

## Деление продольных автосолитонов в InSb в магнитном поле

© И.К. Камиллов<sup>†</sup>, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев

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

(Получена 28 июня 1999 г. Принята к печати 28 октября 1999 г.)

Исследовалось поведение продольных автосолитонов в InSb в слабом магнитном поле. Экспериментально показано, что слабое продольное магнитное поле существенно сказывается на поведении продольного автосолитона в образцах InSb. Во всех образцах при определенных значениях магнитного поля наблюдались резкие скачки тока, обусловленные делением продольного автосолитона. Обнаружено, что величина исходного тока автосолитона после воздействия магнитного поля принимает другое стабильное значение. Значение исходного тока автосолитона восстанавливается после воздействия магнитного поля противоположного направления.

Известно, что в неравновесной электронно-дырочной плазме (ЭДП) однородное состояние нарушается при увеличении уровня ее возбуждения, и в ней образуются неоднородные стационарные состояния — термодиффузионные автосолитоны (АС) [1–4]. В плотной ЭДП во внешнем электрическом поле эти неоднородности представляются как слои тока вдоль электрического поля — продольные АС [5,6], а в ЭДП невысокой плотности образуются АС в виде слоев электрического поля, перпендикулярных линиям тока, — поперечные АС [7–9].

Эксперименты с *n*-GaAs показали [10–14], что неравновесная ЭДП, образующаяся в образцах в результате ударной ионизации или инжекции, в электрическом поле **E** расслаивается на шнуры тока и домены электрического поля. Экспериментально обнаружены бегущие АС в разогретой электрическим полем фотогенерируемой ЭДП в *n*-Ge [15,16].

В [17,18] показано, что неравновесная ЭДП может быть создана в InSb термической генерацией, и в ней при возбуждении электрическим полем появляются как продольные, так и поперечные АС. Из-за несимметричности ЭДП в InSb (соотношение эффективных масс дырок и электронов  $m_p^* \gg m_e^*$ ) поперечные АС движутся от катода к аноду, вызывая колебания тока во внешней цепи образца. В работе [19] показано, что продольное магнитное поле сравнительно небольшой величины вызывает существенное изменение частоты и амплитуды этих колебаний.

В работе [6] рассмотрен разогрев в электрическом поле однородно генерируемой плотной ЭДП. Было показано, что ее однородное распределение независимо от механизма релаксации импульса и энергии становится неустойчивым относительно флуктуаций с выделенным волновым вектором величиной  $k_0 \approx (IL)^{-1/2}$ , направленным перпендикулярно линиям тока. В такой ЭДП появляются шнуры тока уже при небольшом уровне разогрева.

В данной работе мы изучали поведение продольных АС в образцах InSb в продольном магнитном поле напряженностью до  $H = 1.4 \cdot 10^4$  А/м, возбуждаемом в солениоиде. Измерения проводились на образцах, имеющих при

температуре  $T = 77$  К концентрацию носителей (дырок)  $p = (2-4) \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup> и подвижность  $\mu_p \approx 4000$  см<sup>2</sup>/В·с. Прикладываемое магнитное поле являлось слабым как для дырок ( $\mu_p H/c \approx 5 \cdot 10^{-3}$ ), так и для электронов (отношение подвижностей электронов и дырок  $\mu_e/\mu_p \sim 100$ ;  $\mu_e H/c \approx 0.5$ ). Неравновесная ЭДП в образцах создавалась джоулевым разогревом при воздействии медленно меняющегося электрического поля. При дальнейшем росте напряженности электрического поля ЭДП возбуждалась. В результате возникали продольные АС в виде шнуров тока в горячей области ЭДП ( $\mu_e, \mu_p \propto T^{3/2}$ ) и поперечные АС в виде движущихся слоев сильного электрического поля в более холодной и менее плотной области ЭДП [17].

Исследовалось изменение тока продольного АС с изменением напряженности параллельного и антипараллельного магнитного поля (**H** ↑↑ **E** и **H** ↓↓ **E**). Изменение тока АС в зависимости от магнитного поля регистрировалось на самописце.

