

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОКОВЫХ НИТЕЙ В Si(Zn)

Ю. А. Астров, С. А. Хорев

Физико-технический институт им А. Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 13 июля 1993 г. Принята к печати 13 июля 1993 г.)

Изучалась внутренняя структура стационарных нитей тока в Si(Zn), которые генерируются в области сверхлинейности глобальной ВАХ. Пространственные распределения тока в нитях измерялись с помощью фотометрирования свечения газа при пропускании тока через систему «полупроводник—газоразрядный промежуток». Метод обеспечивает пространственное разрешение  $\sim 10 \text{ мкм}^{-1}$  и дает возможность количественно характеризовать распределения с перепадом плотности тока  $\geq 10^4$ . Получены данные о трансформации формы и амплитудных значений плотности тока в нитях в области гистерезиса ВАХ. Результаты работы свидетельствуют в пользу диффузионного механизма неустойчивости, которая приводит к расслоению тока.

### 1. Введение

В последние годы значительное внимание уделяется экспериментальному изучению явлений самоорганизации пространственных структур в неравновесной плазме полупроводниковых систем [1-11]. В результате развития последовательностей нелинейных процессов такие структуры могут иметь сложные пространственные формы. Для построения адекватных теоретических моделей самоорганизации конкретных систем требуются экспериментальные данные, которые достаточно подробно количественно характеризуют возникающие распределения физических величин. В случае полупроводников с малой шириной запрещенной зоны (таких как кремний) изучение пространственных структур является довольно сложной задачей. Известны следующие пути ее решения:

- регистрация пространственного распределения рекомбинационного излучения полупроводника, например, фотографическими [12] или электронно-оптическими [11] методами;
- изучение двумерного распределения электрического потенциала на боковой поверхности образца с помощью сканируемого прижимного электрического зонда [3];
- диагностика неоднородностей объемных свойств полупроводника путем исследования пространственного распределения локальной неравновесной проводимости, которая наводится при сканировании одной из граней образца пучком электронного микроскопа [5] (метод EBIC) или сфокусированным световым пучком (LBIC) [10];
- изучение распределения поглощения ИК света по сечению образца [2].

Недостатком первого метода является относительно низкая чувствительность, что в первую очередь обусловлено малым квантовым выходом излучательной рекомбинации носителей в кремнии. Исследование пространственного распределения потенциала поверхности образца электрическим зондом требует значительного времени сканирования и, что является принципиальным недостатком, не позволяет изучать внутреннюю структуру образующихся пространственно-нео-

днородных токовых состояний. Методы наведенной проводимости EBIC и LBIC также дают довольно косвенную информацию о характере возникающих пространственных структур. Последний из вышеперечисленных методов (так же, как и первый) позволяет получать количественные данные. Вместе с тем, вследствие малой величины сечения поглощения квантов света на свободных носителях он применим лишь в случае относительно высоких плотностей тока.

В настоящей работе количественно исследовались пространственные распределения плотности тока, которые возникают вследствие потери устойчивости однородного токового состояния высокоомного Si(Zn) в сильных электрических полях. В основе метода лежит использование тонкого газоразрядного промежутка (ГРП), который служит одним из электродов к образцу Si(Zn). Основные особенности такой экспериментальной методики описаны в работе [13] (см. предыдущую статью настоящего выпуска). На рис. 1, а цитируемой работы схематически показана исследуемая структура, которая состоит из полупроводниковой компоненты 1, газонаполненного зазора 2 и прозрачных электродов 3, 4. Через один из электродов можно возбуждать образец светом, а через второй регистрировать пространственное распределение свечения газа разрядной области.

В [13] были получены экспериментальные указания, что для исследуемой структуры ГРП не вносит искажений в распределение плотности тока в полупроводнике. Вместе с тем газоразрядный зазор дает возможность наблюдать и изучать количественно пространственные распределения тока благодаря свечению газа в видимой области спектра.

