

06;12

Пространственно-временные структуры в поперечно-протяженной полупроводниковой системе

© Ю.А. Астров, Х.-Г. Пурвинс

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021, С.-Петербург, Россия
E-mail: yuri.astrov@pop.ioffe.rssi.ru
Institute of Applied Physics, Münster University,
Corrensstr. 2/4, 48149 Münster, Germany
E-mail: purwins@uni-muenster.de

Поступило в Редакцию 4 июня 2002 г.

Обнаружено, что в полупроводниковой системе с N -образной вольт-амперной характеристикой могут порождаться нестационарные структуры, неоднородные в направлении поперек тока. Предполагается, что в изученном случае образцов полуизолирующего GaAs большого поперечного сечения эффект обусловлен потерей устойчивости режима однородного движения домена.

Интерес к исследованиям самоорганизации пространственных структур в распределенных неравновесных системах обусловлен, в частности, возможной перспективой создания вычислительных устройств, основанных на новых принципах [1]. В полупроводниковых распределенных средах часто наблюдаются диссипативные структуры. Классическим примером является спонтанное образование полевых доменов при N -образной вольт-амперной характеристике (ВАХ) [2]. Исследования доменных электрических неустойчивостей в полупроводниках ограничивались, насколько нам известно, узкими (квазиодномерными) системами, в которых структура домена в поперечном к току направлении не рассматривается (см., например, недавний обзор [3], посвященный проблеме доменной неустойчивости в полуизолирующем (si) GaAs).

В работе [4] нами наблюдалось сложное поведение планарной системы „полупроводник–газоразрядный промежуток (ГРП)“ с si -GaAs электродом. В цитируемой работе изучалась динамика пространственно-временных структур, образованных ансамблем пульсирующих нитей

тока. Параметры газоразрядной области, использовавшиеся в тех экспериментах, не позволяют сделать вывод об определяющей роли полупроводникового электрода в возникновении наблюдаемых паттернов.

В настоящей работе применяется методика сопоставления транспортных свойств структур двух типов, одна из которых содержит ГРП [5]. В обеих структурах последовательно применяется один и тот же образец *si*-GaAs. Полученные данные позволяют заключить, что пространственно-неоднородные распределения тока, которые технически легко наблюдать в структуре с ГРП, генерируются полупроводниковой частью, т.е. существуют и в отсутствие ГРП. Использовались пластины GaAs¹ толщиной 1.5 mm. Одна из систем (структура I типа) полностью твердотельная. В ней на одной из сторон пластины методом диффузии цинка изготавливалась сильнолегированная (p^+) область толщиной порядка 10 μm , которая служила контактом к образцу. На другую сторону пластины путем распыления в вакууме наносилась тонкая пленка золота, которая являлась вторым контактом.

В структуре II типа вместо металлической пленки роль второго контакта выполнял тонкий газонаполненный промежуток, в котором при достаточно высокой разности потенциалов возникает газовый разряд. Разрядная область толщиной 100 μm заполнялась аргоном при давлении 200 GPa, т.е. параметры газоразрядной области выбирались такими, что в условиях наших экспериментов в ней устанавливался таунсендовский режим горения разряда (такая форма разряда вследствие его устойчивости используется в спектральных преобразователях изображений, построенных на системе „полупроводник–ГРП“ [6]). В этих приборах применяются фоточувствительные полупроводниковые электроды с линейной ВАХ). Ток структур контролировался освещением полупроводника через p^+ -электрод светом лампы накаливания. Площадь сечения токопроводящего канала в обеих структурах 18 mm.

В структурах II типа благодаря свечению газа разрядного зазора могла осуществляться визуализация возникающих токовых распределений. Они регистрировались видеокамерой, полученные изображения пересылались в компьютер и обрабатывались.

На рис. 1 показаны примеры стационарных ВАХ структур при отсутствии (*a*) и наличии (*b*) газоразрядной области. Пары кривых 1, 1' и 2, 2' получены при одинаковых интенсивностях освещения полупровод-

¹ Использовался полуизолирующий GaAs производства фирмы Freiberg, Германия.