Здесь приведены экспериментальные результаты для образца InSb-b1 с размерами  $5.1 \times 1.9 \times 1.3$  мм<sup>3</sup>, сопротивлением  $R = 7.9$  кОм. Сопротивление образца при наличии АС составляло  $R^{AS} = 3.5-5.5$  кОм в зависимости от уровня возбуждения.

На рис. 1 представлена вольт-амперная характеристика  $I(U)$  образца InSb-b1. Характерным для вольт-амперной характеристики (ВАХ) является наличие гистерезиса по току, что свидетельствует об автосолитонном характере токовых шнуров [20]. Исходные значения тока продольных АС, поведение которых исследовалось в магнитном поле, обозначены пронумерованными точками на ВАХ.

На рис. 2 представлены кривые зависимости тока продольного АС от магнитного поля. Цифра в начале кривой указывает номер точки ВАХ, значение тока в которой бралось как исходное.

Из рис. 2, а видно, что зависимость тока АС с изменением напряженности магнитного поля — сублинейная. С ростом напряженности параллельного магнитного поля (кривая I, **H** ↑↑ **E**) изменение тока претерпевает резкий скачок, сохраняя в дальнейшем плавное изменение тока. При уменьшении напряженности магнитного поля наблюдается обратный резкий скачок тока, но

<sup>†</sup> E-mail: kamilov@datacom.ru

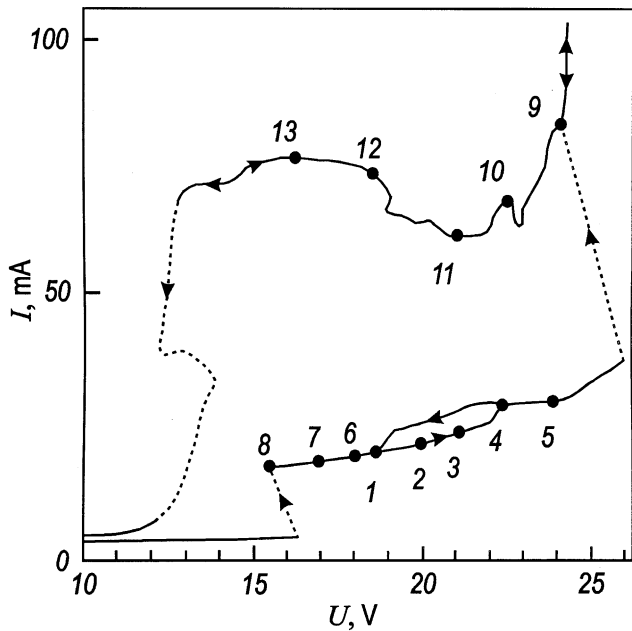


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики образца InSb-b1.

уже при меньшем значении напряженности магнитного поля. Такой же гистерезисный характер скачков тока при прямом и обратном ходе напряженности магнитного поля проявляется и при антипараллельном направлении магнитного поля (кривая II,  $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ ).

Экспериментально обнаружено и такое явление, когда при прямом и обратном ходе изменения напряженности магнитного поля величина тока АС приобретает другое исходное значение, которое затем сохраняется при изменении напряженности магнитного поля прямо и обратно при параллельном ( $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ ) и антипараллельном ( $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ ) направлениях. Это видно из рис. 2, b. При возрастании и убывании напряженности магнитного поля кривая II ( $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ ) изменения тока АС, претерпевая два гистерезисных скачка, возвращается опять в точку II. Однако кривая I' ( $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ ) при тех же условиях переходит в точку II', т.е. исходный ток АС приобретает повышенное значение. Величина этого исходного тока АС (точка II') сохраняется при нулевом значении напряженности магнитного поля и при изменении напряженности магнитного поля прямо и обратно, как при параллельном, так и антипараллельном направлениях. При этом кривые I' ( $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ ) и II' ( $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ ) изменения тока АС становятся уже другими. При воспроизведении ВАХ (рис. 1) ток АС в точке II восстанавливается.

В наших экспериментах наблюдалось и такое явление, когда при изменении напряженности магнитного поля прямо и обратно при одном направлении значения исходного тока АС приобретает другую величину, а при изменении магнитного поля прямо и обратно при другом направлении значения исходного тока АС восстанавливается.