## 2. Методика экспериментов

В соответствии с результатами работы [13] неустойчивость однородного распределения тока в структуре Si(Zn) — ГРП с большими поперечными размерами сопровождается генерацией множественных нитей тока, плотность тока  $j$  в которых существенно превышает величину  $j$  фона, т. е. в участках с однородным распределением тока. Характерно, что изолированные (т. е. удаленные друг от друга) нити практически идентичны друг другу. Таким образом, чтобы охарактеризовать расслоение тока в системе, информативным является изучение структуры изолированной нити или участка системы, который содержит небольшое число нитей.

Эта задача решалась путем фотометрирования свечения газа разряда в условиях образования неоднородной токовой картины. Фотометрирование выполнялось методом фотосъемки картины свечения газа разрядного промежутка; при этом использовалась фотопленка с достаточной фотографической шириотой. Калибровка метода осуществлялась путем фотосъемки свечения газоразрядной области для случая пространственно-однородного горения разряда в системе полупроводник—ГРП. В этом случае использовались образцы полупроводников, в которых неустойчивость не развивалась. Такая калибровка выполнялась при тех же толщинах зазора, его газовом заполнении и типичных значениях плотности тока, которые соответствовали неустойчивому режиму при использовании Si(Sn) — образцов [13]. Измерялась зависимость почернения фотопленки  $D$  от плотности электрического заряда  $q$ , который протекает в системе за время экспонирования  $t$ ; при этом величина  $q$  определялась из очевидного соотношения

$$q = (I/S) t,$$

где  $I$  — полный ток системы, а  $S$  — площадь ее поперечного сечения. (Применимость такого подхода для целей получения количественных данных о распределениях тока вытекает из установленного ранее факта пропорциональности свечения разряда плотности тока в очень широкой области изменения величины  $j$  [14]. Причина такой линейности состоит в том, что толщина разрядной

