



Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005" International Conference "Fizika-2005" Международная Конференция "Fizika-2005"

7 - 9
İyun
June 2005
Июнь

№167
səhifə
page 644-647
стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ СТОХАСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ БИСТАБИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

КАМИЛОВ И.К., АЛИЕВ К.М., ИБРАГИМОВ Х.О., АБАКАРОВА Н.С.

*Институт физики Дагестанского научного центра РАН,
367003 Махачкала, ул. М.Ярагского, 94
khmurat@iwt.ru, тел.: +7(8722)626650, факс: +7(8722)628900*

В полупроводниковой бистабильной системе с S – образной вольтамперной 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.

Исследования последних лет показали, что шум в нелинейных системах может играть конструктивную роль, индуцируя более упорядоченные режимы, приводящие к образованию регулярных структур, увеличению степени когерентности отношения сигнал – шум и т.д. [1]. Одним из ярких примеров указанного типа поведения нелинейных систем при воздействии шума является эффект стохастического резонанса, заключающийся в сильном отклике нелинейной системы на слабый внешний сигнал при оптимальном подборе интенсивности внешнего шума в системе [2]. Возможность постановки задачи Крамерса для систем с хаотической динамикой, в которых сосуществуют несколько аттракторов и слабый внутренний шум, была теоретически показана в работах [3,4]. В результате этих исследований был открыт принципиально новый эффект, названный детерминированным стохастическим резонансом. Роль интенсивности шума в этом случае играет параметр системы, контролирующей 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. Отметим, что внутренние шумы, присущие хаотическим системам в точках кризисов аттракторов

при вариации управляющих параметров, видимо, играют определенную роль при резонансах, особенно в режимах перемежаемости, экспоненциально чувствительных к шумам [5 - 7].

Для экспериментальной проверки теории детерминированного стохастического резонанса нами использовалась полупроводниковая бистабильная система на основе двойно-инжекционной структуры p-Ge<Au> с S-образной вольтамперной характеристикой (ВАХ), которая в области переключения проявляет хаотическое поведение с перемежаемостью [8 - 11]. Исследованные двойно-инжекционные 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 $\mu = 16500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, удельное сопротивление $\rho = 8,7 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при 77 К. Для инъекции неравновесных носителей с контактов на противоположные торцы образца длиной 0,8 мм и поперечным сечением $\sim 4 \text{ мм}^2$ наносились контакты из индия с 0,5 % галлия и олова с 7% сурьмы. Во избежание джоулевого разогрева образца измерения проводились в импульсном режиме с длительностью импульса до 1 мс. Для введения в компьютер временных реализаций колебаний напряжения и тока использовался двухканальный аналого-цифровой преобразователь с частотой выборки 200 МГц. 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.

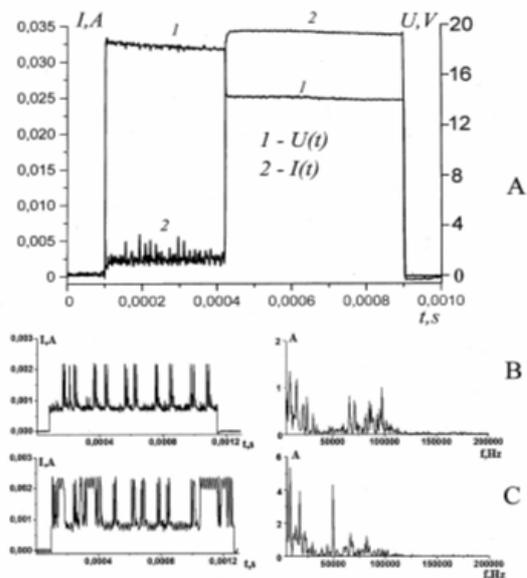


Рис.1. А. Импульсы напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$ на S – участке ВАХ; В. импульсы тока $I(t)$ и их спектральные характеристики без внешнего сигнала; С. импульсы тока $I(t)$ и их спектральные характеристики при наложении внешнего сигнала.

При подборе соответствующего порогу импульсного напряжения вольтамперная характеристика исследуемой структуры переключалась на S-образе, что демонстрируют временные развертки напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$ на рис. 1А. На ступеньке токового импульса до S-переключения хорошо видны обусловленные процессами доменизации в образце хаотические колебания, о которых мы сообщали ранее [8 - 11]. Если нагрузочное сопротивление, включенное последовательно с исследуемой структурой, подобрать по величине равным отрицательному сопротивлению на S-участке ВАХ, то система переходит в колебательный режим, напоминающий перемежаемость, с полосой сплошных шумов на мощностных спектральных характеристиках (рис.1В) с фрактальной размерностью $D=2,23$. 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 появляется резкий пик (рис.1С). Регулируя параметр ϵ по электрическому полю и подбирая частоту внешнего сигнала, можно добиться резонансного усиления этого сигнала. На рис.2А 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 Дб. 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. Необходимо отметить, что резонансное усиление с большой модуляцией импульса наблюдалось и на периоде $2T$ (рис.2В), но при этом когерентность усиливаемого сигнала заметно ухудшалось.

