

05;06;07

Рекомбинационная неустойчивость тока в германии с золотом в нелинейном режиме

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

Институт физики Дагестанского научного центра РАН, Махачкала
E-mail: kamilov@datacom.ru

Поступило в Редакцию 30 августа 2000 г.

Приведены первые результаты экспериментального исследования одномерной теоретической модели, разработанной для рекомбинационной неустойчивости тока в германии с золотом в двухпараметрическом пространстве. Обнаружены различные режимы функционирования системы в пространстве параметров напряжение — эмиссия, возникновение субдоменов и переходы типа порядок — беспорядок — порядок через перемежаемость или нестандартные эволюционные сценарии.

В реальной системе экспериментально проверена одномерная теоретическая модель [1,2], разработанная для электронного германия, компенсированного золотом, когда в сильных электрических полях рекомбинационная нестабильность ведет систему к неустойчивости и токовым осцилляциям. Модель учитывает не только временную, но и пространственную эволюцию возникающего в системе высокополевого домена при изменении приложенного напряжения V и коэффициента эмиссии β , т.е. в пространстве параметров напряжение — эмиссия. В зависимости от области этого параметрического пространства система демонстрирует три различных режима функционирования (омический, погашенный и пролетно-временной), возникают субдомены и наблюдаются другие новые свойства, нехарактерные для типичных нелинейных систем. Эти же свойства в нелинейном режиме могут проявляться и в случае эффекта Ганна [3,4], техническое применение которого в полупроводниковых прикладных устройствах чрезвычайно важно, так как исходные уравнения в моделях очень схожи.

Рекомбинационная неустойчивость тока, впервые обнаруженная Стафеевым [5], Бонч-Бруевичем и Калашниковым [6–9], достаточно подроб-

но изучена, как типичная линейная система, в *n*-германии с золотом в температурном интервале 16–35 К. Имеется целый ряд работ по исследованию этой неустойчивости и в других материалах [9–14], легированных Ni, Mn.

Нами впервые обнаружена рекомбинационная неустойчивость тока в *p*-Ge(Au) при 77 К и подробно исследована одномерная теоретическая модель [1,2] в широкой области двухпараметрического пространства (V, β). Эксперимент проводился при 77 К в импульсном режиме "генератора напряжения" с длительностью импульса до 500 μ s. Были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) и временные реализации, на основании которых строились фазовые портреты, бифуркационные диаграммы и мощностные спектральные характеристики. Для введения в компьютер временных реализаций токовых колебаний использовался аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с частотой выборки до 200 МГц. Автоматизированная экспериментальная установка позволяла плавно изменять параметры надкритичности в широкой области параметрического пространства. Для изменения коэффициента эмиссии использовалось освещение от обычной лампы накаливания (100 W) и/или инжекция неравновесных носителей с контактов.

Исследованные образцы были изготовлены на основе дырочного германия, легированного сурьмой и компенсированного золотом, с концентрацией примесей с глубокими уровнями $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, подвижностью $7 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ и удельным сопротивлением $2.8 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ при 77 К. Образцы вырезались в форме прямоугольных брусков длиной $8 \div 3 \text{ mm}$ и сечением 1 mm^2 . Для получения хорошей инжекции неравновесных носителей на противоположные концы образца наносились контакты из индия с 0.5% галлия и олова с 7% сурьмы.

ВАХ образцов в зависимости от величины коэффициента эмиссии содержали вначале омические или суперлинейные участки, которые в последующем переходили на насыщение тока или *N*-образные с колебаниями тока большой амплитуды, когда коэффициент модуляции по токовому импульсу достигал 90%. Увеличение напряжения приводило к резкому росту тока или к *S*-образным ВАХ. На рис. 1 приведена типичная ВАХ для образца в случае световой генерации неравновесных носителей. Возникающие в образце колебания в соответствие с теорией и экспериментом [6–14] объясняются периодическим возникновением, движением и разрушением области сильного электрического поля (домена) на контакте. Изучение распределения поля по длине образца

