

05

## Полиморфизм конденсированной фазы диссипативных солитонов

© Ю.А. Астров, Е.В. Берегулин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: yuri.astrov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 февраля 2010 г.

Изучается двухкомпонентная модель „реакция–диффузия“, предложенная ранее для интерпретации процессов самоорганизации токовых структур в системах полупроводник–газоразрядный промежуток, в том числе для описания диссипативных солитонов. Проведенные здесь численные исследования модели демонстрируют возможность существования полиморфизма кристаллических диссипативных структур, состоящих из диссипативных солитонов.

Самоорганизация неравновесных пространственно-распределенных систем может давать уединенные частицеподобные состояния — диссипативные солитоны (ДС) [1,2] или, в другой терминологии, автосолитоны [3]. Взаимодействие ДС — в зависимости от их структуры и расстояния между ними — может быть отталкивающим или притягивающим [4]. В условиях притягивающего взаимодействия ДС могут образовывать конденсированную фазу, которую можно рассматривать как самоорганизованный кристалл, формирующийся в неравновесной системе.

В настоящем сообщении показано, что стационарная конденсированная фаза ДС может находиться в состояниях с различной симметрией: в рассмотренном ниже примере — не только в виде упорядоченного гексагона, но и в форме регулярной структуры типа пчелиных сот (honeycomb structure). Результат можно интерпретировать как проявление полиморфизма диссипативной структуры. Существование явления продемонстрировано на примере численного решения следующей системы уравнений „реакция–диффузия“:

$$\frac{\partial U_g}{\partial t} = \frac{U_0 - U_g}{\tau_U} - cNU_g + D_U \Delta U_g, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{N}{\tau_N} + NU_g \left[ a + b \left( \frac{N}{N + N^*} \right)^2 \right] + D_N \Delta N, \quad (2)$$

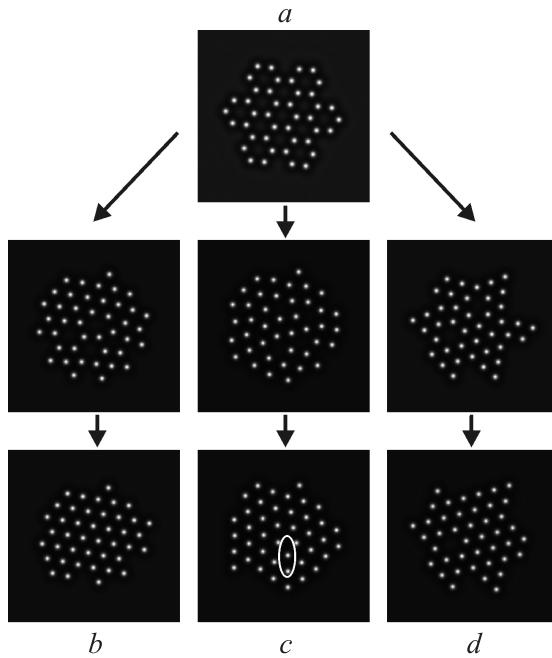
которые применялись в работах [5,6] для описания самоорганизации диссипативных структур тока в системах „полупроводник–газо-разрядный промежуток“ (ПП–ГРП). Зависящая от координат переменная  $U_g(x, y)$  описывает величину падения напряжения на ГРП:  $N(x, y)$  — некоторая эффективная концентрация носителей в области разряда. Диффузионные члены определяют связь переменных в плоскости  $(x, y)$ , а постоянные времена  $\tau_U$  и  $\tau_N$  — темп их релаксации. Отметим, что значение  $\tau_U$  определяется скоростью релаксации потенциала в полупроводниковом электроде.

Первый член в правой части уравнения (1) описывает зарядку емкости ГРП от источника напряжения  $U_0$  с постоянной времени  $\tau_U$ , тогда как второй член — ее разрядку благодаря присутствию свободных носителей заряда в промежутке. При прочих равных условиях скорость разрядки зависит от параметров разрядного промежутка, что учитывается значением коэффициента  $c$ .

Второй член в правой части уравнения (2) характеризует процесс автокаталитического размножения носителей заряда в ГРП. Параметр  $N^*$ , а также коэффициенты  $a$  и  $b$  выбираются таким образом, чтобы нуль-изоклина уравнения ( $\partial N / \partial t = 0$ ) для пространственно-однородного состояния надлежало образом описывать явление отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) разряда.

