

## Локализация продольного автосолитона в антимониде индия

© И.К. Камилов, А.А. Степуренко<sup>¶</sup>, А.С. Ковалев

Институт физики Дагестанского научного центра Российской академии наук,  
367003 Махачкала, Россия

(Поступила 1 декабря 2003 г. Принята к печати 30 декабря 2003 г.)

Исследовалось распределение плотности тока по сечению образца с целью выяснения расположения продольного автосолитона в образце. Показано, что продольный автосолитон локализуется вдоль центральной оси образца или близко к ней. Установлено, что продольный автосолитон устойчив в широком интервале значений тока.

В теоретических работах [1–7] и экспериментальными исследованиями [8–12] показано, что в неравновесной возбужденной электронно-дырочной плазме (ЭДП), созданной ударной ионизацией или инжекцией в *n*-GaAs, либо фотогенерацией в *n*-Ge, а также джоулевым разогревом в InSb, появляется диссипативная структура, представляющая собой ЭДП с локальными областями экстремальной концентрации и температуры носителей заряда (автосолитонами — АС) — как в виде слоев тока (продольные АС), так и в виде слоев сильного электрического поля (поперечные АС). В несимметричной ЭДП ( $\mu_e \neq \mu_p$  или  $n_e \neq n_p$ ) слои сильного электрического поля движутся в электрическом поле в сторону дрейфа дырок при  $u = (n - p)/n > 0$  и в сторону дрейфа электронов при  $b = \mu_e/\mu_p > 1$  [13].

Считается [11,12], что неравновесная ЭДП, образованная джоулевым разогревом образца, имеет радиальный градиент температуры и, следовательно, плотности плазмы. В неплотной ЭДП в электрическом поле формируются поперечные АС, в плотной — продольные. Скорость движения поперечных АС, экспериментально определенная с помощью потенциальных зондов, составляла в Ge [10]  $3 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^3$  см/с, а в InSb  $\sim 10^3$  см/с [11,12].

Естественно допустить, что продольные АС располагаются вдоль осевой линии образца или близко к ней. Чтобы определиться в этом вопросе, были проведены исследования распределения плотности тока по сечению образца.

Исследовались компенсированные кристаллы *p*-InSb с концентрацией дырок порядка  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> и подвижностью  $\mu_p = 2500 - 4000$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup> при температуре 77 К. Исследуемые образцы представляли собой параллелепипеды, площадка одного из торцевых контактов делилась на несколько площадок — токовые зонды.

В данной работе представлены результаты измерений для трех образцов: 1 — с размерами  $0.45 \times 0.21 \times 0.14$  см<sup>3</sup>, торцевой контакт которого был разделен на три площадки — токовые зонды (рис. 1, *a*); 2 — с размерами  $0.66 \times 0.22 \times 0.14$  см<sup>3</sup>, торцевой контакт которого был разделен на пять площадок — токовые зонды (рис. 1, *b*); 3 — с размерами  $0.50 \times 0.3 \times 0.3$  см<sup>3</sup>.

Для выравнивания токов на зондах на омическом участке ВАХ образца применялись подстроечные сопротивления. Разность токов возникает как вследствие неодинаковой площади токовых зондов, так и исходной неоднородности кристалла. Импульсы напряжения с токовых сопротивлений подавались на дифференциальные входы осциллографа, где производилось вычитание импульсов. Результирующий сигнал через модуль сопряжения и аналого-цифровой преобразователь записывался в память компьютера. На образец подавался пилообразный импульс напряжения, исследовалась зависимость разности токов зондов от приложенного напряжения.

На рис. 2, *a* представлена осциллограмма разности токов между центральным зондом 0 и периферийными ( $I_0 - I_1$ ;  $I_0 - I_2$ ) при подаче к образцу 1 пилообразного напряжения. Видно, что в области субкритических напряжений ток с центрального зонда уменьшается. Уменьшение тока может быть вызвано понижением либо концентрации носителей заряда, либо их подвижности. Поскольку имеет место джоулев разогрев, то именно понижение подвижности в области субкритического электрического поля обуславливает уменьшение тока с центрального зонда. И уже в области надкритических слабых электрических полей ток с центрального зонда резко растет относительно периферийных зондов 1 и 2, что свидетельствует о резком увеличении концентрации носителей заряда. В работе [12] показано, что собственная концентрация носителей заряда может быть достаточно высокой уже при относительно низкой температуре  $T \approx 150$  К. А в работе [14] рассмотрен эффект неоднородного распределения температуры и концентрации

