

06.1

Рекомбинационная неустойчивость и двойное S -переключение в p -Ge(Au)

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

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

Поступило в Редакцию 30 мая 2002 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований образцов p -Ge(Au) и проведено их качественное сравнение с одномерной теоретической моделью, разработанной для рекомбинационной неустойчивости в германии с золотом в двухпараметрическом пространстве „напряжение–эмиссия“. Показано существование в системе трех режимов функционирования в пространстве параметров. Обнаружено наличие на вольт-амперной характеристике (ВАХ) второго участка с S -переключением, который, возможно, связан с шумоиндуцированным неравновесным фазовым переходом.

Продолжено экспериментальное исследование [1,2] в реальной системе одномерной теоретической модели [3,4], разработанной для германия с глубоколежащими уровнями золота, когда рекомбинационная нестабильность ведет систему к неустойчивости и токовым осцилляциям. В соответствии с моделью, учитывающей не только временную, но и пространственную эволюцию возникающего в системе высокополевого домена в двухпараметрическом пространстве V и β (где V — приложенное к образцу напряжение, β — коэффициент эмиссии), были обнаружены различные режимы функционирования, возникновение субдоменов и их перестройка, а также другие свойства, необычные для типичных нелинейных систем. При этом вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов, в зависимости от области параметрического пространства, изменялись от омической к суперлинейной, в последующем плавно переходили к насыщению или N -образной форме и далее с ростом параметров надкритичности — к S -образной ВАХ. Основные результаты экспериментального анализа [1,2] были проведены для участков ВАХ с насыщением или N -образией для образцов с межконтактным расстоянием $d = 3 \div 8$ мкм и сечением 1 мм².

В настоящем сообщении приведены экспериментальные результаты, полученные в определенных подобранных областях параметрического пространства при инжекции с контактов и одновременном освещении „коротких“ („короткие“ не в обычном смысле соотношения $d \leq L_D$, где L_D — диффузионная длина, а сравнительно с длинами образцов, исследованных ранее [1,2]) $p^+ - p - n^+$ -структур с $d = 1 \div 3$ мм на основе p -Ge(Au) со следующими характеристическими параметрами при 77 К: I группа образцов — $\rho_1 = 8.7 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$, $\mu_1 = 16500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $P_{01} = 4.33 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$, II группа образцов — $\rho_2 = 1.95 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, $\mu_2 = 29900 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $P_{02} = 1.07 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ (где ρ — удельное сопротивление, μ — подвижность дырок, P_0 — равновесная концентрация дырок). Измерения проводились в температурном интервале 77–130 К в импульсном режиме с длительностью до $500 \mu\text{s}$ во избежание джоулева разогрева образца, а длительности пилообразного импульса напряжения для записи восходящей и нисходящей ветвей ВАХ составляли $400 \mu\text{s}$. Для введения в компьютер временных реализаций токовых колебаний с образца использовался аналого-цифровой преобразователь с частотой выборки 200 МГц. По этим данным строились фазовые портреты, бифуркационные диаграммы, а также определялись мощностные спектральные характеристики.

Для плавного изменения коэффициента эмиссии β использовалось освещение от обычной лампы накаливания (100 W) с оптическими светофильтрами или инжекция неравновесных носителей с контактов, для чего на противоположные концы образца с поперечным сечением 1 mm^2 наносились контакты из индия с добавлением 0.5% галлия, 0.5% олова и 7% сурьмы.

Отличительной особенностью ВАХ для сравнительно „коротких“ образцов в случае освещения и отсутствия инжекции с контактов является плавный переход от омического участка ВАХ к сублинейному (рис. 1, 1) с возникновением хаотических колебаний с началом сублинейности и с полосой сплошных шумов (рис. 1, 2), из которых с ростом приложенного напряжения возникают пикообразные колебания (рис. 1, 3) доменного типа, которые иногда носят периодический характер, проявляют удвоение, утроение и т.д. периода, а на большей части сублинейного участка ВАХ представляют собой хаотические колебания, напоминающие перемежаемость. Амплитуда модуляции импульса с колебаниями тока при этом достигает 90%, спектральная характеристика представляет собой полосу сплошных шумов, а ВАХ с дальнейшим ростом напряжения становится S-образной.

