



БИФУРКАЦИИ И ПЕРЕХОДЫ К ХАОСУ В СИСТЕМЕ «ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СВЕРХРЕШЕТКА ВО ВНЕШНЕМ РЕЗОНАТОРЕ»

*В. В. Макаров, А. А. Короновский, С. А. Куркин, Ю. И. Левин
О. И. Москаленко, В. А. Максименко, А. Е. Храмов, А. Г. Баланов*

Изучена нелинейная динамика и переходы к хаотической высокочастотной генерации в полупроводниковой сверхрешетке при подключении к ней внешнего добротного резонатора. Показано, что в системе «полупроводниковая сверхрешетка во внешнем резонаторе» в широком диапазоне управляющих параметров наблюдается хаотическая генерация, в то время как в полупроводниковой сверхрешетке без внешней электродинамической системы имеют место только периодические колебания релаксационного типа. Показано также, что при изменении напряжения питания переход к хаотической генерации в данной системе происходит по сценарию перемежаемости.

Ключевые слова: Полупроводниковая сверхрешетка, хаос, нелинейная динамика, СВЧ-генерация, домены заряда.

Введение

Полупроводниковые сверхрешетки – наноструктуры, состоящие из нескольких (обычно несколько десятков или более) чередующихся полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны. Впервые они были предложены в работах Л. Эсаки и Р. Тсу [1,2] и независимо в работе [3] как одномерные структуры для изучения различных квантовых эффектов, связанных с резонансным туннелированием и блоховскими колебаниями. После публикации этих оригинальных работ были предложены и экспериментально реализованы различные типы полупроводниковых сверхрешеток с различными электромагнитными свойствами. В настоящее время полупроводниковые сверхрешетки являются уникальным полигоном как для изучения и понимания процессов физики твердого тела [2, 4], так и для исследования различных нелинейных явлений [5–9]. Кроме того, блоховские колебания, а также ассоциирующиеся с ними нелинейные процессы [10] делают сверхрешетку перспективным элементом для генерации, усиления и детектирования высокочастотных сигналов с частотой до нескольких десятков терагерц [11]. Следует отметить,

что в связи с развитием информационно-телекоммуникационных систем, основанных на хаотических сигналах [12–14], представляет интерес исследование возможности возбуждения в полупроводниковой сверхрешетке хаотических колебаний для использования в качестве генератора хаоса СВЧ- и ТГц-диапазонов.

В данной работе проводится исследование полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешнюю резонансную систему. Хорошо известно, что внешние электродинамические системы позволяют эффективно управлять 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 [15–17] или гиро-ЛОВ [18]). Поэтому представляет значительный интерес исследование полупроводниковой сверхрешетки во внешнем резонаторе. Как уже было показано нами ранее [19], в системе «полупроводниковая сверхрешетка во внешнем резонаторе» наблюдаются режимы хаотической динамики. Данная работа направлена на выявление механизмов перехода к хаосу в рассматриваемой системе.

1. Исследуемая система и математическая модель

Исследуемая система представляет собой сверхрешетку, к которой подключен добротный резонатор. Данный резонатор может быть реализован как специальный элемент конструкции генератора с активной средой в виде сверхрешетки, или может быть связан с паразитными емкостями и индуктивностями элементов подключения сверхрешетки (провода, контакты и т.п.), которые, в свою очередь, могут образовывать резонансные контуры, воздействующие на сверхрешетку.

Учитывая разнообразие возможных резонансных систем, которые могут взаимодействовать со сверхрешеткой, в данной работе рассматривалась достаточно общая модель, без конкретизации вида резонатора, позволяющая тем не менее сделать некоторые общие заключения о динамике системы «полупроводниковая сверхрешетка во внешнем резонаторе». Следует отметить, что при анализе конкретной системы с определенным типом резонатора необходимо учитывать также пространственное распределение поля в резонаторе для корректного подбора параметров рассматриваемой эквивалентной схемы.