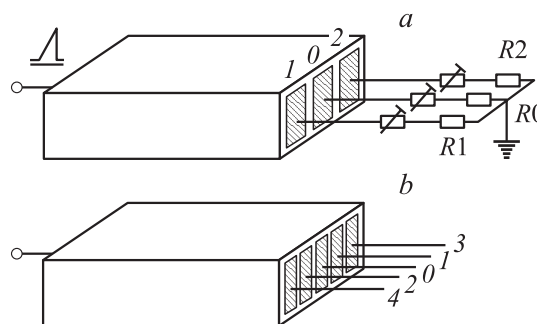
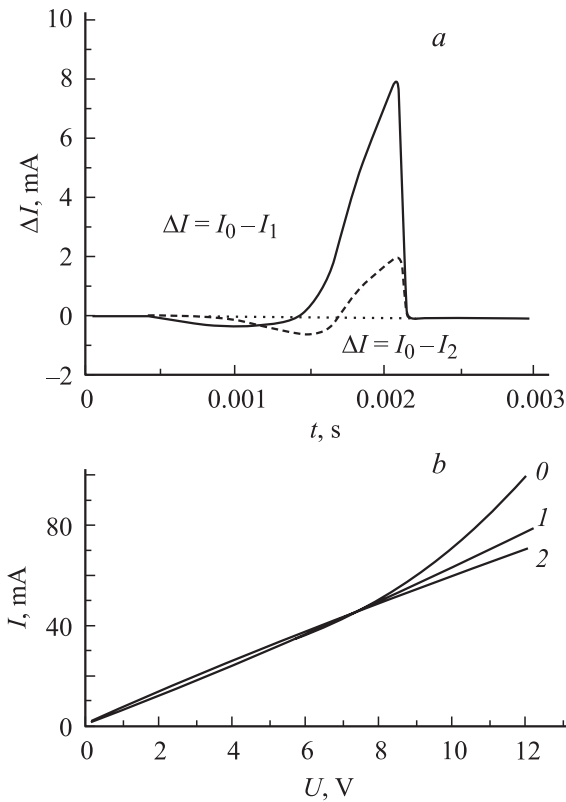


Рис. 1. *a* — образец 1 с тремя токовыми зондами. *b* — образец 2 с пятью токовыми зондами.

<sup>¶</sup> E-mail: ask@iwt.ru



**Рис. 2.** *a* — осциллограммы разности токов между центральным (0) и периферийными (1, 2) зондами образца 1. *b* — ВАХ, снятые с токовых зондов образца 1.

носителей заряда образца InSb при джоулевым нагреве постоянным током. При джоулевым нагреве образца импульсами тока ( $\tau = 2 \cdot 10^{-3}$  с,  $f = 10$  Гц) вследствие низкой температуропроводности InSb неоднородность распределения температуры будет круче, если учесть еще и то обстоятельство, что исследуемые нами образцы высокоомны ( $n = 10^{12}$  см $^{-3}$ ,  $\mu_p \approx 2500$  см $^2$ В $^{-1}$ с $^{-1}$ ). Учитывая результаты [12,14], можно считать, что именно в области осевой линии образца джоулевым разогревом достигается температура, достаточная для появления собственной проводимости и создания неравновесной ЭДП, в которой формируются один или несколько шнуров тока (продольный АС), в зависимости от уровня возбуждения.