На рис. 2, c кривая I ( $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ ) изменения тока АС воспроизводится при прямом и обратном ходе значений напряженности магнитного поля. Исходное значение тока (рис. 2, c, точка 9) не изменяется. Кривая II ( $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ ) изменения тока АС при прямом и обратном ходе значений напряженности магнитного поля приходит уже в точку 9'. Повторное изменение напряженности магнитного поля этого же направления прямо и обратно возвращает кривую зависимости тока АС в точку 9', т.е. кривая II' воспроизводится. Отключение вообще магнитного поля никак не сказывается на новом значении исходного тока АС. Изменение напряженности магнитного поля  $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$  при прямом ходе дает кривую I' зависимости тока АС, а при обратном ходе кривую I, т.е. восстанавливает первоначальное значение исходного тока АС (точка 9).

Эти экспериментальные результаты проявляются при исследовании поведения тока продольного АС в магнитном поле во многих других образцах.

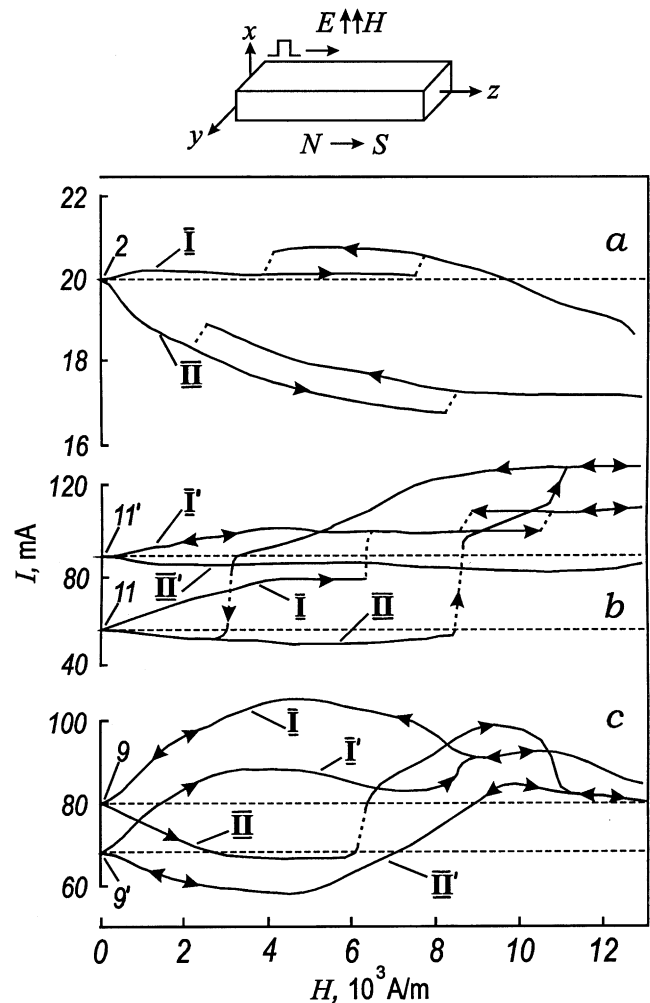


Рис. 2. Изменение тока продольного автосолитона в продольном магнитном поле в образце InSb-b1. I, I' —  $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$  и II, II' —  $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ .

Наблюдаемое скачкообразное возрастание или уменьшение тока продольного АС при определенных значениях напряженности магнитного поля обусловлено скорее всего делением АС или их слиянием [20].

Продольные АС представляют собой локализованные области повышенной температуры с резким градиентом  $\nabla T \approx 4 \cdot 10^5$  град/см [19]. В продольном магнитном поле ( $H = 8 \cdot 10^3$  А/м) наличие поперечного градиента температуры продольного АС приведет, вследствие эффекта Нернста–Эттингсгаузена, к появлению поперечной разности потенциалов  $E_{\perp} \approx 0.4$  В [19].