Для нахождения тока, генерируемого сверхрешеткой, численно моделировалась динамика доменов в сверхрешетке на основе самосогласованных уравнений непрерывности и уравнения Пуассона. Следуя работе [7], предполагалось, что проводящий участок минизоны разбит на $N = 480$ слоев, ширина которых достаточно мала $\Delta x = L/N = 0.24$ нм. Изменение плотности частиц в каждом слое n_m (правая граница которого $x = m\Delta x$) задается дискретным аналогом уравнения непрерывности тока

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

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

$$J_m = en_m v_d(\bar{F}_m), \quad (2)$$

где \bar{F}_m – среднее электрическое поле в слое m ; дрейфовая скорость $v_d(\bar{F})$ определяется соотношением

$$v_d = \frac{d\Delta_0}{2\hbar} \frac{\tau\omega_B}{(1 + \tau^2\omega_B^2)}, \quad (3)$$

в котором $\omega_B = eFd/\hbar$ – круговая частота блоховских колебаний электрона, $\Delta_0 = 19.1$ мэВ – ширина минизоны, $d = 8$ нм – ширина слоя и $\tau = 250$ пс – время рассеяния электронов. Электрическое поле F_m на левой границе слоя m может быть определено из уравнения Пуассона, которое в дискретном виде выглядит следующим образом:

$$F_{m+1} = \frac{e\Delta x}{\varepsilon_0\varepsilon_r}(n_m - n^D) + F_m, m = 1 \dots N, \quad (4)$$

где $n^D = 3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ – плотность легирования в слоях сверхрешетки.

Для определения тока использовались омические граничные условия, $J_0 = \sigma F_0$, в сильно легированном эмиттере с электрической проводимостью $\sigma = 3788$ См. Напряжение V_{sl} , приложенное к устройству, определено 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. Зная плотность тока в каждом слое, можно вычислить суммарный ток, протекающий через сверхрешетку [10]

$$I(t) = \frac{A}{N+1} \sum_{m=0}^N J_m, \quad (6)$$

где $A = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ – поперечное сечение сверхрешетки. Заметим, что в численном моделировании предполагается нахождение сверхрешетки при низкой температуре, равной 4.2 К.

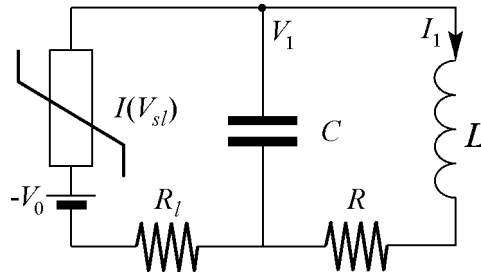


Рис. 1. Эквивалентный контур исследуемой системы «сверхрешетка–внешний резонатор». Здесь $I(V_{sl})$ – представление сверхрешетки как генератора тока, управляемого напряжением V_{sl} , V_0 – напряжение источника постоянного тока. Сопротивление нагрузки не менялось и было выбрано $R_l = 0.1$ Ом

Для моделирования внешнего резонатора предположим, что в резонансных системах возбуждается только одна мода колебаний, то есть будем решать задачу в одномодовом приближении. Моды резонаторов характеризуются частотами f_{Qi} и добротностями Q_i . Внешний резонатор моделируется с помощью эквивалентной схемы, показанной на рис. 1. Резонансная система характеризуется индуктивностью L , емкостью C и сопротивлением R , и моделируется нестационарными уравнениями Кирхгофа, которые в данном случае

ИМЕЮТ ВИД

$$C \frac{dV_1}{dt} = I(V_{sl}) - I_1, \quad (7)$$

$$L \frac{dI_1}{dt} = RI_1 - V_0 + V_{sl} + R_n I(V_{sl}), \quad (8)$$

где V_0 – напряжение источника, напряжение $V_1(t)$ и ток $I_1(t)$ показаны на рис. 1, $I(V_{sl})$ – ток, текущий через сверхрешетку и определяемый напряжением на сверхрешетке $V_{sl} = V_0 + V_1(t)$.

