

06

Детерминированный стохастический резонанс в полупроводниковой бистабильной системе

© И.К. Камиллов, К.М. Алиев, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова

Институт физики Дагестанского научного центра РАН, Махачкала
E-mail: khmurat@iwt.ru

Поступило в Редакцию 1 июля 2003 г.

В полупроводниковой бистабильной системе с S -образной вольт-амперной характеристикой, проявляющей переход к хаосу через перемежаемость, впервые экспериментально обнаружен и исследован детерминированный стохастический резонанс. Определены спектральные области усиления внешнего сигнала, области захвата частоты в зависимости от частоты и амплитуды внешнего сигнала, а также от величины управляющего параметра.

Ранее [1–4] было показано, что в p -Ge (Au) при 77 К в условиях развития рекомбинационной неустойчивости тока имеют место различные режимы функционирования системы в пространстве параметров напряжение — эмиссия, S -образная вольт-амперная характеристика и переходы к хаотическому состоянию через перемежаемость.

В работах [5–7] была теоретически предсказана возможность резонансного поведения бистабильных систем с хаотической динамикой, в которых сосуществуют несколько аттракторов, при наличии слабого внутреннего шума. В результате этих исследований был открыт принципиально новый эффект, названный детерминированным стохастическим резонансом. Роль интенсивности шума в этом случае играет параметр системы, контролирующий медленный временной масштаб системы и, следовательно, ее спектральные свойства. Квазипотенциал, являющийся аналогом свободной энергии для неравновесного стационарного состояния и зависящий только от переменных состояния и параметров системы, принимает минимальные значения на аттракторе. При воздействии на систему периодического сигнала подбором параметров можно добиться совпадения периода сигнала и среднего времени переключения

с одного аттрактора на другой, т.е. условий, аналогичных случаю стохастического резонанса.

Для экспериментальной проверки теории детерминированного стохастического резонанса нами использовалась бистабильная полупроводниковая система с двойной инжекцией на основе $p\text{-Ge(Au)}$ с вольт-амперной характеристикой S -типа, которая в области переключения проявляет хаотическое поведение с перемежаемостью [1–4]. Исследованные структуры были изготовлены на основе дырочного германия, легированного сурьмой и компенсированного золотом. Концентрация примесей с глубокими уровнями составляла $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, фоновая концентрация $p_0 = 4.33 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, подвижность $\mu = 16500 \text{ см}^2/\text{V} \cdot \text{с}$, удельное сопротивление $\rho = 8.7 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{см}$ при 77 К. Для инжекции неравновесных носителей с контактов на противоположные торцы образца длиной 0.8 mm и поперечным сечением $\sim 4 \text{ мм}^2$ наносились контакты из индия с 0.5% галлия и олова с 7% сурьмы. Во избежание джоулева разогрева образца измерения проводились в импульсном режиме с длительностью импульса до 1 ms. Для введения в компьютер временных реализаций колебаний напряжения и тока использовался двухканальный аналого-цифровой преобразователь с частотой выборки 200 MHz. На их основе строились фазовые портреты, бифуркационные диаграммы, мощностные спектральные характеристики и определялась размерность системы. Для исследования отклика системы использовался прикладываемый к образцу гальванически развязанный через импульсный трансформатор внешний периодический сигнал, регулируемый в широких пределах амплитуды и частоты.

При подборе соответствующего порогу импульсного напряжения вольт-амперная характеристика исследуемой структуры переключалась на S -образии, что демонстрируют временные развертки напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$ на рис. 1, *a*. На ступеньке токового импульса до S -переключения хорошо видны обусловленные процессами доминирующей в образце хаотические колебания, о которых сообщалось ранее [1–4]. Если нагрузочное сопротивление, включенное последовательно с исследуемой структурой, подобрать по величине равным отрицательному сопротивлению на S -участке вольт-амперной характеристики, то система переходит в колебательный режим, напоминающий перемежаемость, с полосой сплошных шумов на мощностных спектральных характеристиках (рис. 1, *b*) с фрактальной размерностью $D = 2.23$.

