_m + F_{m+1}), \quad (5)$$

где U — падение напряжения на контактах с учетом эффекта формирования слоев повышенной концентрации заряда вблизи эмиттера и пониженной концентрации зарядов вблизи коллектора сверхрешетки [6]. Зная плотность тока в каждом слое, можно вычислить суммарный ток, протекающий через сверхрешетку [10]

$$I(V_{SL}) = \frac{A}{N+1} \sum_{m=1}^N J_m, \quad (6)$$

где $A = 5 \times 10^{-22} \text{ м}^2$ — поперечное сечение сверхрешетки. Заметим, что в численном моделировании предполагается нахождение сверхрешетки при низкой температуре, когда диффузионной составляющей плотности тока можно пренебречь.

Динамика резонатора описывается в рамках одномерного приближения, что позволяет вычислить изменение величины тока и напряжения в нем с помощью уравнений Кирхгофа:

$$! \frac{dV_1}{dt} = I_1(V_{sl}) + I_2(V_{sl}) - I_1, \quad (7)$$

$$L \frac{dI_1}{dt} = -R_1 I_1 + V_1, \quad (8)$$

где $I_1(V_{sl1})$ и $I_1(V_{sl2})$ — токи, генерируемые сверхрешетками, C, L, R — эквивалентные емкость, индуктивность и сопротивление соответственно, I_1 и V_1 — ток и напряжение во внешнем резонаторе. Резонатор при этом характеризуется частотой, f_Q , и добротностью, Q . Напряжение, приложенное к сверхрешеткам при этом имеет вид:

$$V_{sl1} = V_{01} - V_1, \quad (9)$$

$$V_{sl2} = V_{02} - V_1, \quad (10)$$

где V_{01} и V_{02} — постоянные напряжения питания, приложенные к наноструктурам.

2. ДИНАМИКА СИСТЕМЫ

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 (рис. 2,б) (отсутствие доменов заряда), динамика второй сверхрешетки сильно меняется по сравнению с автономным случаем (рис. 2,а) (сверхрешетка в резонаторе). В частности, сильно изменяется форма колебаний второй сверхрешетки (рис. 2,б) 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, представленная на рис. 2,в. Хорошо видно, что на напряжениях питания меньше $\approx 0.63 \text{ В}$ наблюдаются в основном периодические колебания с различным периодом. Фазовый портрет, соответствующий напряжению 500 мВ отражает реализацию предельного цикла с периодом 2 (рис. 2,г). Исключение составляет небольшая область хаоса, находящаяся около 340 мВ и ассоциирующая с возникновением дополнительного участка отрицательной дифференциальной проводимости, вызванного подключением внешнего резонатора [9].

