

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО РЕЗОНАТОРА НА ДИНАМИКУ ДОМЕНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

В.В. Макаров¹, С.А. Куркин¹, А.А. Короновский^{1,3}, К.Н. Алексеев²,
А.Е. Храмов^{1,3}, А.Г. Баланов^{1,2,3}

¹*Саратовский Государственный Университет имени Н.Г. Чернышевского*

²*Department of Physics, Loughborough University, United Kingdom*

³*Саратовский Государственный Технический Университет им. Гагарина Ю.А.*
vladmak404@gmail.com

Исследование различных явлений в полупроводниковых сверхрешетках в настоящее время является важной и активно исследуемой задачей электроники сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов [1,2]. 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 [3]). В данном докладе представлены результаты численного исследования динамики пространственного заряда в полупроводниковой наноструктуре, помещенной во внешний добротный резонатор.

Для описания коллективной динамики заряда в полупроводниковой сверхрешетке используется стандартная модель, основанная на самосогласованной системе уравнений Пуассона и непрерывности, которые интегрируются численно [4]. 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.

На рис. 1 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) системы «сверхрешетка во внешнем резонаторе» при различных частотах внешнего резонатора. ВАХ имеет типичный для сверхрешеток вид с пиком Есаки-Тсу и падающим участком отрицательной дифференциальной проводимо-

сти [1]. Обратим внимание на сильную изрезанность на низких частотах внешнего резонатора, тогда как зависимость для автономной системы (сверхрешетка без резонатора) гладкая. При увеличении частоты резонатора изрезанность становится менее выраженной, при этом начало генерации смещается в сторону низких напряжений. Также обратим внимание на появление провала на ВАХ в области $V_0 \approx 370$ мА при превышении частотой резонатора частоты собственных колебаний сверхрешетки. Наблюдаемые эффекты говорят о существенном влиянии параметров внешнего резонатора на динамику пространственного заряда в сверхрешетке.

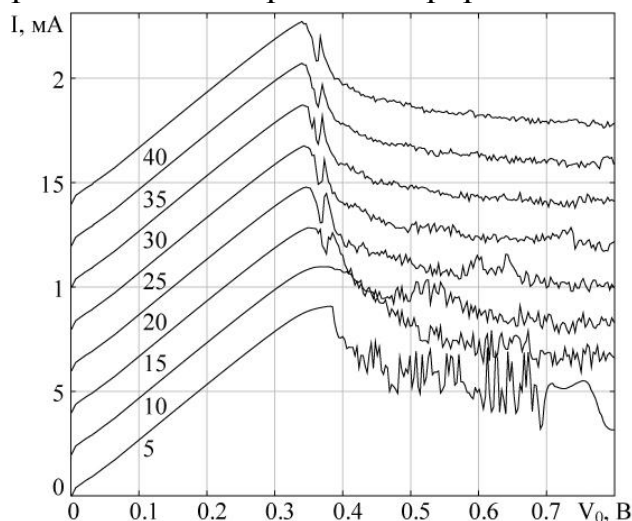


Рис.1 Вольт-амперные характеристики системы “сверхрешетка во внешнем резонаторе” при различных частотах внешнего резонатора, добротность резонатора $Q=150$. Для наглядности каждая следующая ВАХ сдвинута на 2 мА

Для дальнейшего исследования системы была построена бифуркационная диаграмма колебаний напряжения в резонаторе при изменении частоты резонатора от 14 до 22 ГГц, которая представлена на рис. 2. Хорошо видна широкая область хаоса в области 15 ГГц, что говорит о принципиальном усложнении характера колебаний в системе по сравнению с автономной, где возможна только периодическая генерация.

Для иллюстрации режимов колебаний в системе на врезке к рисунку приведены спектры колебаний напряжения в резонаторе при двух различных частотах внешнего резонатора. На врезке (а) представлен спектр колебаний, которые реализуются при $f_0=14.43$ ГГц. На нем присутствует только основная частота и ее гармоники, что соответствует простому периодическому режиму. На врезке (б) представлен спектр, соответствующий хаотическому режиму при $f_0=15.22$ ГГц. Спектр сильно зашумлен, основная частота размывается, четко выраженные гармоники отсутствуют.

Таким образом, в работе показано, что внешняя резонансная система существенно усложняет динамику полупроводниковой сверхрешетки, более того, внешний добротный резонатор может быть использован для получения хаотической широкополосной генерации, что представляет непосредственный интерес для электроники сверхвысоких частот. Следует от-

метить, что полученные теоретические результаты хорошо согласуются с результатами проведенных экспериментальных исследований [5]. Области хаотической динамики имеют место при малых частотах внешнего резонатора $f_Q < 16$ ГГц.

Области хаотической динамики по напряжению соответствуют областям скачков и изрезанности на ВАХ (см. рис. 1), что позволяет исследовать особенности поведения ВАХ с перестройкой динамических режимов динамики доменов в сверхрешетке.

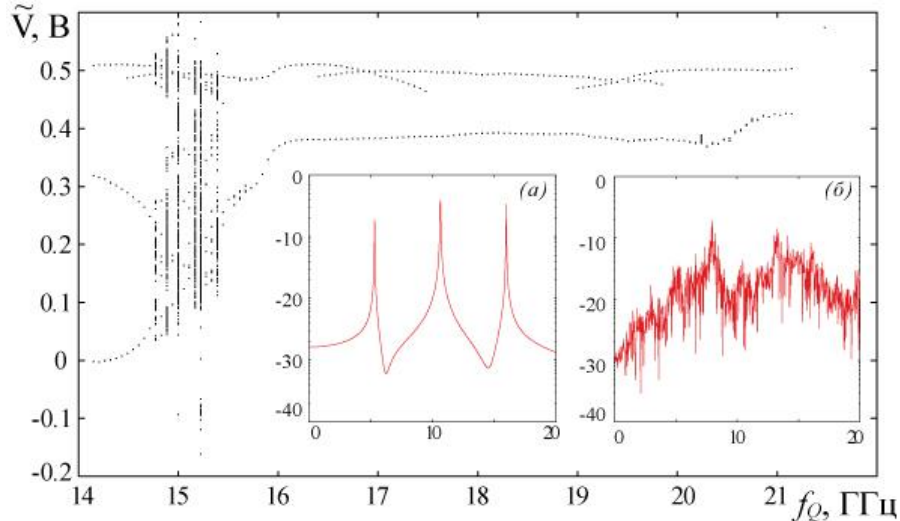


Рис. 2: Бифуркационная диаграмма колебаний напряжения в резонаторе при изменении частоты резонатора. Напряжение питания $V_0=510$ мВ, добротность резонатора $Q=750$. На врезке представлены спектры колебаний напряжения в резонаторе: $f_Q=14.43$ ГГц (а), $f_Q=15.22$ ГГц (б)

Работа выполнена при поддержке 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), а также РФФИ (проект 12-02-33071).

ЛИТЕРАТУРА

1. Esaki L., Tsu R. // IBM J. Res. Develop. E. 1970. V. 14. No 1. P. 61.
2. Vonilla L.L., Grahn H.T // Rep. Prog. Phys. E. 2005. V.68. No 3. P. 577.
3. Трубецков Д. И., Кузнецов С. П., Рыскин Н. М., Храмов А. Е. // Нелинейные волны-2004. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2005. С. 287–326.
4. Selskii A. O., *et al.* // Phys. Rev. B 2011. V. 84, P. 235311.
5. Hramov A. E., *et al.* // applied in Phys.Rev.Lett. 2013.