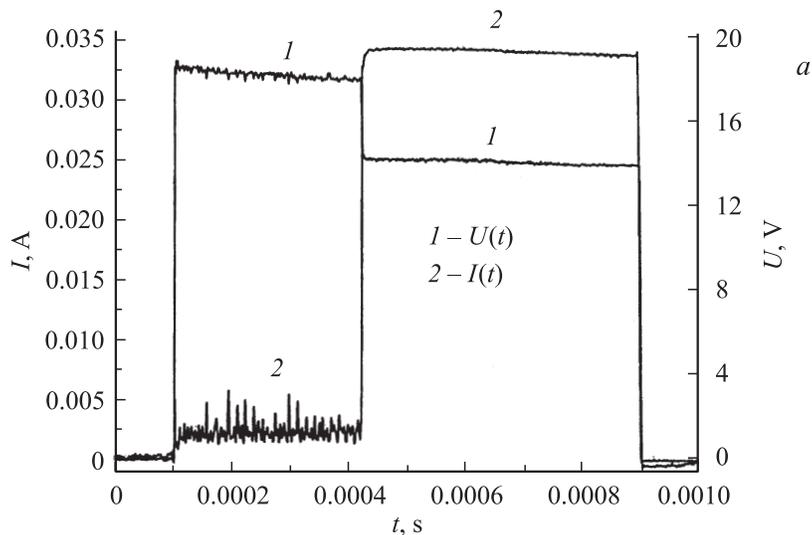


Рис. 1. *a* — импульсы напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$ на S -участке вольт-амперной характеристики; *b* — импульсы тока $I(t)$ и их спектральные характеристики без внешнего сигнала; *c* — импульсы тока $I(t)$ и их спектральные характеристики при наложении внешнего сигнала.

При наложении на эту систему малого внешнего гармонического сигнала с соответствующим подбором частоты в указанных условиях на мощностной спектральной характеристике на фоне полосы сплошных шумов появится резкий пик (рис. 1, *c*).

Регулируя параметр ϵ по электрическому полю и подбирая частоту внешнего сигнала, можно добиться резонансного усиления этого сигнала. На рис. 2, *a* приведен случай такого усиления на токовом импульсе. У основания импульса виден внешний прикладываемый к системе сигнал, а прямоугольный импульс тока модулирован уже усиленным сигналом. Величина усиления достигала 40 dB. Заметим, что резонансные частоты с хорошей когерентностью соответствуют значениям двойной величины характерного времени при S -переключении, которое, в свою очередь, зависит от параметра по электрическому полю.

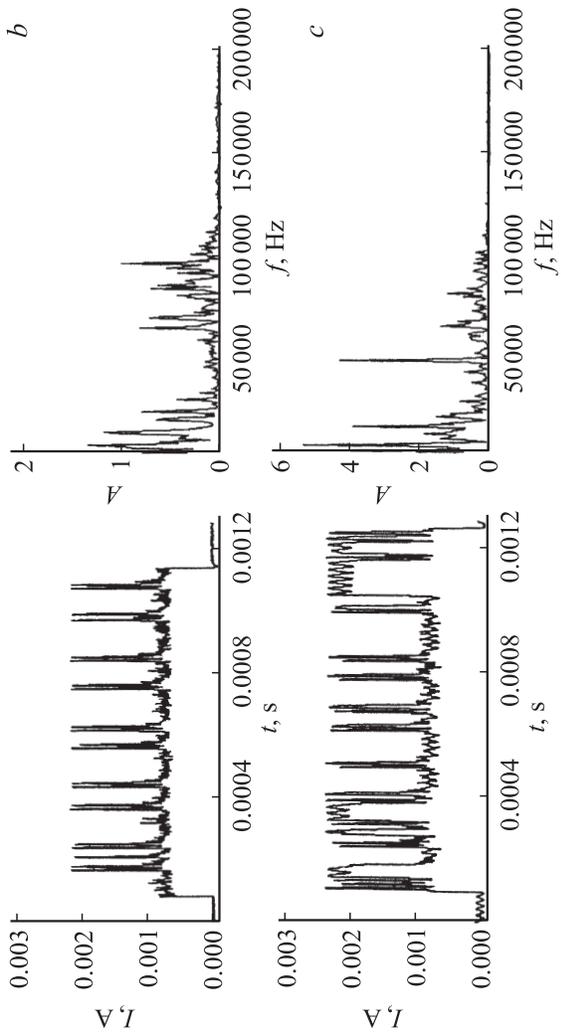


Рис. 1 (продолжение).

