

Неустойчивость тока продольного автосолитона в p -InSb в продольном магнитном поле

© И.К. Камиллов, А.А. Степуренко[✉], А.Э. Гумметов

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

(Получена 27 апреля 2009 г. Принята к печати 4 мая 2009 г.)

Экспериментально исследовалась возможность появления неустойчивостей тока продольного автосолитона в диссипативной структуре в p -InSb при воздействии на образец продольным магнитным полем. Обнаружены колебания тока трех типов с характерным для каждого интервалом значений частоты и амплитуды, а также своим определенным механизмом возбуждения этих неустойчивостей.

Продольный термодиффузионный автосолитон (АС), так же как и поперечный, является одним из физических объектов, формирующихся под действием электрического поля в неравновесной и возбужденной электронно-дырочной плазме (ЭДП) в полупроводниках. Описанные в работах [1–4] и экспериментально исследованные в [5–9] АС представляют собой локализованные области экстремальной концентрации носителей заряда и их температуры. Рассмотренные в работе [10] и экспериментально исследованные [11] продольные АС, формирующиеся в плотной ЭДП ($j \propto T^{3/2}$), представляют собой локализованные области повышенной концентрации носителей заряда и их пониженной температуры (холодные АС) в ЭДП.

В работе [12] показано, что при определенных значениях тока продольного АС и величине поперечного магнитного поля наблюдаются релаксационные колебания тока в цепи образца, обусловленные движением под действием силы Лоренца АС в направлении периферии образца, отличающейся пониженной температурой, где существование АС неустойчиво, что приводит к цикличности процесса. В продольном магнитном поле, как показано в работе [13], происходит деление продольного АС, причем наблюдается гистерезис по магнитному полю. Таким образом, поведение тока продольного АС в продольном магнитном поле при определенных параметрах электрического и магнитного полей может носить циклический характер, т.е. возможно появление неустойчивости тока продольного АС в продольном магнитном поле.

В данной работе исследовалось поведение продольных АС в p -InSb в слабом продольном магнитном поле. Для исследования использовался ряд образцов кристаллов p -InSb с размерами от $2.5 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-1} см, концентрацией дырок $(2-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и с подвижностью $\mu_p = 4000-7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при температуре 77 К. Неравновесная ЭДП и продольные АС в образцах создавались джоулевым разогревом при воздействии импульса электрического поля длительностью до $(3-4) \cdot 10^{-3}$ с. На образец, помещенный в соленоид, воздействовало импульсное магнитное поле до $6.3 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ и длительностью $2 \cdot 10^{-3}$ с. Прикладывае-

мое магнитное поле являлось слабым для дырок, так как $\mu_p H/c = 0.032-0.056 < 1$.

Исследования проводились поэтапно. Сначала измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) при заданных значениях продольного магнитного поля противоположных направлений. На рис. 1 представлены ВАХ при фиксированных значениях магнитного поля и направлениях $N \rightarrow S$ ($\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$) и $S \rightarrow N$ ($\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$). Видно, что ВАХ, отображающие процесс формирования АС и изменение его тока с ростом электрического поля, отличаются после воздействия продольного магнитного поля. Величина тока в магнитных полях, направленных противоположно, различна и меньше, чем в отсутствие магнитного поля при тех же значениях напряжения U . С повышением магнитного поля расхождение в величинах тока усиливается.

На рис. 2 представлены графики зависимости тока АС от величины продольного магнитного поля разных направлений, воздействующего на образец — гаусс-амперные характеристики (ГАХ). Для ГАХ характерно уменьшение тока с ростом магнитного поля за исключением начального участка при $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$, где ток слегка возрастает. Уменьшение тока продольного АС с ростом продольного магнитного поля вызвано, с одной стороны, уменьшением подвижности из-за искривления траекторий радиально движущихся электронов, с другой — уменьшением подвижности согласно $\mu \propto 1/n$ для