2. Нелинейная динамика

Рассмотрим поведение системы при изменении основного управляющего параметра – постоянного напряжения питания V_0 . Для анализа режимов колебаний, реализующихся в системе, была построена бифуркационная диаграмма колебаний напряжения $V_1(t)$ в резонаторе при изменении напряжения питания V_0 в диапазоне 0.4...0.9 В, которая представлена на рис. 2. Заметим, что при выбранных значениях управляющих параметров колебания возникают при $V_0 \approx 350$ мВ.

Рассмотрим режимы колебаний, реализующиеся в системе. При низком напряжении до 500 мВ существуют только периодические режимы колебаний, далее при увеличении напряжения питания происходит несколько бифуркаций удвоения периода (данный участок разрешен на врезке на рис. 2), и при 500...600 мВ на бифуркационной диаграмме прослеживаются две области хаотической динамики доменов, разделенные широким окном периодичности с периодом 3. Первая область хаоса имеет место при $V_0 \approx 510$ мВ, вторая область хаоса возникает при напряжении порядка 600 мВ, в данной области наблюдается большое число окон периодичности.

Интересным также является возникновение широкой области хаоса при напряжениях питания сверхрешетки $V_0 > 800$ мВ. В этом случае мы можем говорить о развитых хаотических колебаниях с большой мощностью. Следует отметить, что

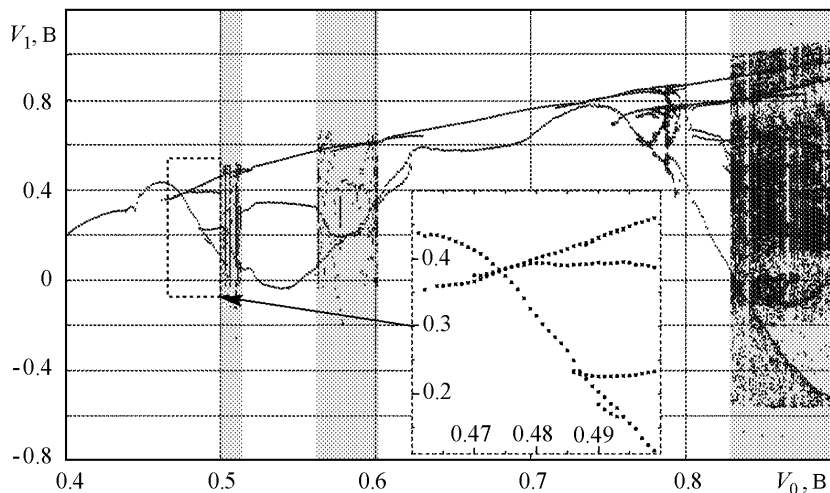


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма колебаний напряжения в резонаторе V_1 при изменении напряжения питания V_0 . Резонансная частота колебаний внешнего резонатора $f_q = 13.81$ ГГц, добротность резонатора $Q = 150$

данная область будет реализоваться не во всех образцах полупроводниковых сверхрешеток, так как часто в этой области напряжений наблюдается явление пробоя и резонансного туннелирования, что приводит к исчезновению участка на ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью.

Для детального исследования механизма перехода к хаосу в полупроводниковой сверхрешетке обратимся к временным реализациям, спектрам и фазовым портретам колебаний напряжения в резонаторе при различных значениях напряжения питания V_0 , которые приведены на рис. 3. Фазовые портреты построены методом Такенса задержанных координат [20], $\tau = 0.3$ нс. Хорошо видно, что при напряжении $V_0 = 510.68$ мВ в системе реализуется простой периодический режим: на спектре присутствует только главная частота колебаний и ее гармоники (б), на фазовом портрете мы видим предельный цикл (в). Увеличивая напряжение до $V_0 = 510.7$ мВ (рис. 3 з, д, е), на соответствующем спектре мощности можно наблюдать изрезанность (д), связанную с появлением на временной реализации (з) короткой турбулентной фазы (отмечена стрелкой на рисунке), которая также хорошо прослеживается на фазовом портрете (е). При дальнейшем увеличении напряжения до $V_0 = 510.75$ мВ (рис. 3 ж, з, и) количество турбулентных фаз увеличивается (ж), что сопровождается сильной зашумленностью спектра, спектр колебаний расширяется (з). Проекция фазового портрета в данном случае соответствует хаотическому аттрактору (и). Наблюдаемые эффекты позволяют говорить о том, что в данном случае переход к хаосу происходит через перемежаемость [21, 22]. С другой стороны, при переходе от периодической динамики к хаотической имеют место отдельные бифуркации удвоения периода (врезка на рис. 2), однако этот каскад удвоений периода ограничивается только несколькими (порядка трех) бифуркациями.