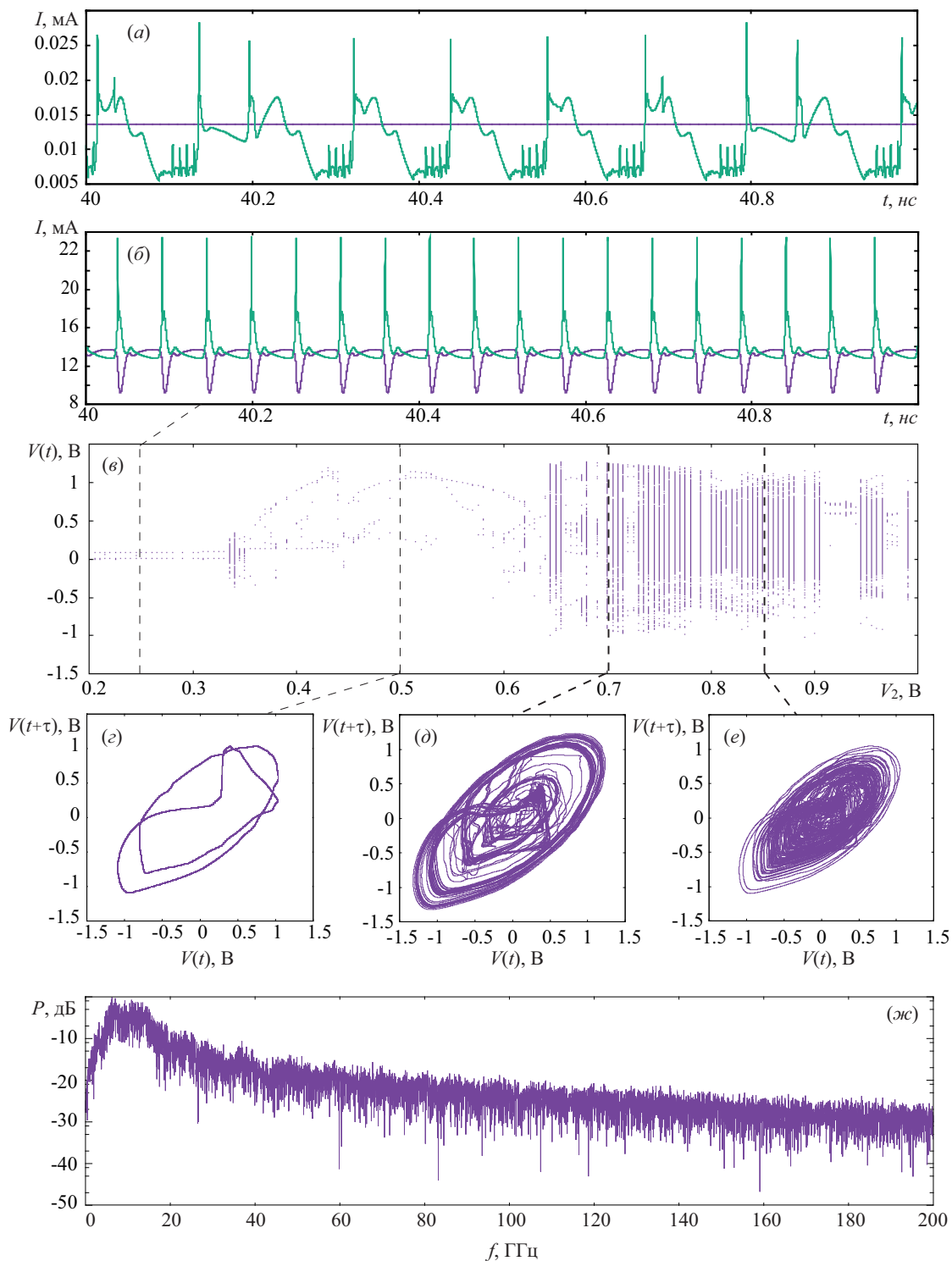


Рис. 2: Колебания тока, генерируемые сверхрешеткой, помещенной в резонатор $V_{01} = 510$ мВ (а), и реализации тока с двух сверхрешеток, взаимодействующих через контур $V_{01} = 510$ мВ, $V_{02} = 250$ мВ (б). Бифуркационная диаграмма (в) и фазовые портреты (г-е) колебаний напряжения в резонаторе при изменении напряжения на одной из сверхрешеток (V_{02}). Напряжения при которых построены фазовые портреты: $V_{02} = 500$ мВ (г), $V_{02} = 700$ мВ (д), $V_{02} = 850$ мВ (е). Частота внешнего резонатора $f_Q = 13.81$ ГГц, добротность $Q = 150$

На напряжениях более 630 мВ наблюдается в основном хаотическая динамика, перемежающаяся с окнами периодичности. При этом можно заметить, что увеличение напряжения до 750 мВ приводит к практически полному исчезновению окон периодической динамики. Последнее свидетельствует о усложнении режима колебаний, что подтверждается фазовыми портретами, приведенными на рис. 2, *д–е*. Фазовый портрет, соответствующий напряжению 700 мВ (рис. 2, *д*) отражает хаотический режим, имеющий черты перемежающегося поведения. Беря в расчет то, что переход к хаосу в более простой системе, «сверхрешетка–внешний резонатор» происходит по сценарию реализации аналогичного сценария в исследуемой системе. Увеличение напряжения до 850 мВ приводит к существенному усложнению режима колебаний, — фазовый портрет для этого напряжения демонстрирует развитый хаос, который, фактически, представляет из себя широкополосную генерацию. Такой эффект говорит о возможности использования полупроводниковых сверхрешеток,