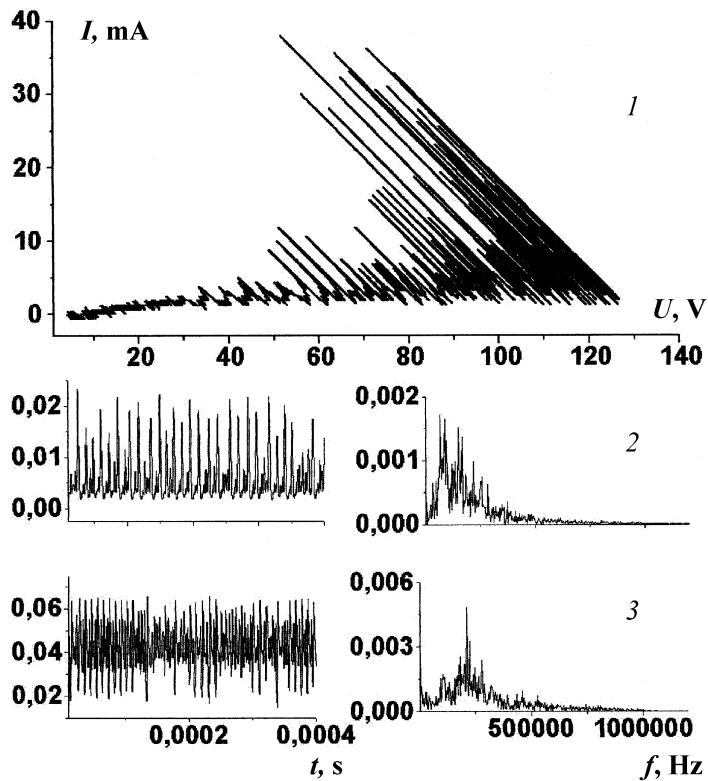


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика (1), временные реализации и спектры мощности (2, 3) при различных значениях напряжения на образце: 2 — 36.7 V, 3 — 56 V.

В случае одновременных инъекции с контактов и освещения с ростом напряжения на ВАХ имеет место плавный переход линейного участка в суперлинейный с последующим переходом на сублинейный или N -образный. В начале сублинейного или N -участков возникают колебания тока, близкие по форме к когерентным, которые с ростом приложенного напряжения через квазипериодичность (рис. 2, 1) переходят в хаотические колебания (рис. 2, 2). Дальнейшее увеличение напряжения приводит к пичкообразным колебаниям доменного

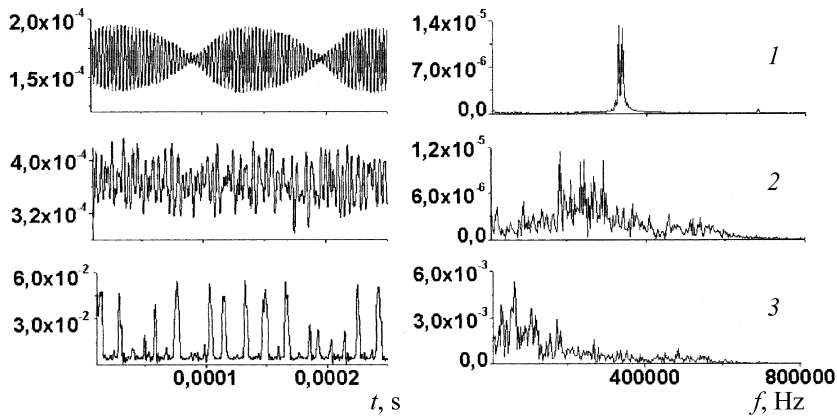


Рис. 2. Временные реализации, фазовые портреты и спектры мощности при значениях приложенного напряжения: 1 — 31.4 V, 2 — 102.4 V, 3 — 107.5 V.

типа (рис. 2, 3), которые в некоторых областях параметрического пространства проявляют колебания периода 2, 3, 4, а в последующем, перед S -переключением, переходят в хаотическое состояние через перемежаемость. Необходимо отметить, что в „коротких“ образцах трудно наблюдать все разнообразие, связанное с перестройкой пространственной структуры волны, плавное возникновение субдоменов, хотя теоретически предсказанные режимы функционирования (омический, погашенный и пролетно-временной) при тонкой подборке областей параметрического пространства всегда можно наблюдать на участках насыщения или N -образной ВАХ до S -переключения.

Наиболее интересные результаты получены в образцах I группы с длиной $d = 1 \div 2$ mm с инжектирующими контактами при одновременном освещении. На рис. 3 приведены ВАХ образца при плавном увеличении приложенного напряжения и заданной величине освещенности. Хорошо видны плавный переход от омического режима к суперлинейному и возникновение колебаний тока при переходе ВАХ к сублинейности (рис. 3, 1). Перед S -переключением, как мы уже говорили, в образце возникают шумы большой амплитуды, а само S -переключение происходит уже в виде колебаний большой амплитуды, близких по форме к когерентным колебаниям. Две ветви ВАХ (восходящая и нисходящая) образуют предельный цикл. Дальнейшее