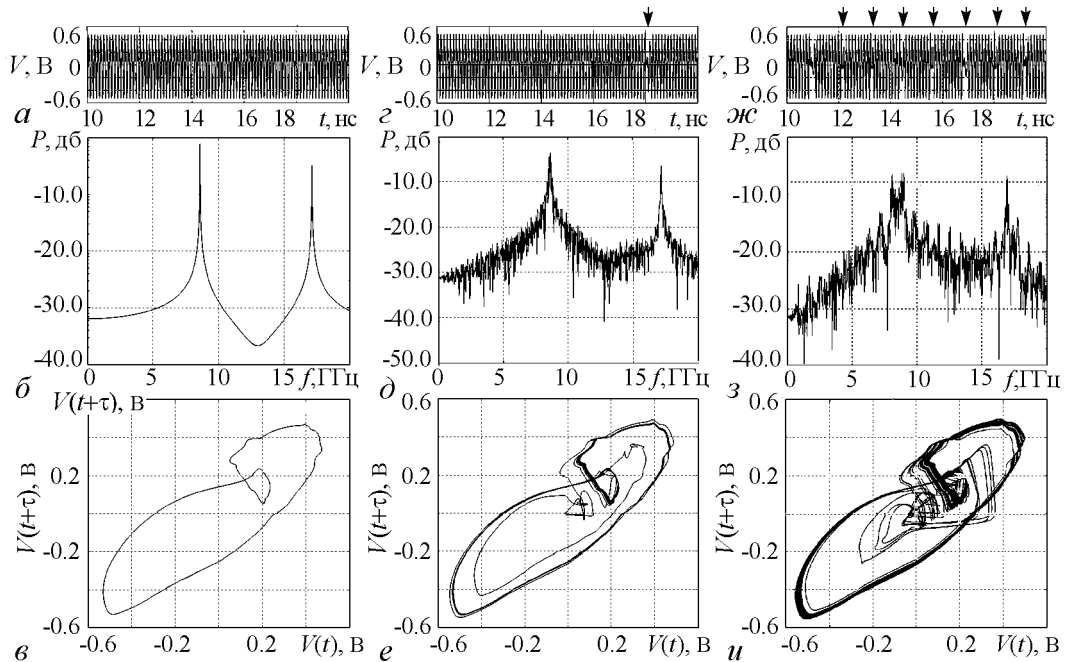


Рис. 3. Временные реализации, спектры и фазовые портреты колебаний напряжения в резонаторе при различных значениях напряжения питания V_0 , мВ: 510.68 (а, б, в), 510.7 (з, д, е) и 510.75 (ж, з, и). Турбулентные фазы отмечены на временных реализациях стрелками. Резонансная частота колебаний внешнего резонатора $f_q = 13.81$ ГГц, добротность резонатора $Q = 150$

Рассмотрим переход к хаосу в области 840...850 мВ. Данная область интересна отсутствием окон периодичности и режимом более развитой хаотической генерации. Для иллюстрации этого приведены временные реализации, спектры и фазовые портреты колебаний напряжения для $V_0 = 844$, 846.6 и 848 мВ. Заметим, что колебания при $V_0 = 848$ мВ (рис. 4, з) характеризуются значительно более сложным широкополосным спектром излучения, чем при $V_0 = 510.75$ мВ (рис. 3, з). Для исследования механизма перехода к хаосу в данном случае обратимся к временным реализациям и фазовым портретам колебаний напряжения (рис. 4, а, в, з, е, ж, и). При $V_0 = 846.6$ мВ (з) на временной реализации хорошо заметна одна короткая турбулентная фаза, чем объясняется появление дополнительных частот на соответствующем спектре (д). При увеличении напряжения (ж) количество и продолжительность турбулентных фаз возрастает.