взаимодействующих через общий резонатор для генерации хаотического широкополосного излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была изучена нелинейная динамика полупроводниковых сверхрешеток, связанных через общий резонансный контур. Обнаружено, что в такой системе возможна реализация широкополосной хаотической генерации, что представляет непосредственный интерес для практического применения полупроводниковых сверхрешеток в системах скрытой передачи информации [12] и создания сверхбыстрых генераторов случайных чисел (superfast true-random number generators) [13].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-32-00272)

-
- [1] *Chen H.-T., Padilla W., Zide J.M.O.* Nature. 2006. **444**. P. 597.
[2] *Blais A., van den Brink A.M., Zagoskin A.M.* Phys. Rev. Lett. 2003. **90**. P. 127901.
[3] *Walther C., Scarlari G., Amanti M.I.* Science. 2010. **327**. P. 1495-7.
[4] *Greenaway M.T., Balanov A.G., Scholl E., Fromhold T.M.* Phys. Rev. B. 2009. **80**. P. 205318.
[5] *Selskii A.O., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Moskalenko O.I., Alekseev K.N., Greenaway M.T., Wang F., Fromhold T.M., Shorokhov A.V., Khvastunov N.N., Balanov A.G.* Phys. Rev. B. 2011. **84**. P. 235311.
[6] *Renk K.F., Stahl B.I.* Phys. Lett. A. 2011. **375**. P.2644
[7] *Hyart T., Mattas J., Alekseev K.N.* Phys. Rev. Lett. 2010. **103**. P. 117401.
[8] *Lei X.L.* J. Appl. Phys. 1997. **82**. P. 718.
[9] *Hramov A.E., Makarov V.V., Koronovskii A.A., Kurkin S.A., Gaifullin M.B., Alexeeva N.V., Alekseev K.N., Greenaway M.T., Fromhold T.M., Patanu A., Kusmartsev F.V., Maksimenko V.A., Moskalenko O.I., Balanov A.G.* Phys. Rev. Lett. 2014. **112**. P. 116603.
[10] *Баланов А. Г., Гринавей М. Т., Короновский А. А., Москаленко О. А., Сельский А. О., Фромхолд Т. М., Храмов А. Е.* ЖЭТФ. **141**, №. 5. С. 960.
[11] *Wacker A.* Phys. Rep. 2002. **357**. N 1 P. 121.
[12] *Wu X., Zhu C., Kan H.* Applied Mathematics and Computation. 2015. **252**. P. 201.
[13] *Wu J.G., Tang, X., Wu Z.M.* Laser Physics. 2012. **22**. P. 1476.

Collective dynamics of adaptive coupled semiconductor heterostructures

V. V. Makarov¹, V. A. Maksimenko^{1,a}, A. A. Koronovskii², A. G. Balanov³, A. E. Hramov¹

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

²Faculty of nonlinear processes, Saratov State University, Saratov, 410012, Russia

³Department of Physics, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, United Kingdom
E-mail: ^amaximenkool@gmail.com

We investigated the collective dynamics of nanoscale heterostructures semiconductor superlattices, which which adaptively coupled by an external resonant circuit. It is shown that the interaction of the active medium through the resonant circuit leads to emergence of broad areas of chaotic dynamics and broadband generation.

PACS: 73.21.-b, 72.20.Ht.

Keywords: miniband superlattice, Adaptive coupling, broadband generation.

Received 25 July 2017.

Сведения об авторах

1. Макаров Владимир Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: vladmak404@gmail.com.
 2. Максименко Владимир Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: e-mail: maximenkovl@gmail.com.
 3. Баланов Александр Геннадьевич — канд. физ.-мат. наук, лектор; тел.: +44 (0) 1509 227112, e-mail: A.Balanov@lboro.ac.uk.
 4. Короновский Алексей Александрович — доктор физ.-мат. наук, проректор по научной работе; тел.: (8452) 27-14-96, e-mail: koronovskyaa@info.sgu.ru.
 5. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (8452) 99-88-32, e-mail: aeh@nonlin.sgu.ru.
-