В соответствии с описываемой моделью образование пространственных структур в системах ПП–ГРП обусловлено, с одной стороны, ОДС разряда, которое ответственно за активационный процесс. Благодаря полупроводниковому электроду с низкой проводимостью существует также ингибиторный процесс. Важную роль в формировании ДС играет диффузия переменных. Заметим, что в недавнем исследовании [7] показано, что инициировать ОДС при малых плотностях тока и соответственно служить причиной возникновения ДС могут тепловые процессы в газе ГРП.

Уравнения (1), (2) позволяют описывать наблюдающиеся в экспериментах уединенные нити тока, в также кластеры нитей, которые обычно образуют гексагональную структуру. Подчеркнем, что нить тока в данном случае является физической реализацией диссипативного солитона. Характерная особенность ДС состоит в том, что как в теории,



**Рис. 1.** Примеры эволюции структуры, имеющей симметрию пчелиных сот ( $a$ ), в кластер с гексагональной симметрией ( $b, c, d$ ), при снижении параметра  $U_0$  в уравнениях (1), (2) от 1040 до 1020. Вычисления выполнялись при тех же значениях фиксированных параметров уравнений, что и в работах [5,6]. Эллипсом ( $c$ ) показано положение дефекта в структуре кластера. Расчет выполнен для площади  $5 \times 5 \text{ см}^2$ .

так и экспериментах они могут быть устойчивыми в широкой области изменения управляющих параметров [5].

На рис. 1 показаны примеры результатов вычислений, которые иллюстрируют существование полиморфизма конденсированной фазы ДС. Фиксированные параметры уравнений те же, что использовались в работах [5,6]. Начальное состояние системы при выполнении вычислений представлено на изображении ( $a$ ), где светлым показаны области с высоким значением  $N$ . При начальном значении параметра  $U_0^i = 1040$ <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Здесь и ниже размерность параметра  $U_0$  не указывается.

представленная структура пчелиных сот (honeycomb structure) устойчива. Это подтверждается тем, что при выполнении длительной процедуры интегрирования системы (1), (2) решение ( $a$ ) остается стационарным в пространстве и времени. При этом глобальная переменная  $\bar{N}$  (усредненная по площади структуры концентрация носителей):

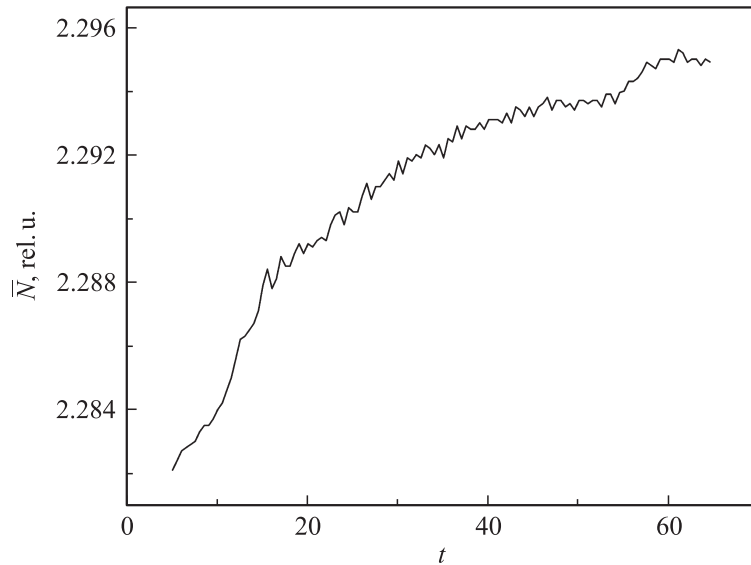
$$\bar{N} = S^{-1} \int_s N dS \quad (3)$$

претерпевает лишь небольшие флуктуационные изменения. Они обусловлены влиянием слабого шума на локальную переменную  $N$ , который был включен в процесс численного счета.

При плавном снижении параметра  $U_0$  ниже некоторой критической величины исходная структура кластера в виде пчелиных сот становится неустойчивой. В результате спонтанной перестройки система переходит в новое устойчивое состояние, которое характеризуется гексагональной симметрией (см. изображения  $b-d$ ). Они получены при различных временных реализациях шума малой амплитуды, который воздействовал на переменную  $N$  при численном интегрировании уравнений (1), (2). Отметим, что при переходе диссипативной структуры в новое состояние число ДС в ней сохраняется. При этом может образоваться как правильный гексагональный кластер ( $b$ ), так и кластеры, содержащие дефект — структуры  $c$  и  $d$ . Структуры  $b, c, d$  остаются стабильными в некотором диапазоне дальнейшего снижения  $U_0$ .