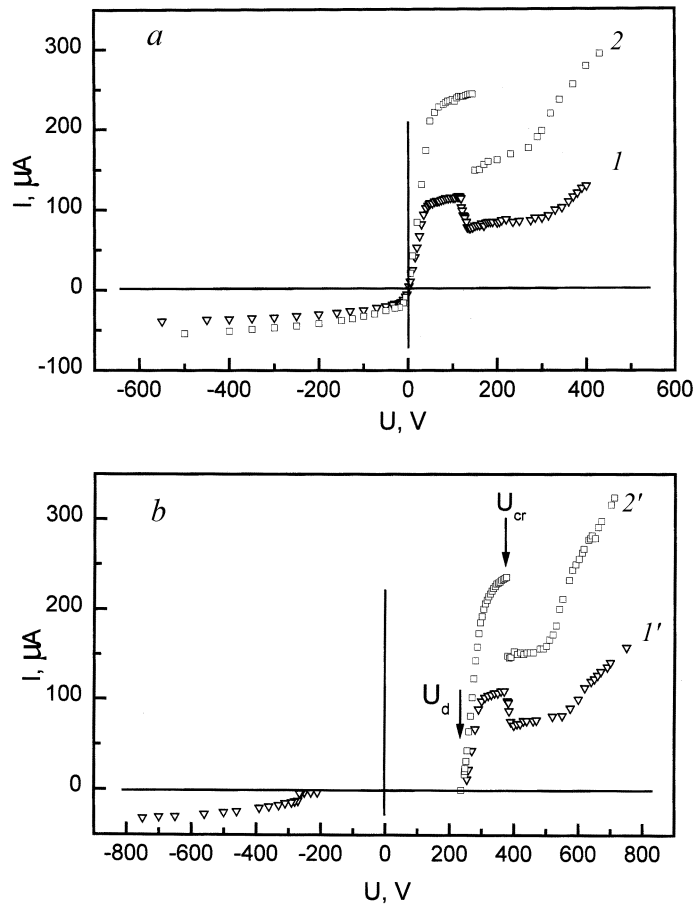


Рис. 1. ВАХ структур в отсутствие (а) и при наличии (б) газоразрядного промежутка. Кривые 1 и 1', а также 2 и 2' получены для одинаковых интенсивностей подсветки полупроводника. Положительные значения напряжения соответствуют отрицательному потенциалу на p^+ -электроструктур.

ника светом лампы накаливания через p^+ -прозрачный электрод. Для одной из полярностей напряжения наблюдается выраженная N -образность ВАХ. Сравнение данных для обеих структур показывает, что наличие

газонаполненного зазора не меняет заметно характера транспортных особенностей системы: соответствующие ВАХ лишь смещаются на величину потенциала зажигания разряда в газонаполненной области U_d . Изменение интенсивности подсветки не приводит к существенному сдвигу порогового напряжения U_{cr} , при котором наблюдается падение тока с ростом U . При использовании подсветки в ИК-области спектра (свет лампы пропускаться через кремниевый фильтр) существование N -образности ВАХ не замечено.

При приближении U к U_{cr} снизу в структурах наблюдаются осцилляции тока относительно малой амплитуды. Такое поведение образцов *si-GaAs* наблюдалось ранее (см. обзор [3]). При $U \geq U_{cr}$ в широкой области изменения U ток, как правило, осциллирует, могут наблюдаться как регулярные, так и нерегулярные изменения его во времени. Известно, что пульсации тока большой амплитуды в таком материале обусловлены динамикой электрических доменов — их генерацией, движением вдоль образца и затуханием на контакте. Полагается, что электрическая нестабильность, наблюдаемая в образцах данного типа, связана с увеличением скорости захвата носителей EL2 центрами при их разогреве электрическим полем [3].

Использование нами структуры с „газовым“ электродом позволило установить вид пространственных распределений тока для различных участков ВАХ. В качестве характерных стадий отметим следующие:

1) непосредственно после срыва тока к меньшему значению ток стационарен, его распределение однородно по пространству,

2) последующее увеличение напряжения питания приводит к появлению в токопроводящем канале областей, где ток нестационарен: внутри канала возникает импульс плотности тока, который порождает расходящуюся по пространству волну. Процесс может быть когерентным, т.е. наблюдается его пространственно-временная цикличность. Некоторые фазы такого процесса представлены на последовательности изображений 1–8 рис. 2, а. Следует отметить, вместе с тем, что когерентность динамики структуры наблюдается в присутствии в системе неоднородности (например, искусственной, которая создается неоднородной засветкой полупроводника). В однородной же системе выделенный центр, который задавал бы динамику структуры, отсутствует. В этих условиях первичные локальные импульсы тока возникают в пределах активной области системы в случайных местах. В результате