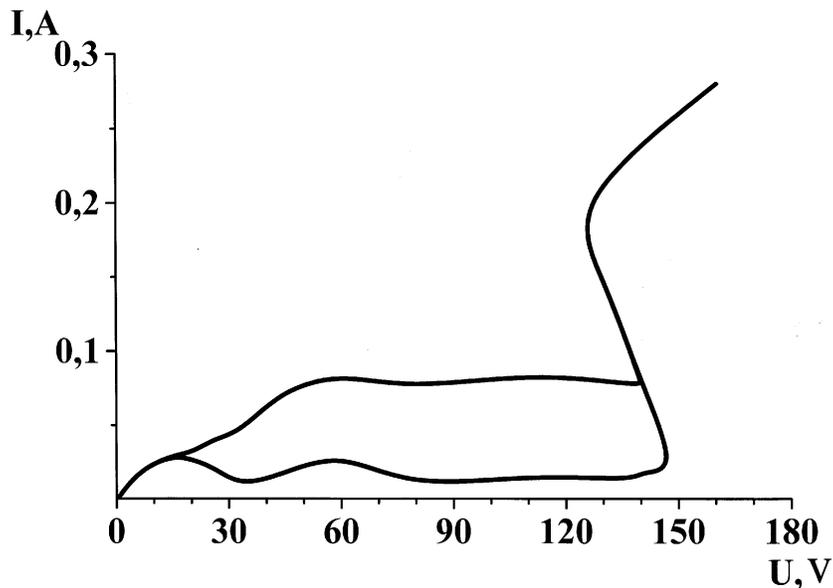
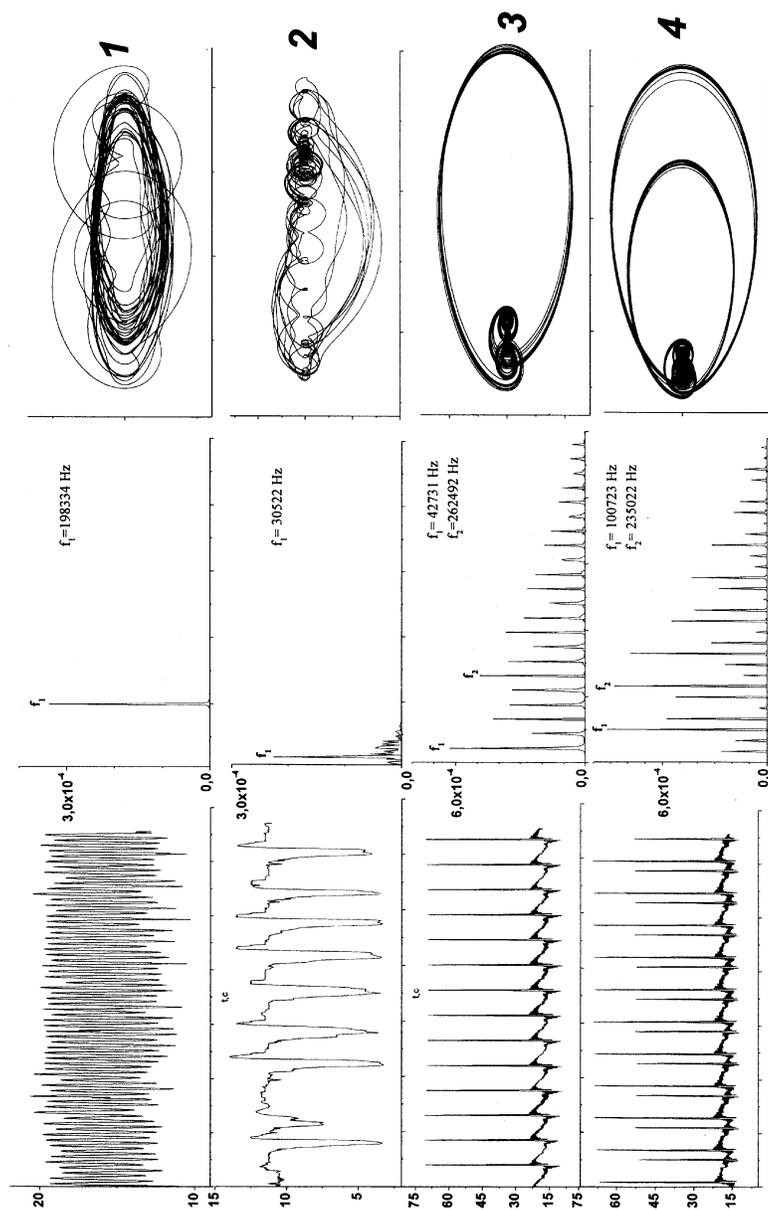


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика образца при 77 К.

показало, что в случае $p\text{-Ge}(\text{Au})$, в противоположность результатам для $n\text{-Ge}(\text{Au})$, высокополевой домен образуется всегда у анода и движется в сторону катода. Величина электрического поля в области анода достигала 2.8 kV/cm при среднем значении поля в образце 300 V/cm .