Анализируя фазовые портреты (в, е, и), обратим внимание, что хаос возникает на базе цикла, наблюдающегося в периодическом режиме (в), а переход к хаосу происходит через перемежаемость. Данный вывод также подтверждается и широким спектром генерируемых частот в режиме хаоса (рис. 4, з) без ярко выраженных гармоник и субгармоник основной частоты.

Обратимся к динамике пространственного заряда в слоях сверхрешетки. Для рассмотрения этого вопроса на рис. 5 представлены пространственно-временные распределения заряда в сверхрешетке во внешнем резонаторе при двух различных напряжениях питания V_0 . Случай (а) иллюстрирует периодический режим, реализующийся в системе при $V_0 = 500$ мВ: домены хорошо сформированы и имеют

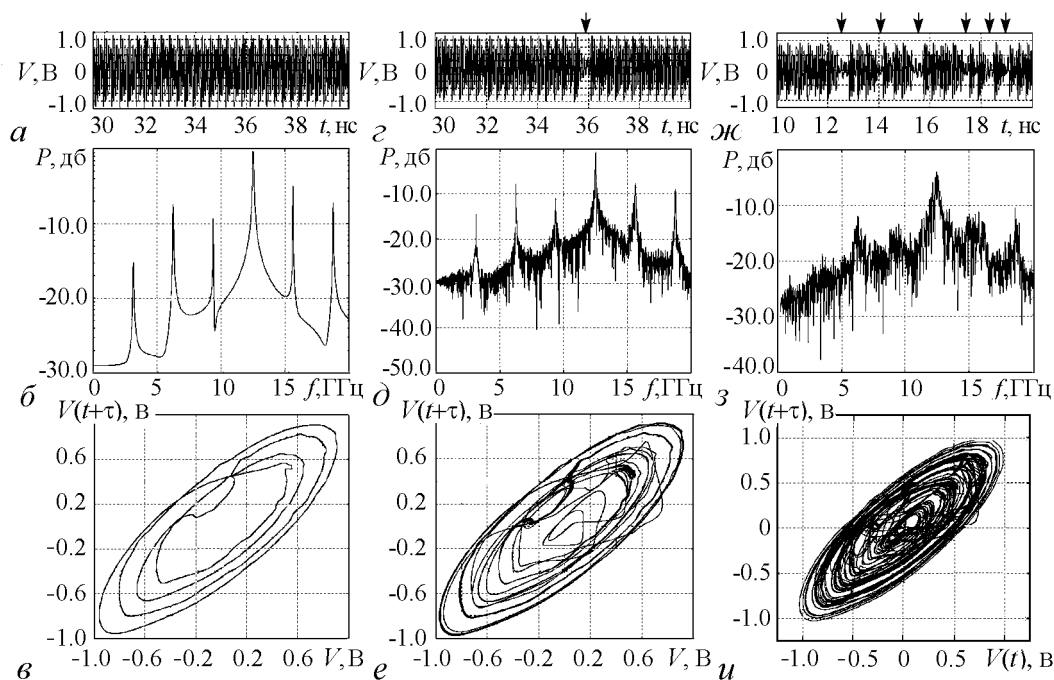


Рис. 4. Временные реализации, спектры и фазовые портреты колебаний напряжения в резонаторе при различных значениях напряжения питания V_0 , мВ: 844 (а, б, в), 846.6 (з, д, е) и 848 (ж, з, и). Турбулентные фазы отмечены на временных реализациях стрелками. Резонансная частота колебаний внешнего резонатора $f_q = 13.81$ ГГц, добротность резонатора $Q = 150$