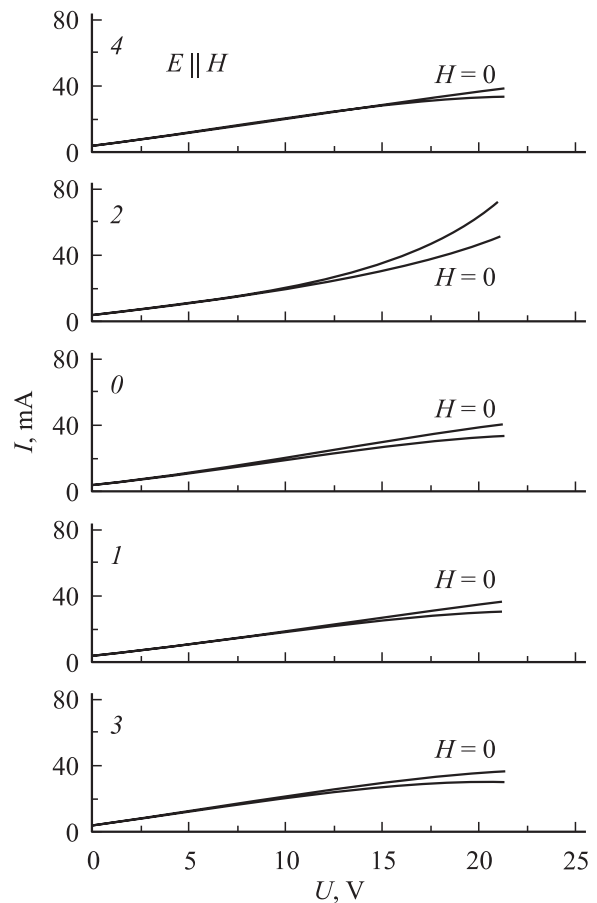
Вольт-амперная характеристика (ВАХ), снятая с центрального зонда 0, заметно суперлинейна, в то время как вольт-амперные характеристики, снятые с периферийных зондов 1, 2, линейны (рис. 2, *b*). На рис. 3 представлены ВАХ, снятые с пяти зондов широкого образца 2. Видно, что суперлинейность обнаруживает ВАХ, снятая со второго зонда (рис. 3, график 2). Слабое магнитное поле усиливает суперлинейность ВАХ, снятой со второго зонда, а на ВАХ, снятых с периферийных зондов, появляются сублинейные участки в области надкритичности в слабом электрическом поле (рис. 3, графики 0, 1, 3, 4). Этот результат подтверждает

тот факт, обнаруженный другими экспериментальными методами [15], что продольный АС является холодным, т.е. является локализованной областью повышенной концентрации носителей заряда и пониженной температуры.

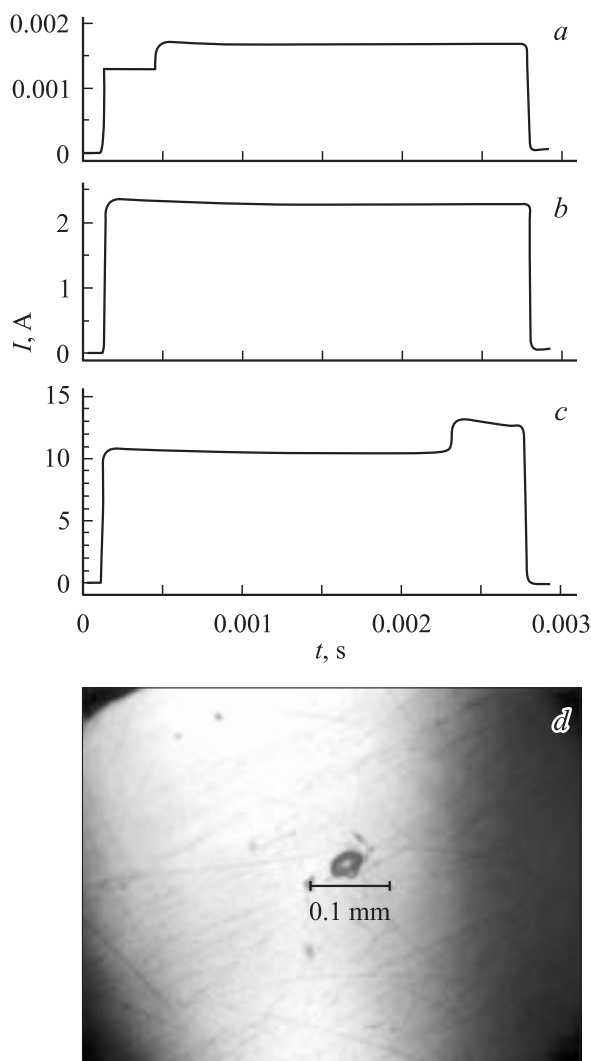
Итак, экспериментально показано, что продольный АС локализуется вдоль центральной оси образца или близко к ней.