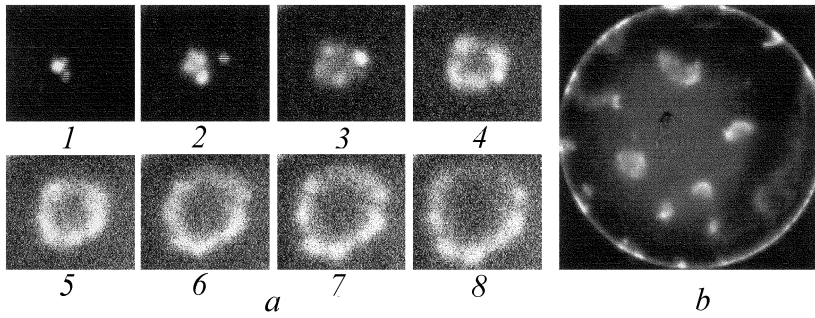


Рис. 2. Примеры пространственных структур в распределении свечения ГПП. Светлые области соответствуют большей плотности тока. *a*: 1–8 — последовательность состояний системы, в которой импульс тока возникает лишь в одной точке активной области; интервал между соседними кадрами 40 мс. Горизонтальный размер показанной области 5 мм. *b*: иллюстрирует случай множественных источников локальных импульсов тока. Диаметр активной области 18 мм.

порождается неупорядоченное пространственно-временное состояние системы. Пример стадии такого состояния дан на снимке рис. 2 (*b*).

При дальнейшем увеличении U в системе наблюдаются различные структуры, описание которых выходит за рамки настоящего краткого сообщения.

Подобие транспортных свойств обеих изучаемых систем (рис. 1) дает основание предположить, что и пространственно-временные характеристики распределений тока в неустойчивой области в них подобны, т. е. картины свечения разряда в системе с ГПП, наблюдаемые при некотором значении полного тока, позволяют судить о пространственной структуре тока в структуре, не содержащей ГПП. Природа неустойчивости стационарного тока в образцах *si*-GaAs с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) *N*-типа связана, как известно, с формированием и движением электрических доменов. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в исследованном в настоящей работе случае протяженных в поперечном направлении образцов *si*-GaAs состояние с плоским фронтом электрического домена может стать неустойчивым относительно возникновения поперечных структур. Такая неустойчивость способна порождать сложную картину переноса

заряда в полупроводнике, демонстрируя, таким образом, новое качество систем с механизмом формирования ОДС N -типа. Пространственно-временная динамика тока, представленная на последовательности снимков 1–8 рис. 2, *a*, имеет некоторое сходство со структурами типа „ведущий центр“, которые интенсивно изучались в химических реакторах с колебательными режимами течения реакций [7]. Отметим также, что динамические пространственно-неоднородные структуры в распределениях тока могут деструктивно влиять на характеристики приборов, построенных на si -GaAs [8].

Авторы признательны Е. Гуревичу за помощь в экспериментах и В. Абросимовой за проведение операции диффузии цинка.

Настоящая работа частично поддержана РФФИ, проект 00–15–96750, и Немецким обществом естествоиспытателей (DFG).

Список литературы

- [1] *Adamatzky A.* Computing in Nonlinear Media and Automata. Bristol: IoP Publishing, 2001. 410 p.
- [2] *Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Миронов А.Г.* // Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М.: Наука, 1972. 416 с.
- [3] *Neumann A.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. N 1. P. 1–26.
- [4] *Struempel C., Astrov Yu.A., Purwins H.-G.* // Phys. Rev. E. 2002. (Pt. 1-st June).
- [5] *Асоров Ю.А.* // ФТП. 1993. Т. 27. В. 11/12. С. 1971–1989.
- [6] *Marchenko V.M., Matern S., Portsel L.M.* et al. // Proc. SPIE. 2002. V. 4669. P. 1–12.
- [7] *Oscillations and traveling waves in chemical systems* / Ed. by R.J. Field, M. Burger. Wiley: New York, 1985.
- [8] *Vaitkus J.V., Irsigler R., Andersen J.* et al. // Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. 2001. V. A460. P. 204–206.