Существование и устойчивость горячего АС определяется динамическим равновесием термодиффузионного потока из центральной горячей области АС и обратного диффузионного потока в области АС размером  $\mathcal{L} < L$  [20], где  $\mathcal{L}$  — размер АС,  $L$  — диффузионная длина. Компенсация термодиффузионного и диффузионного потоков приводит к тому, что плотность поперечного к АС тока приближается к нулю. Появление поперечной разности потенциалов  $E_{\perp}$  вызовет усиление того или другого потоков и установление соответствующего динамического равновесия потоков. В результате ток АС будет увеличиваться или понижаться с ростом или уменьшением напряженности продольного магнитного поля. Изменение тока АС означает усиление или ослабление его возбуждения. В плотной ЭДП среднее значение плотности тока в образце  $\langle j \rangle \sim \langle [T(x)]^{3/2} \rangle$ , и, как показано в [20], усиление возбуждения горячего АС в образце с конечным размером приводит к скачкообразному увеличению среднего тока, понижение возбуждения АС — к скачкообразному уменьшению среднего тока.

В работе [20] также показано, что скачкообразное изменение тока при плавном изменении параметра возбуждения означает деление АС, слияние их или исчезновение. В нашем случае (рис. 2, точка 5, кривые I, II; точка II, кривые I, II и I') происходит, предположительно, деление продольного АС при некотором значении напряженности магнитного поля при ее росте и слияние этих АС или исчезновение одного из нескольких АС при меньшем значении напряженности магнитного поля при его убывании.

Итак, экспериментальные исследования показали, что слабое продольное магнитное поле существенно сказывается на поведении продольного АС в образцах антимонида индия. Во всех образцах при определенных значениях поля наблюдались резкие скачки тока, обусловленные, скорее всего, делением продольного АС. Было также обнаружено, что после воздействия магнитного поля величина исходного тока АС принимает другое стабильное значение. Наблюдалось и такое явление, когда значение исходного тока АС восстанавливалось после воздействия магнитного поля противоположного направления.

Авторы признательны и благодарны В.В. Осипову за серьезное внимание к работе, полезные замечания и дополнения, сделанные при ее обсуждении.

## Список литературы

- [1] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **61**, 1542 (1976).
- [2] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. Письма ЖЭТФ, **41**, 381 (1985).
- [3] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. УФН, **157**, 201 (1989).
- [4] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. УФН, **160**, 1 (1990).
- [5] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. Письма ЖЭТФ, **18**, 122 (1973).
- [6] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТП, **13**, 891 (1979).
- [7] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **21**, 2342 (1979).
- [8] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТП, **13**, 721 (1979).
- [9] А.Л. Дубицкий, Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **28**, 1290 (1986).
- [10] Б.С. Кернер, В.Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, **36**, 359 (1982).
- [11] Б.С. Кернер, В.В. Осипов, М.Т. Романенко, В.Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, **44**, 77 (1986).
- [12] В.А. Ващенко, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, В.Ф. Синкевич. ФТП, **23**, 1378 (1989).
- [13] В.А. Ващенко, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, В.Ф. Синкевич. ФТП, **24**, 1705 (1990).
- [14] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, И.В. Тыслук. ФТТ, **31**, 46 (1989).
- [15] М.Н. Винославский. ФТТ, **31**, 315 (1989).
- [16] M.N. Vinoslavskii, B.S. Kerner, V.V. Osipov, O.G. Sarbey. J. Phys.: Condens. Matter, **2**(12), 2863 (1990).
- [17] А.А. Степуренко. ФТП, **28**, 402 (1994).
- [18] I.K. Kamilov, A.A. Stepurenko. Phys. St. Sol. (b), **194**, 643 (1996).
- [19] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев. ФТП, **32**, 697 (1998).
- [20] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, А.Г. Южанин. ФТП, **22**, 2051 (1989).

Редактор Л.В. Шаронова

## The division of longitudinal autosolitons in InSb in a magnetic field

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

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

**Abstract** A study has been made of longitudinal autosolitons in InSb under a low magnetic field, which in this way considerably changes their behaviour pattern. In all samples at certain values of the external magnetic field sharp current bursts due to the division of longitudinal autosolitons were observed.