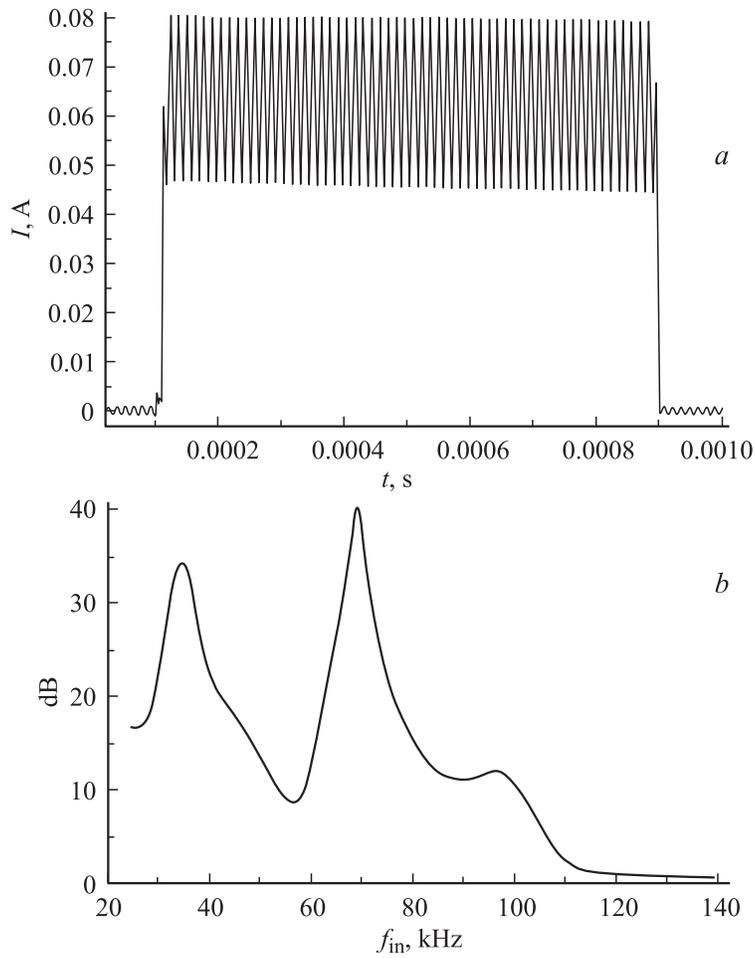


Рис. 2. *a* — импульсы тока при усилении внешнего сигнала на основной частоте f ; *b* — спектральная зависимость усиления; *c* — зависимость усиления внешнего сигнала от управляющего параметра.

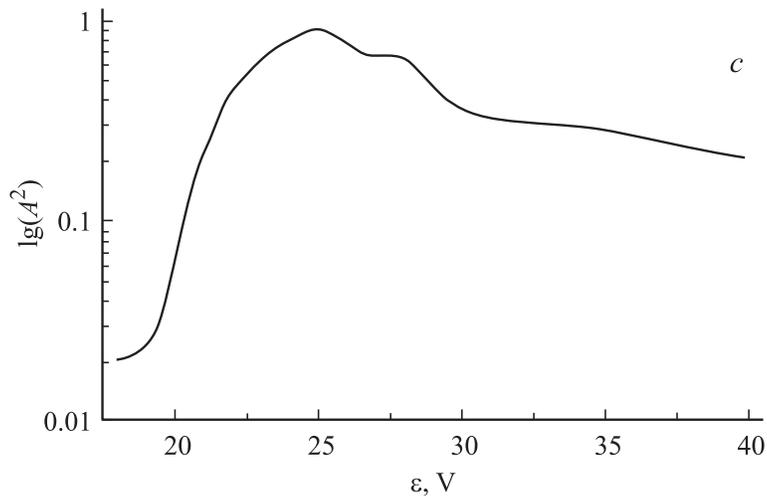


Рис. 2 (продолжение).