Если же теперь в качестве начальных условий счета использовать состояние системы, соответствующее одному из гексагональных кластеров (рис. 1), и вновь увеличивать параметр  $U_0$  — до величин, при которых ранее наблюдалась устойчивая сотовая структура, то гексагональная симметрия кластера сохраняется. Это свидетельствует о том, что представленная (рис. 1,  $a$ ) структура метастабильна и возможно ее сосуществование в пространстве с гексагональной фазой.

В процессе смены состояния системы происходит изменение полного содержания величины  $\bar{N}$ . Это можно показать путем численного эксперимента, который включает следующие стадии: 1. В качестве начального состояния выбирается сотовая структура, устойчиво существующая при значении параметра  $U_0^I = 1040$  (рис. 1,  $a$ ). 2. Затем, за достаточно короткое время, в течение которого пространственное расположение ДС, составляющих структуру, практически не изменяется,



**Рис. 2.** Фрагмент кинетики величины  $\bar{N}$ , усредненной по площади системы, в процессе спонтанного перехода структуры пчелиных сот в гексагональную при фиксированной величине параметра  $U_0 = 1020$ .

параметр  $U_0$  в вычислительном эксперименте понижается до величины  $U_0^{II}$ , соответствующей устойчивому существованию гексагонального кластера. 3. Далее, при постоянной величине  $U_0^{II}$  регистрируется динамика системы: ее перестройка в пространстве и изменение величины  $\bar{N}$ .

Из такого численного эксперимента следует, что спонтанное изменение пространственной конфигурации диссипативной структуры на стадии 3 сопровождается переходом в состояние с максимальным значением  $\bar{N}$  (см. на рис. 2 фрагмент кинетики  $\bar{N}$  в таком процессе), что соответствует, в свою очередь, переходу в состояние с максимальной скоростью диссипации энергии.

По-видимому, полиморфизм диссипативных структур, состоящих из ДС, до настоящего времени экспериментально не наблюдался. На наш взгляд, эффект может существовать, в частности, в пространственных распределениях тока системы ПП–ГРП. Следует отметить, что созда-

ние на основе этой системы достаточно протяженной активной среды, которая была бы способной к полиморфным превращениям, требует высокой пространственной однородности ее параметров, что является непростой технологической проблемой.

Хорошо известно, что возникновение ДС при самоорганизации пространственно-распределенных неравновесных систем — довольно общее явление [3]. Результаты настоящей работы показывают, что при одних и тех же значениях управляющих параметров ДС способны образовывать полиморфные структуры, т.е. кристаллоподобные диссипативные структуры с различной симметрией. По-видимому, могут также существовать стационарные диссипативные структуры, не имеющие дальнего порядка, например, сложные цепные структуры, подобные полимерным. Интересным для дальнейших исследований представляется изучение возможности сосуществования в пространстве ДС с различными пространственными характеристиками, например, „кристаллических“ структур и структур, не имеющих выраженного порядка.

Исследования модели, которая представляет собой частный случай двухкомпонентных уравнений „реакция–диффузия“, свидетельствуют также, что некоторой фиксированной скорости диссипации энергии, которой поддерживается неравновесие системы, может соответствовать разнообразие пространственных форм диссипативной „кристаллической“ структуры с дефектами, а именно: они могут отличаться типом и пространственным расположением дефектов. Вероятно, свойство мультистабильности диссипативных структур, состоящих из ДС, может быть полезно в решении задач обработки и хранения информации, основанных на новых принципах.

Исследование поддержано проектом РФФИ 07-2-00168 и грантом научных школ президента России (грант 2951.2008.2).

## Список литературы

- [1] Bode M., Purwins H.-G. // *Physica D*. 1995. V. 86. N 1. P. 53–63.
- [2] Розанов Н.Н. // *УФН*. 2000. Т. 170. В. 4. С. 462–465.
- [3] Kerner B.S., Osipov V.V. *Autosolitons: A New Approach to Problems of Self-Organization and Turbulence*. V. 61 of *Fundamental Theories of Physics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.

- [4] Bödeker H.U., Liehr A.W., Frank T.D., Friedrich R., Purwins H.-G. // *New J. Physics*. 2004. V. 6. P. 62–79.
- [5] Astrov Yu.A., Logvin Yu.A. // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 79. N 16. P. 2983–2986.
- [6] Astrov Yu.A. // *Phys. Rev. E*. 2003. V. 67. N 3. P. 035 203 (1-4).
- [7] Райзер Ю.П., Мокров М.С. Простая физическая модель гексагональных токовых структур в газовом разряде с полупроводниковым катодом. Препринт № 910. Институт проблем механики РАН. 2009. 47 с.