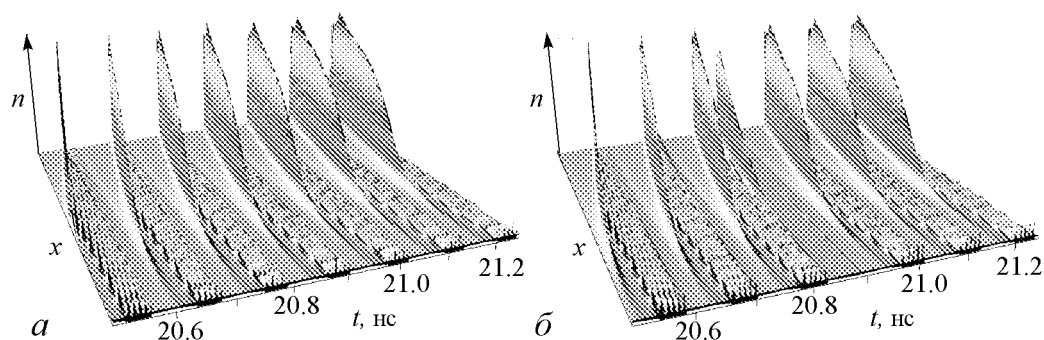


Рис. 5. Пространственно-временные распределения заряда в слоях сверхрешетки во внешнем резонаторе при двух различных напряжениях питания V_0 : 500 мВ (а) и 510.75 мВ (б). Резонансная частота колебаний внешнего резонатора $f_q = 13.81$ ГГц, добротность резонатора $Q = 150$

одинаковую концентрацию заряда, частота их следования постоянна. В случае (б) мы видим появление плохо сформированного домена, который обуславливает турбулентную фазу; данный режим соответствует хаосу в области $V_0 = 510.75$ мВ.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования была изучена нелинейная динамика полупроводниковой сверхрешетки во внешнем линейном резонаторе при увеличении напряжения питания. Для моделирования воздействия электродинамической системы на сверхрешетку был использован метод эквивалентных схем. В работе показано, что внешняя резонансная система способствует значительному усложнению динамики сверхрешетки, в том числе в системе возможна хаотическая генерация. Показано, что переход к хаосу при изменении управляющего параметра – напряжения питания – происходит по сценарию перемежаемости, при этом присутствуют отдельные бифуркации удвоения периода. Также было установлено, что при высоких напряжениях питания наблюдается развитая хаотическая генерация, что представляет непосредственный интерес для информационно-телекоммуникационных систем, основанных на хаотических сигналах [14, 23, 24].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашения 14.В37.21.1207, 14.В37.21.0569), Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых – кандидатов (МК-672.2012.2) и докторов (МД-345.2013.2) наук, ведущих научных школ (проект НШ-1430.2012.2), РФФИ (проект 12-02-33071), а также фонда некоммерческих программ «Династия».

Библиографический список

1. Esaki L., Tsu R. Superlattices and negative differential conductivity in semiconductors // IBM Journal of Research and Development. 1970. Vol. 14, № 1. P. 61.
2. Tsu R. Superlattices to Nanoelectronics. Elsevier. 2005.
3. Овсянников М.И., Романов Ю.А., Шабанов В.Н., Логинова Р.Г. Полупроводниковые периодические структуры // Физика и техника полупроводников. 1970. Т. 4, № 12. С. 2225.