Отметим, что резонансное усиление с большой модуляцией импульса наблюдалось и на периоде $2T$, но при этом когерентность усиливаемого сигнала заметно ухудшалась.

Отдельно было экспериментально проверено усиление внешнего сигнала в диапазоне частот $20 \div 200$ КHz при заданном значении параметра по электрическому полю $20 V$ и постоянной амплитуде внешнего гармонического сигнала. Результаты эксперимента приведены на рис. 2, *b*.

В отсутствие внешнего шума фазовая траектория принадлежит тому или иному аттрактору в зависимости от величины параметра по электрическому полю и от начальных условий. Устойчивыми точками для бистабильной системы могут являться нижние и верхние значения точек *S*-переключения. При отсутствии внешнего шума для достаточно больших амплитуд внешнего сигнала процесс переключения в системе станет принципиально нелинейным, и его статистика будет существенно зависеть от параметра по электрическому полю ε . Согласно теории [5], средняя частота переключений монотонно растет с увеличением параметра ε в определенной области его значений. На рис. 2, *c* представлена

полученная зависимость коэффициента усиления от величины параметра ε , иллюстрирующая эффект стохастического детерминированного резонанса. Максимум усиления достигается в той области значений параметров, в которой частота Крамерса близка к частоте внешнего сигнала.

Эффект захвата частоты является универсальным и реализуется в широком классе динамических систем. Явление захвата средней частоты переключений внешним сигналом для различных значений параметра ε и эффект вынужденной синхронизации, проявляющийся в захвате частоты переключения периодическим сигналом на плоскости параметров „амплитуда внешнего сигнала — значение управляющего параметра“, наблюдались и в нашем эксперименте. Как и следовало ожидать, с ростом амплитуды внешнего сигнала область синхронизации увеличивается. Эксперимент демонстрирует наличие амплитудного порога синхронизации.

Следует заметить, что для пороговых значений параметров по электрическому полю, частоте и амплитуде при стохастическом резонансе наблюдается гистерезис. Если в условиях резонансного усиления внешнего сигнала, поддерживая постоянными параметры по электрическому полю, амплитуде и резонансной частоте внешнего сигнала, увеличивать только частоту выхода из области синхронизации, то наблюдается экспоненциальное уменьшение амплитуды тока с дальнейшей ее стабилизацией на уровне 0.77% от резонансного значения. Дальнейшее увеличение частоты приводит к последующему уменьшению амплитуды и распаду импульса на 2, 3 и более цугов импульсов и далее — к хаотическому состоянию, напоминающему перемежаемость. Таким образом, с помощью частоты можно управлять амплитудой модуляции импульса и количеством самих импульсов в данном временном интервале.

В заключение отметим, что представленные в данном сообщении результаты экспериментально подтверждают большинство теоретических предположений о возможности детерминированного стохастического резонанса в реальной полупроводниковой бистабильной системе с перемежаемостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 02-02-17817.

Список литературы

- [1] *Камилов И.К., Абакарова Н.С., Ибрагимова Х.О.* и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 21. В 5. С. 24–31.
- [2] *Ибрагимов Х.О., Камиров И.К., Алиев К.М.* и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В 3. С. 82–88.
- [3] *Abakarova N.S., Ibragimov Kh.O., Aliev K.M.* et al. // *Semicond. Sci. Technol.* 2001. V. 16. P. 11–14.
- [4] *Kamilov I.K., Ibragimov Kh.O., Aliev K.M.* et al. // *Semicond. Sci. Technol.* 2003. V. 18. P. 442–444.
- [5] *Анищенко В.С., Нейман А.Б., Мосс Ф.* и др. // *Успехи физических наук.* 1999. Т. 169. № 1. С. 7–38.
- [6] *Anishenko V.S., Neiman A.B., Safonova M.A.* // *J. Stat. Phys.* 1993. V. 70 (1–2). P. 183.
- [7] *Anishenko V.S., Safonova M.A., Chua L.O.* // *Int. j. Bif. Chaos.* 1992. V. 2. P. 397.