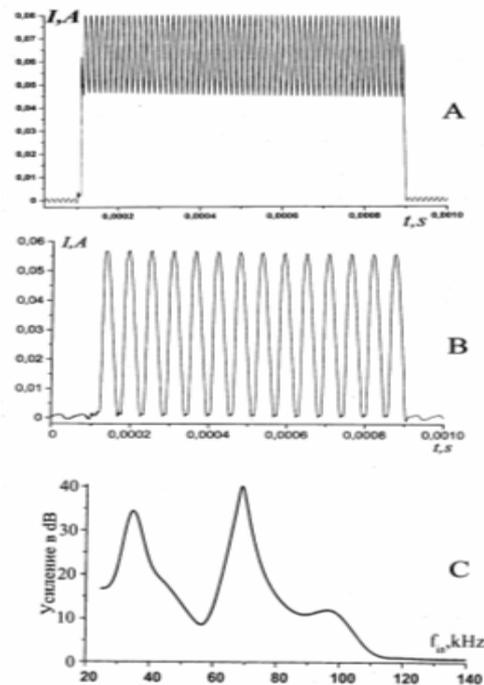


Рис. 2. Импульсы тока при усилении внешнего сигнала: А - на основной частоте f ; В - на частоте $f/2$; С - спектральная зависимость усиления.

Отдельно было экспериментально проверено усиление внешнего сигнала в диапазоне частот $20 \div 200$ кГц при заданном значении параметра по электрическому полю 20 В и постоянной амплитуде внешнего гармонического сигнала. Результаты эксперимента приведены на рис. 2С. При отсутствии 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. Если рассмотреть динамику системы в отсутствие внешнего шума для достаточно больших амплитуд внешнего сигнала, то процесс переключения станет принципиально нелинейным, и его статистика будет существенно зависеть от параметра по электрическому полю ϵ . Согласно теории [1], средняя частота переключений монотонно растет с увеличением параметра ϵ в определенной области его значений. На рис. 3А представлена 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.

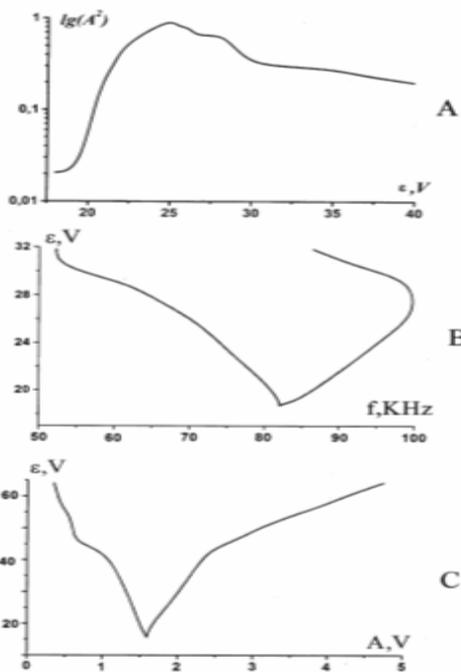


Рис. 3 А. Зависимость усиления внешнего сигнала от управляющего параметра; В. Зависимость области синхронизации частоты от амплитуды внешнего сигнала; С. Зависимость управляющего параметра от амплитуды внешнего сигнала.

Эффект захвата частоты является универсальным, реализуется в широком классе динамических систем с режимом перемежаемости и характерен для систем, в которых проявляется стохастический резонанс. Явление захвата средней частоты переключений

внешним сигналом для различных значений параметра ϵ иллюстрирует рис.3В. Частотный диапазон, представленный на графике, ограничен областью строгой когерентности сигнала. Как и следовало ожидать, с ростом амплитуды внешнего сигнала область синхронизации увеличивается. Кроме того рис. 3В демонстрирует наличие порога синхронизации. Таким образом, эффект внешней синхронизации частоты в детерминированной хаотической системе уверенно регистрируется. Аналогичная зависимость для эффекта вынужденной синхронизации, проявляющегося в захвате частоты переключения периодическим сигналом на плоскости параметров «амплитуда внешнего сигнала – значение управляющего параметра», дана на рис.3С.

Следует отметить, что пороговые значения параметров по электрическому полю, частоте и амплитуде при стохастическом резонансе и отмеченной выше областью захвата частоты не совпадают между собой при входе в эти области и выходе из них, т.е. наблюдается гистерезис по этим параметрам. Весьма интересное явление, связанное с этим, описано ниже. На рис. 4А приведены импульсы тока при резонансном усилении внешнего сигнала и заданных значениях параметров по электрическому полю, амплитуде и резонансной внешней частоте. Если при таких условиях, поддерживая постоянными параметры по электрическому полю в образце и амплитуду внешнего сигнала, увеличивать только частоту для выхода из области синхронизации, то наблюдается экспоненциальное уменьшение амплитуды тока с дальнейшей ее стабилизацией на уровне 0,77% от резонансного значения (рис.4В).