4. Шук А.Я. Сверхрешетки–периодические полупроводниковые структуры // Физика и техника полупроводников. 1974. Т. 8. С. 1841.
5. Bonilla L.L., Grahn H.T. Non-linear dynamics of semiconductor superlattices // Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68. P. 577.
6. Fromhold T.M., Patane A., Bujkiewicz S., Wilkinson P.B., Fowler D., Sherwood D., Stapleton S.P., Krokhin A.A., Eaves L., Henini M., Sankeshwar N.S., Sheard F.W. Chaotic electron diffusion through stochastic webs enhances current flow in superlattices // Nature. 2004. Vol. 428. P. 726.
7. Balanov A.G., Fowler D., Patane A., Eaves L., Fromhold T.M. Bifurcations and chaos in semiconductor superlattices with a tilted magnetic field // Phys. Rev. E. 2008. Vol. 77, № 2. P. 026209.
8. 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. Effect of temperature on resonant electron transport through stochastic conduction channels in superlattices // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 84. P. 235311.
9. Баланов А.Г., Гринавей М.Т., Короновский А.А., Москаленко О.И., Сельский А.О., Фромхолд Т.М., Храмов А.Е. Влияние температуры на нелинейную динамику заряда в полупроводниковой сверхрешетке в присутствии магнитного поля // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2012. Vol. 141, № 5. P. 960.
10. Wacker A. Semiconductor superlattices: a model system for nonlinear transport // Physics Reports. 2002. Vol. 357. P. 1.
11. Waschke C., Roskos H.G., Schwedler R., Leo K., Kurz H., Kohler K. Coherent submillimeter-wave emission from Bloch oscillations in a semiconductor superlattice // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 70. P. 3319.
12. Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. Динамический хаос как парадигма современных систем связи // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997, № 10. С. 4.
13. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
14. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 12. С. 1281.
15. Трубецков Д.И., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М., Храмов А.Е. Сложная динамика распределенных систем сверхвысокочастотной электроники // В кн. «Нелинейные волны'2004» / Под ред. Гапонова-Грехова А.В., Некоркина В.И. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2005.
16. Дмитриева Т.В., Рыскин Н.М., Титов В.Н., Шигаев А.М. Сложная динамика простых моделей электронно-волновых систем // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7, № 6. С. 66.
17. Кузнецов С.П. Нелинейная динамика лампы обратной волны: автомодуляция, мультистабильность, контроль // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. Т. 14, № 4. С. 3.

18. *Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Antonsen T.M.* Nonstationary phenomena in tapered gyro-backward-wave oscillators //Phys.Rev.Lett. 2001. Vol. 87, № 21. P. 218301.
19. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A., Makarov V.V., Gaifullin M.B., Alekseev K.N., Alexeeva N., Greenaway M.T., Fromhold T.M., Patane A., Kusmartsev F.V., Moskalenko O.I., Balanov A.G.* Effect of a resonator on high-frequency electron dynamics in semiconductor superlattices // Submitted to Phys.Rev.Lett. 2013.
20. *Takens F.* Detecting strange attractors in dynamical systems and turbulence// In book «Lectures Notes in Mathematics» / Eds D. Rand and L.-S. Young. N.-Y.: Springer-Verlag, 1981. P. 366.
21. *Берже П., Помо И., Видаль К.* Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991.
22. *Рабинович М.И., Трубецков Д.И.* Введение в теорию колебаний и волн. М.; Ижевск: РХД, 2000.
23. *Materassi D., Basso M.* Time scaling of chaotic systems: Application to secure communications // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2008. Vol. 18, № 2. P. 567.
24. *Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* Generalized synchronization of chaos for secure communication: Remarkable stability to noise // Phys. Lett. A. 2010. Vol. 374. P. 2925.

Саратовский государственный университет

*Поступила в редакцию 12.02.2013
После доработки 8.05.2013*

BIFURCATIONS AND TRANSITIONS TO CHAOS IN SUPERLATTICE COUPLED TO EXTERNAL RESONATOR

*V. V. Makarov, A. A. Koronovskii, S. A. Kurkin, Yu. I. Levin,
O. I. Moskalenko, V. A. Maksimenko, A. E. Hramov, A. G. Balanov*

In this letter we study nonlinear dynamics and transition to chaos in semiconductor superlattice coupled to external linear resonator. We have shown that such system demonstrates chaotic dynamics in wide range of supply voltage, whereas in autonomous superlattice only periodical dynamics exists. Revealed that transition to chaos in system goes through intermittency.

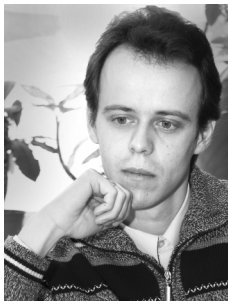
Keywords: Semiconductor superlattice, chaos, nonlinear dynamics, microwave generation, charge domains.