На рис. 2 приведены временные реализации, фазовые портреты колебаний тока в образце и спектральные мощностные характеристики для них при заданной освещенности и различных, но существенных для сравнения с теоретической моделью, значениях приложенного потенциала. Ситуация на рис. 2(1) соответствует случаю, когда коэффициент эмиссии β большой, т. е. домен не может поддерживать свою форму, его рост прекращается и он гасится прежде, чем достигнет катода. Остаточный домен, согласно модели [1], начинает расти опять, цикл повторяет сам себя, и эта более высокочастотная мода названа "погашенной" (quenched). Хотя, с нашей точки зрения, название "пульсирующая" больше соответствовало бы реальной ситуации в образце. Переход от



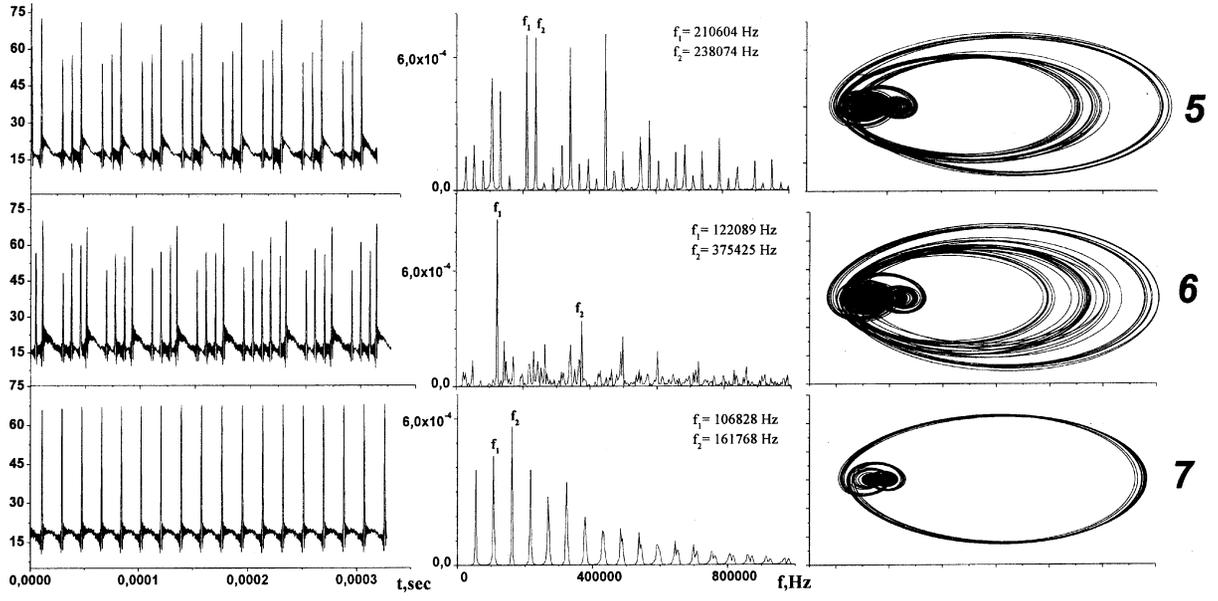


Рис. 2. Колебания тока в образце, их спектральные мощностные характеристики и фазовые портреты (первая, вторая и третья колонки соответственно) при различных значениях приложенного к образцу напряжения в В (сверху вниз): 1 — 16, 2 — 20, 3 — 98, 4 — 105, 5 — 120, 6 — 140 и 7 — 142.

погашенной моды к пролетно-временной происходил в зависимости от параметров надкритичности двумя путями. Первый — через перемежаемость, когда амплитуда малых колебаний погашенной моды медленно возрастает до внезапного появления пика с большой амплитудой или амплитуда погашенной моды уменьшается, сами колебания становятся менее регулярными, а пики с большой амплитудой встречаются чаще. При этом ламинарной фазой перемежаемости являлись колебания погашенной моды, а турбулентными всплесками — колебания пролетно-временной моды. Второй путь, когда система при некоторых параметрах скачком изменяла пространственную структуру волны, как это приведено на рис. 2(2). Заметим, что на поперечных ”холловских” зондах, расположенных на середине образца на расстоянии 3 mm от катода и анода, колебания погашенной моды не проявляются, тогда как любой пик большой амплитуды, соответствующий турбулентному всплеску, всегда возникал синхронно с токовыми колебаниями в образце. При дальнейшем увеличении приложенного потенциала подвижный домен вырастал достаточно большим, чтобы добраться до катода, и система демонстрировала колебательное поведение, частота которого определяется временем, в течение которого подвижный домен перемещается от анода к катоду (рис. 2(3)). Эта ситуация соответствует пролетно-временной (transit-time) моде подвижных доменов в теоретической модели. Кроме того, модель [1] предполагает возникновение субдоменов при соответствующем подборе параметров пространства в системе. На рис. 2(4, 5, 6) приведены случаи возникновения 1, 2, 3 и более субдоменов. При этом частота появления основных доменов уменьшается, промежутки между ними заполняются субдоменами, одновременно растет шумовая компонента в системе. Нами обнаружены случаи, когда число субдоменов в образце не всегда постоянно, хотя параметры системы во время измерений поддерживались постоянными (рис. 2(6)). Дальнейший рост потенциала приводил к скачкообразной перестройке системы и ее самоорганизации: в образце снова повторялся однодоменный случай (рис. 2(7)). При этом главный пик вновь возникающей однодоменной моды всегда превышал по частоте главный пик предыдущей однодоменной моды, что связано с ростом скорости домена, обусловленным увеличением дрейфовой скорости при увеличении приложенного потенциала. Таких переходов типа порядок — беспорядок — порядок при заданном значении интенсивности освещения во всем интервале приложенных напряжений, вплоть до S -переключения, обнаружено три. В промежут-