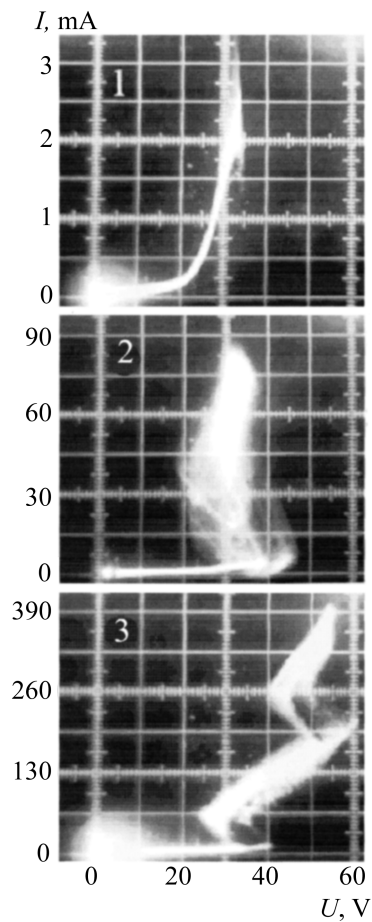


Рис. 3. Эволюция ВАХ при увеличении приложенного напряжения.

увеличение напряжения приводит к циклам периода 2 и 3, и шумовая компонента при этом в образце начинает снова резко возрастать, что приводит к нарушению когерентности колебаний и формированию S -образной зависимости (рис. 3, 2). Положительные ветви участка после S -переключения заполнены шумами большой амплитуды, что под-

тверждается мощностной спектральной характеристикой. Дальнейшее увеличение параметра по электрическому напряжению приводит к возникновению S -образного участка (рис. 3, 3), на положительной ветви которого шумы полностью плавно затухают. Необходимо отметить, что восходящие и нисходящие ветви ВАХ проявляют на обоих участках S -переключения значительный гистерезис $\sim 25\%$.

Физические механизмы, объясняющие приведенные выше результаты, можно свести к следующему. Участки ВАХ до первого S -переключения и характерное для этой области ВАХ поведение рекомбинационной неустойчивости тока в двухпараметрическом пространстве вполне соответствуют теоретической и экспериментальной моделям [1–4]. Первое S -переключение разумно можно объяснить τ -механизмом Стафеева [5]. Инжекция неравновесных носителей и интенсивное освещение образца могут привести к заполнению уровня золота $E_{\text{Au}}^1 \approx 0.15 \text{ eV}$ в Ge и, следовательно, к резкому увеличению времени жизни неосновных носителей тока, т.е. в данном случае электронов. Возникновение второго S -участка на ВАХ, в формировании которого может играть роль второй глуболежащий уровень золота, находящийся ниже дна зоны проводимости $E_{\text{Au}}^2 \approx 0.2 \text{ eV}$, трудно интерпретировать, так как в образцах с межконтактным расстоянием более 3 и менее 1 mm нам не удалось обнаружить второй S -образный участок. Возможно, в образце определенной длины из-за характерных пространственно-временных масштабов или параметров происходит шумоиндуцированный неравновесный фазовый переход в виде S -переключения. Возможные варианты трикритических точек в пространстве параметров, подобных нашему, приведены в [6]. В работе [7] показано, что с помощью инжекции можно увеличить концентрации неосновных носителей — электронов — в p -Ge(Au) по сравнению с равновесной настолько, что величина $\alpha = (n/p)(\tau_n/\tau_p)$ станет больше 1 (где n и p — концентрация электронов и дырок, τ_n и τ_p — их времена жизни), что является необходимым условием возбуждения рекомбинационных волн [8].

Необходимо отметить, что мощностные спектральные характеристики демонстрируют рост интенсивности низкочастотных шумов перед S -переключением, что аналогично росту длинноволновых флуктуаций при фазовых переходах.

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

Список литературы

- [1] Камиллов И.К., Абакарова Н.С., Ибрагимов Х.О., Алиев К.М. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 6. С. 24–31.
- [2] Abakarova N.S., Ibragimov Kh.O., Aliev K.M., Kamilov I.K. // *Semicond. Sci. Technol.* 2001. V. 16. N 11. P. 909–912.
- [3] Ken-ichi Oshio, Hideo Yahata // *J. Phys. Soc. Japan.* 1996. V. 65. N 5. P. 1490–1499.
- [4] Ken-ichi Oshio, Hideo Yahata // *J. Phys. Soc. Japan.* 1998. V. 67. N 7. P. 2538–2545.
- [5] Стафеев В.И. // ФТТ. 1963. Т. 5. № 11. С. 3095–3104.
- [6] School E. *Nonequilibrium Phase Transition in semiconductors.* Berlin: Springer, 1987.
- [7] Карлова И.В., Сыровегин С.М. // ФТП. 1982. Т. 16. № 9. С. 1601–1605.
- [8] Константинов О.В., Перель В.К., Царенков Г.В. // ФТТ. 1967. Т. 9. С. 1761.