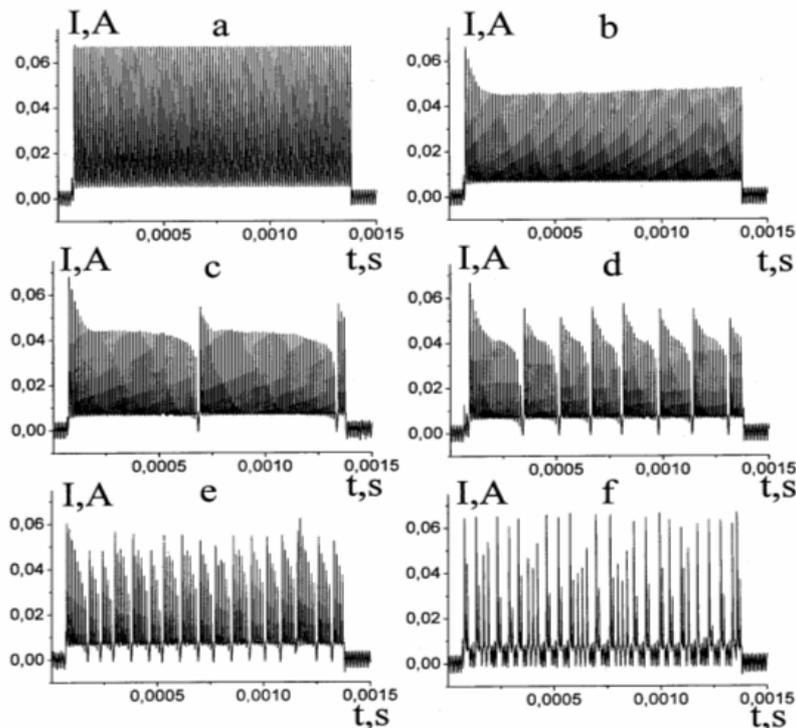


Рис. 4. Перестройка структуры волны при выходе из области резонанса в зависимости от частоты внешнего сигнала: А – 72,479 КГц; В – 80,871 КГц; С – 81,253 КГц; D – 81,634 КГц; Е – 82,778 КГц; F – 90,789 КГц

Дальнейшее увеличение частоты приводит к последующему уменьшению амплитуды и распаду импульса на 2, 3 и более цугов импульсов (рис.4С, D, E) и, далее, – к хаотическому состоянию, напоминающему перемежаемость (рис.4F). 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. В частности, экспериментально обнаружены резонансное усиление внешнего сигнала, эффект стохастической синхронизации средней частоты переключения бистабильной системы и эффект вынужденного захвата частоты при больших амплитудах внешнего сигнала, который обычно называют «синхронизацией гашением».

-
- [1]. В.С. Анищенко, А.Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шиманский – Гайер. Успехи физических наук.- 1999.- т.169, №1.- с. 7–38
- [2]. R. Benzi, A. Sutera, A. Vulpiani. J.Phys.A. – 1981.- v.14.- L 453
- [3]. V.S. Anishenko, A.B. Neiman, M.A. Safonova. – J.Stat.Phys.- 1993.-v.70(1–2).-p.183
- [4]. V.S. Anishenko, M.A. Safonova, L.O. Chua.- Int.J.Bif.Chaos.- 1992.-v.2.-p.397
- [5]. В.С. Анищенко, А.Б. Нейман. Письма в ЖТФ.- 1987.- т.17.- с.1063
- [6]. В.С. Анищенко, А.Б. Нейман. ЖТФ.- 1990.- т.60(1).- с.3
- [7]. V.S. Anishenko, M.A. Safonova, L.O. Chua.- Int.j.Bif.Chaos.- 1994.-v.4.-p.99
- [8]. И.К. Камилов, Н.С. Абакарова, Х.О. Ибрагимов, К.М. Алиев. Письма в ЖТФ.- 2001.- т.21, №5.- с.24-31
- [9]. Х.О. Ибрагимов, И.К. Камилов, К.М. Алиев, Н.С. Абакарова. Письма в ЖТФ.- 2003.- т.29, №3.- с.82 - 88
- [10]. N.S. Abakarova, Kh.O. Ibragimov, K.M. Aliev, I.K. Kamilov. Semicond.Sci.Technol. –2001. –v. 16. –p. 11–4
- [11]. I.K. Kamilov, Kh.O. Ibragimov, K.M. Aliev, N.S. Abakarova. Semicond.Sci.Technol. –2003. –v. 18. p. 442–444