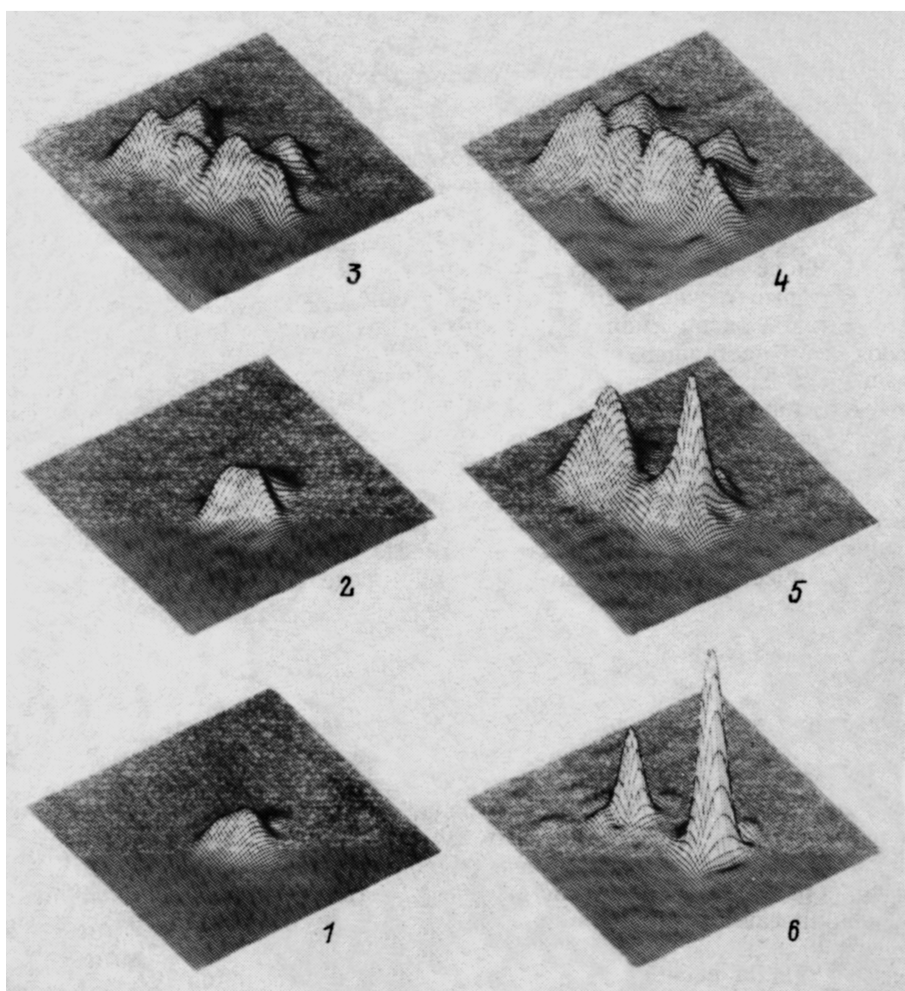


Рис. 1. Координатные распределения плотности тока в области ВАХ, которая соответствует образованию нитей. Пространственный период изображающей сетки 30 мкм, площадь фрагмента  $1.38 \times 1.14 \text{ мм}^2$ . Плотность тока в максимумах  $i_m$ ,  $\text{мА/см}^2$ , 1 — 0.84, 2 — 1.20, 3 — 1.62, 4 — 1.85, 5 — 3.45, 6 — 4.76. Плотность тока в областях однородного фона  $i_b$ ,  $\text{мкА/см}^2$ , 1 — 34, 2 — 39, 3 — 48, 4 — 57, 5 — 43, 6 — 36.

области в наших условиях существенно меньше оптической толщины газоразрядной плазмы, ее заполняющей.) Пространственное распределение плотности почернения экспонированной фотопленки измерялось с помощью автоматизированного микроденситометра. Шаг денситометрирования составлял 100 мкм при диаметре зондирующего светового пучка 10 мкм. Полученные распределения величины  $D$  использовались для построения количественных координатных распределений тока.

Для наглядности графического представления результатов дискретный набор амплитуд плотности тока использовался для построения гладких аппроксимирующих поверхностей, проходящих через экспериментальные точки. Окончательные результаты могли быть представлены в виде двумерных карт распределений плотности тока или амплитудно-координатных распределений.