Макаров Владимир Владимирович – родился в Саратове в 1991 году, является студентом Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Участник конференций «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2011, 2012» (Саратов), «Волны – 2012, 2013» (Москва, Звенигород), лауреат конкурса фонда некоммерческих программ «Династия» в 2012 году.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: vladmak404@gmail.com

Короновский Алексей Александрович – родился в Саратове (1972). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1995), доктор физико-математических наук (2007), профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – нелинейная динамика и ее проявления в различных сферах человеческой деятельности, в том числе нелинейная динамика социально-экономических процессов. Автор ряда статей в центральной печати, а также монографий (в соавторстве) «Нелинейная динамика в действии» и «Непрерывный вейвлетный анализ», вышедших в Издательстве ГосУНЦ «Колледж», двухтомной монографии «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009, под редакцией А.А. Короновского, А.А. Кураева, Д.И. Трубецкого и А.Е. Храмова), монографии «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010, под редакцией С.И. Ильина и Д.И. Трубецкого) и др.



410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: alkor@nonlin.sgu.ru

Куркин Семён Андреевич – родился в Саратове (1986). Окончил с отличием факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского по специальности радиофизика и электроника (2008). В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Радиофизика». В настоящий момент – доцент кафедры физики открытых систем СГУ. Имеет порядка 30 публикаций в центральных реферируемых журналах, участник Всероссийских и Международных конференций. Область научных интересов – исследование электронно-волновых систем с интенсивными пучками заряженных частиц, изучение нелинейной динамики виртуального катода, а также генераторов, основанных на колебаниях виртуального катода (виркаторов).



410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: KurkinSA@gmail.com

Левин Юрий Иванович – родился в Саратове (1942), окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1965), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1974). В настоящее время – декан факультета нелинейных процессов СГУ, профессор, заведующий кафедрой физики открытых систем СГУ. Автор более 100 научных статей, научно-методических пособий и руководств.



410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: levin@nonlin.sgu.ru

Москаленко Ольга Игоревна – родилась в Саратове (1984), окончила факультет нелинейных процессов СГУ (2006), кандидат физико-математических наук (2008), доцент (2012). Доцент кафедры физики открытых систем СГУ, старший научный сотрудник лаборатории физики нелинейных явлений отделения физики нелинейных систем НИИ естественных наук СГУ. Область научных интересов – исследование классической и хаотической синхронизации в нелинейных системах; применение непрерывного вейвлет- и фурье-анализа к проблеме хаотической синхронизации; изучение обобщенной синхронизации в системах с однонаправленной и взаимной связью и ее возможных приложений; влияние шума на установление синхронных режимов; применение хаотической синхронизации для скрытой передачи информации; анализ хаотической синхронизации в сложных сетях. Автор более 70 статей в центральных реферируемых отечественных и зарубежных научных журналах.



410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: moskalenko@nonlin.sgu.ru



Максименко Владимир Александрович – родился в городе Аткарске Саратовской области (1989), является студентом 5 курса факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. Параллельно с обучением работает лаборантом-исследователем в лаборатории № 5 ОФНС НИИ ЕН СГУ. Областью научных интересов является нелинейная динамика пространственно-распределенных систем и анализ устойчивости динамических режимов. Автор более 10 научных публикаций, лауреат конкурса фонда некоммерческих программ «Династия» (2012).

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: maximenkov1@gmail.com



Храмов Александр Евгеньевич – окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2006) физ.-мат. наук. Профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – радиофизика в той ее части, которая связана со взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями, нелинейная динамика распределенных активных сред, методы анализа и моделирования динамических систем. Опубликовал (в соавторстве) книгу «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков» (Т. 1, М.: Физматлит, 2003; Т. 2, М.: Физматлит, 2004), монографию «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения» (Москва: Наука, Физматлит, 2003), двухтомную коллективную монографию «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009), коллективную монографию «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: aeh@nonlin.sgu.ru



Баланов Александр Геннадьевич – родился в Саратове (1973), окончил Саратовский государственный университет (1995). После окончания СГУ работал инженером в том же университете. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2000). В настоящее время на постоянной основе работает в университете Лафборо (Великобритания), по совместительству является ведущим научным сотрудником СГУ. Научные интересы – нелинейная динамика классических и квантовых систем. Опубликовал около 100 научных работ по вышеуказанной тематике.

England, Loughborough, LE11 3TU
Loughborough University
E-mail: a.balanov@lboro.ac.uk