точных значениях параметрического пространства обнаружены хаотические состояния, соответствующие перемежаемости, которые, возможно, связаны с взаимодействием различных мод колебаний. Образование субдоменов и соответствующие им колебания с периодами 2, 3, 4, 6 и 8 не вписываются в известные стандартные сценарии перехода к хаотическому состоянию (скажем, через удвоение периода Фейгенбаума [15]) и не могут быть описаны соответствующими универсальными операторами и константами, характерными для обычного детерминированного хаотического состояния. Но при выходе системы из хаотического состояния к самоорганизации можно уловить обратный каскад бифуркаций удвоения периода при очень тонком подборе параметров в соответствующей области параметрического пространства.

Так называемый "омический" режим модели [1] нами наблюдался в эксперименте либо в случае слишком высокой интенсивности генерации неравновесных носителей за счет освещения или инжекции, либо когда при заданном темпе генерации электрические поля не были достаточно высокими, чтобы процессы захвата на глубокие уровни преобладали над процессом эмиссии. Из анализа экспериментальных результатов следует, что заданный режим функционирования системы (например, двухдоменный режим) можно поддерживать в достаточно широкой области параметрического пространства, если одновременно увеличить интенсивность освещения и величину электрического поля, приложенного к образцу. Перед S -подключением (катастрофой) в образце наблюдалось беспорядочное образование доменов, что больше напоминает явление перемежаемости в обычных детерминированных системах. Время существования доменов и их количество перед переключением трудно контролируемы в системе и чрезвычайно чувствительны к изменению как электрического поля, так и коэффициента эмиссии.

В заключение отметим, что приведенные экспериментальные результаты полностью подтверждают теоретическую модель [1]. Обнаружены три режима функционирования системы: омический, погашенный и пролетно-временной. Установлено существование в системе одно-, двух- и более субдоменных состояний и переходов типа порядок-беспорядок, осуществляемых через перемежаемость или нестандартный сценарий перехода к хаотическому состоянию.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 00-02-17329).

Список литературы

- [1] *Ken-ichi Oshio, Hideo Yahata* // J. Phys. Soc. Japan. 1996. V. 65. N 5. P. 1490–1499.
- [2] *Ken-ichi Oshio, Hideo Yahata* // J. Phys. Soc. Japan. 1998. V. 67. N 7. P. 2538–2545.
- [3] *Ken-ichi Oshio, Hideo Yahata* // J. Phys. Soc. Japan. 1993. V. 62. № 10. P. 3639–3650.
- [4] *Ken-ichi Oshio, Hideo Yahata* // J. Phys. Soc. Japan. 1995. V. 64. N 5. P. 1823–1836.
- [5] *Стафеев В.И.* // ФТТ. 1963. Т. 5. № 11. С. 3095–3104.
- [6] *Константинов О.В., Перель В.И.* // ФТТ. 1964. Т. 6. № 11. С. 3364–3371.
- [7] *Константинов О.В., Царенков Г.В.* // ФТТ. 1966. № 6. С. 1867–1877.
- [8] *Бонч-Бруевич В.Л.* // ФТТ. 1966. Т. 8. № 6. С. 1753–1760.
- [9] *Карпова И.В., Калашиников С.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 6. В. 12. С. 954–956.
- [10] *Курова И.А., Врана М.* // ФТП. 1967. Т. 1. № 7. С. 1095–1099.
- [11] *Ridley В.К., Pratt R.G.* // J. Phys. Chem. Solids. 1965. V. 26. N 1. P. 21–31.
- [12] *Варламов И.В., Осипов В.В., Полторацкий Э.А., Ржанов А.Е.* // ФТП. 1970. Т. 4. № 11. С. 2195–2197.
- [13] *Карпова И.В., Сабликов В.А., Сыровегин С.М.* // ФТП. 1968. Т. 2. № 4. С. 609–612; 1982. Т. 16. № 9. С. 1601–1605.
- [14] *Viteliene S., Požela J., Tamaševičius A.* // Phys. Stat. Sol. (b). 1986. V. 134. P. K71–K73.
- [15] *Фейгенбаум М.* // УФН. 1983. Т. 141. № 2. С. 343–374.