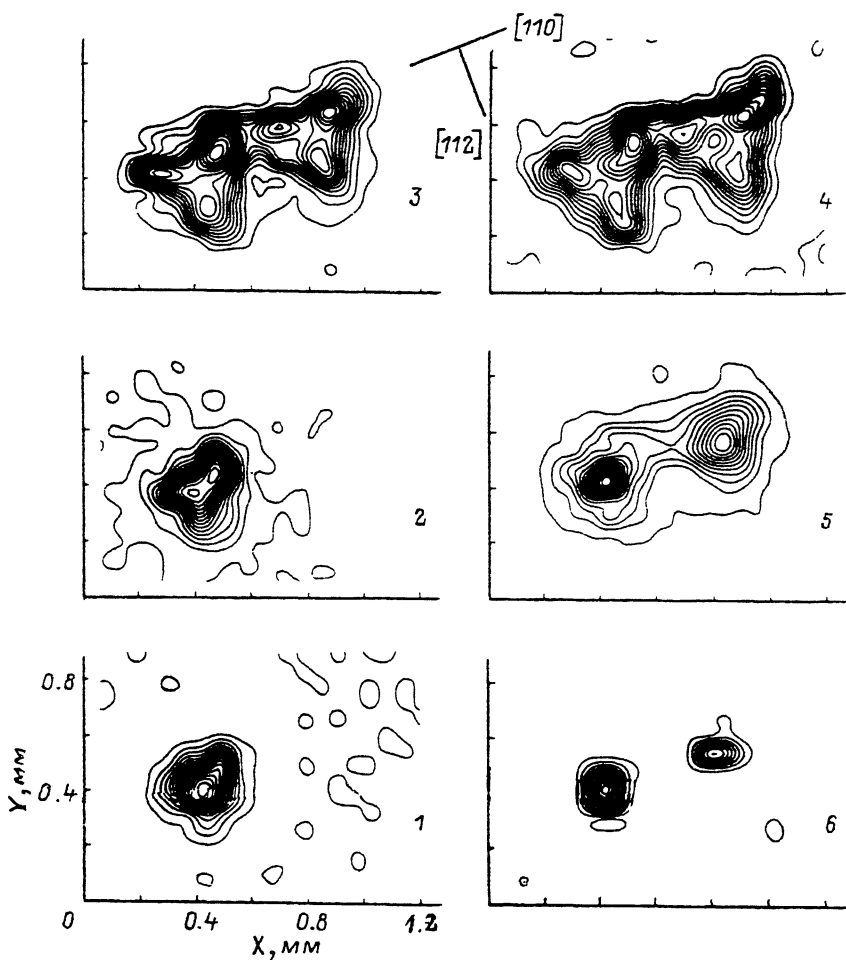


Рис. 2. Представление данных (рис. 1) в виде карт распределения плотности тока. Перепад  $j$  между соседними изоуровнями составляет 0.1 амплитудного значения для каждого графика.

### 3. Результаты

В соответствии с данными предыдущей статьи образование стационарных нитей тока в Si(Zn) сопровождается сильной нелинейностью (сверхлинейностью) и гистерезисом глобальной вольт-амперной характеристики (ВАХ). На рис. 1 изображены полученные в настоящей работе координатные распределения  $j$  в нитях в области гистерезиса ВАХ при пропускании тока вдоль направления кристаллографической оси образца (111). Дополнительное представление о структуре образующихся нитей дают соответствующие карты пространственных распределений плотности тока (рис. 2). В верхней части этого рисунка показано положение кристаллографических осей в плоскости образца. Номера кривых рис. 1, 2 соответствуют номерам точек на ВАХ рис. 2 предыдущей статьи.

Из данных рис. 1 следует, что плотность тока однородного фона относительно слабо изменяется в области гистерезиса ВАХ. В то же время амплитудные значения  $j$  в области нити претерпевают сильные изменения. Обращает на себя внимание также появление вполне сформированной нити по соседству с уже существующей (кривая 3 на рис. 1, 2) при относительно небольшом изменении

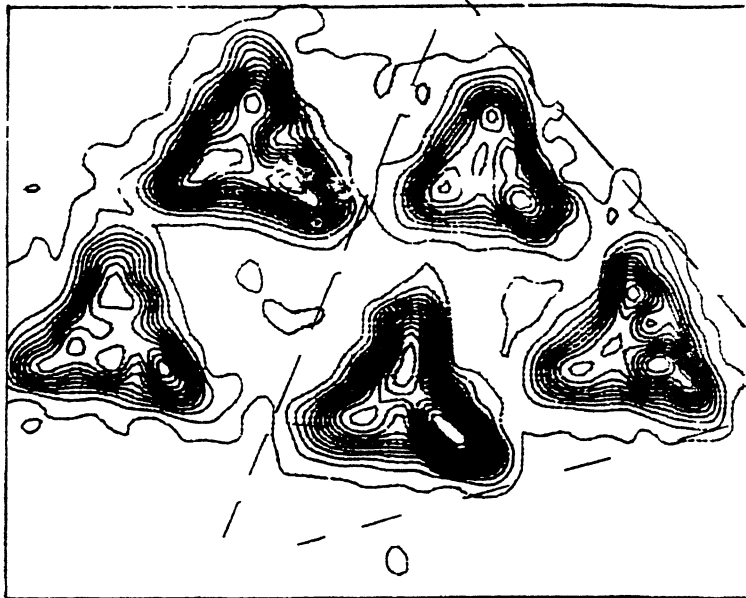


Рис. 3. Фрагмент распределения тока с большой плотностью нитей. Размер участка структуры  $2.16 \times 1.80 \text{ мм}^2$ .