Проводились исследования по установлению предельного тока продольного АС. Использовались короткие образцы, продольные размеры которых были значительно меньше поперечных. Такая геометрия образца позволяла реализовать только продольные АС. На образец подавались одиночные прямоугольные импульсы напряжения длительностью 2.5 мс.

На рис. 4 приведены осциллограммы проходящего через образец 3 тока, иллюстрирующие динамику развития продольного АС. На рис. 4, *a* представлена осциллограмма, отражающая характерную картину формирования продольного АС в ЭДП, созданной джоулевым разогревом ( $U_1 = 0.9$  В;  $I_1 = 0.0011$  А). На рис. 4, *b* дана осциллограмма тока при уровне возбуждения, значительно превосходящем первоначальный ( $U_2 = 2.4$  В,  $I_2 = 2.31$  А). Следующая осциллограмма (рис. 4, *c*) ил-



**Рис. 3.** ВАХ, снятые с токовых зондов 0–4 образца 2 в продольном магнитном поле ( $\mathbf{H} \parallel \mathbf{E}$ ,  $H = 1.36 \cdot 10^4$  А/м) и в его отсутствие.



**Рис. 4.** *a, b, c* — осциллограммы тока, проходящего через образец 3 с ростом прикладываемого электрического поля. *d* — фотография поверхности образца 3 с механическим повреждением.

люстрирует скачок тока продольного АС, приводящего к его разрушению, сопровождающемуся тепловым пробоем образца и, как следствие, механическим повреждением. При этом предпробойный ток при напряжении возбуждения  $U_3 = 4$  В составляет  $I_3 = 11.1$  А. На рис. 4, *d* представлена фотография поперечной току поверхности образца с механическим повреждением в виде кратера, расположенного близко к центру поверхности.

Таким образом, проведенные исследования показали устойчивость продольного АС в интервале значений тока  $I = 0.0011–11.1$  А. Если принять во внимание поперечный размер АС [16]  $\mathcal{L} = 1.6 \cdot 10^{-3}$  см, то плотность тока АС может достигать  $j = 5.5 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>.

По-видимому, можно считать, что такая большая плотность тока продольного АС обусловлена тем, что температура электронов в центре АС понижается относительно периферийных областей вследствие повы-

шения концентрации носителей в локализованной области — АС [15], что следует из уравнения теплового баланса между системой электронов в АС и решеткой [1]:

$$W = n(T_e - T_0)/\tau_e,$$

где  $T_e$  — температура электронов,  $T_0$  — температура решетки,  $\tau_e$  — время релаксации энергии электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ № 22.53.2003.2 и Приборного парка Аналитического центра ДагНЦ РАН.

## Список литературы

- [1] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **71**, 1542 (1976).
- [2] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. Письма ЖЭТФ, **41**, 386 (1985).
- [3] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. Письма ЖЭТФ, **18**, 122 (1973).
- [4] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТП, **13**, 891 (1979).
- [5] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **21**, 2342 (1979).
- [6] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТП, **13**, 721 (1979).
- [7] А.Л. Дубицкий, Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **28**, 1290 (1986).
- [8] Б.С. Кернер, В.Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, **36**, 359 (1982).
- [9] Б.С. Кернер, В.В. Осипов, М.Т. Романенко, В.Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, **44**, 77 (1986).
- [10] М.Н. Винославский. ФТТ, **31**, 315 (1989).
- [11] А.А. Степуренко. ФТП, **28**, 402 (1994).
- [12] И.К. Камилов, А.А. Степуренко. Phys. St. Sol. B, **194**, 643 (1996).
- [13] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, И.В. Тыслук. ФТТ, **31**, 46 (1989).
- [14] В.В. Антонов, Л.И. Кац. ФТП, **16**, 1050 (1982).
- [15] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев. ФТП, **36**, 187 (2002).
- [16] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев. ФТП, **32**, 697 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

## The localization of a longitudinal autosoliton in InSb

*I.K. Kamilov, A.A. Stepurenko, A.S. Kovalev*

Institute of Physics of Daghestan Scientific Center,  
Russian Academy of Sciences,  
367003 Makhachkala, Russia

**Abstract** The distribution of density of the current over a sample section has been investigated to define the localization of a longitudinal autosoliton in the sample. It is shown, that the longitudinal autosoliton is located along the central axis of a sample or close to it. It is established that the longitudinal autosoliton is stable within wide range of the current values.