напряжения питания (см. рис. 2 предыдущей работы). Сформировавшиеся нити характеризуются выраженной симметрией равностороннего треугольника; при этом максимальное значение  $j$  находится не в центре, а в углах треугольной структуры. Указанная особенность свидетельствует в пользу активаторно-ингибиторной (диффузионной) природы расслоения тока. В рамках таких моделей уединенная нить тока может рассматриваться в качестве автосолитона активной распределенной среды [15]. Повышенное производство ингибитора в области сформировавшегося автосолитона сопровождается более эффективным подавлением процесса активации в его центральной части, что и является причиной возникновения здесь локального минимума. (Согласно предложенной в предыдущей работе [13] модели расслоения тока, в роли процесса активации в нашем случае выступает двойная инжекция носителей заряда, тогда как генерация тепла за счет омических потерь подавляет процессы двойной инжекции в Si(Zn).)

Распределения 2, 5 на рис. 1, 2 получены при одном и том же напряжении питания, но для различных предысторий системы. Видно, что в состоянии 5, которое получено в результате понижения напряжения относительно максимально достигнутого в данном опыте значения, область с нитями переносит ббльший ток сравнительно с ситуацией 2, которая соответствует увеличению напряжения от нулевого значения. Интересно отметить, что уменьшение напряжения питания может сопровождаться увеличением амплитудного значения  $j$  нити — см. последовательность распределений 4—6, рис. 1. При этом полный ток нити благодаря ее сужению снижается.

При достаточно высоких напряжениях питания в образце генерируется большое число нитей (рис. 3 в [13]) и соответственно их высокая плотность. На рис. 3 показан фрагмент пространственной структуры в этих условиях. Обращает на себя внимание идентичность нитей в отношении формы, размеров и ориентации их «гофрировки» в плоскости образца. Заметим, что часть структуры, которая ограничена пунктирными линиями, имеет ось симметрии третьего порядка. Возможно, что возникновение порядка обусловлено взаимодействием соседних нитей в процессе их последовательной генерации.

В заключение отметим, что метод количественного исследования неоднородных токовых распределений, который основан на использовании гозоразрядного промежутка, может применяться лишь при относительно малых токах и лишь в тех случаях, когда разрядная область не оказывает существенного влияния на транспортные свойства полупроводниковой части [13].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Б. С. Кернер, В. Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, 36, 359 (1982).
- [2] D. Jaeger, H. Baumann, R. Symanczyk. Phys. Lett. A, 117, 141 (1986).
- [3] H. Baumann, R. Symanczyk, C. Radehaus, H.-G. Purwins, D. Jaeger. Phys. Lett. A, 123, 421 (1987).
- [4] Б. С. Кернер, Д. П. Литвин, В. И. Санкин. Письма ЖТФ, 13, 819 (1987).
- [5] K. M. Mayer, J. Parisi, R. P. Huebener. Z. Phys. B; Condensed Matter, 77, 171 (1988).
- [6] М. Н. Винославский. ФТТ, 31, 315 (1988).
- [7] А. В. Горбатов, И. А. Линийчук, А. В. Свирин. Письма ЖТФ, 15, 42 (1989).
- [8] В. А. Ващенко, Б. С. Кернер, В. В. Осипов, В. Ф. Синкевич. ФТП, 23, 1378 (1989).
- [9] K. Aoki, U. Rau, J. Peinke, J. Parisi, R. P. Huebener. J. Phys. Soc. Japan., 59, 420 (1990).
- [10] A. Brandi, W. Pretti. Phys. Rev. Lett., 23, 3044 (1991).
- [11] F.-J. Niedernostheide, M. Arps, R. Dohmen, H. Willebrand, H.-G. Purwins. Phys. St. Sol. (b), 172, 249 (1992).
- [12] М. Ламперт, П. Марк. Инжекционные токи в твердых телах, 416. М. (1973).
- [13] Ю. А. Астров. ФТП, 27, (1993). (см. предыдущую статью настоящего выпуска).
- [14] Ю. А. Астров, Ш. С. Касымов, Л. Г. Парицкий, С. М. Рывкин. Деп. ВИНТИ, № 1032, 35 (1975).
- [15] Б. С. Кернер, В. В. Осипов. УФН, 157, 201 (1989).

Редактор В. В. Чалдышев