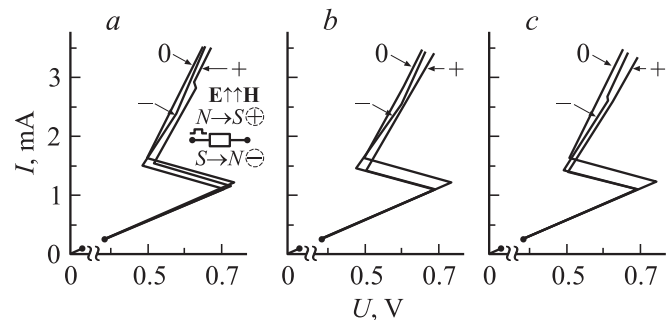


Рис. 1. Динамические вольт-амперные характеристики образца p -InSb при фиксированных значениях приложенного продольного магнитного поля противоположных направлений $\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$ (+) и $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$ (–) в импульсе: a — $H_1 = 2.4 \cdot 10^4 \text{ А/м}$, b — $H_2 = 3.7 \cdot 10^4 \text{ А/м}$, c — $H_3 = 6.2 \cdot 10^4 \text{ А/м}$.

[✉] E-mail: stepurenko-a@yandex.ru

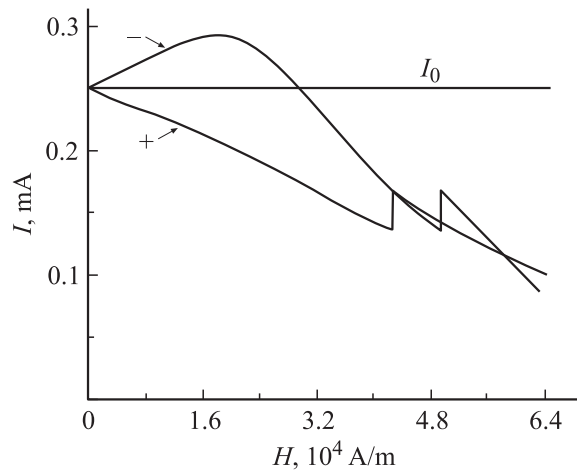


Рис. 2. Зависимости тока продольного автосолитона от приложенного продольного магнитного поля направлений $\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$ (+) и $\mathbf{E} \downarrow \downarrow \mathbf{H}$ (-). I_0 — значение тока при $H = 0$.

уплотняющейся и без того плотной плазмы в результате сжатия шнура тока при θ -пинче.

Возрастание тока на начальном участке ГАХ при $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$ обусловлено повышением подвижности носителей заряда из-за увеличения поперечного размера шнура тока АС на $4\mu_e E_{\text{ind}} \tau_e$ вследствие появления ЭДС индукции E_{ind} в радиальном диффузионном потоке электронов при изменении величины продольного магнитного поля, так как $r_e = L_e \pm \mu_e E_{\text{ind}} \tau_e$ (здесь L_e — длина диффузионного смещения, τ_e — время жизни электрона).

Скачки тока, проявляющиеся на ГАХ, являются, скорее всего, результатом деления АС, происходящего вследствие процессов, возникающих в продольном магнитном поле. В продольном АС, находящемся в продольном магнитном поле, индуцируется азимутальный ток, происхождение которого связано с закручиванием в магнитном поле электронов, движущихся радиально от центра АС. При достижении магнитным полем величины, при которой ларморовский радиус r_l сравнится с радиусом r_e отклонения электронов, конфигурация магнитного поля вследствие диамагнитного эффекта АС станет таковой, что диссипация АС может прекратиться, т.е. эволюция АС будет происходить адиабатически. Такое положение приведет к перевозбуждению АС, отчего он вынужден будет разделиться. Из-за различия радиусов $r_e = L_e \pm \mu_e E_{\text{ind}} \tau_e = mv_d / eH$ (v_d — диффузионная скорость электрона), в зависимости от направления продольного магнитного поля скачки тока произойдут при отличающихся значениях напряженности магнитного поля H_1 и H_2 .

На рис. 3 представлены осциллограммы временных реализаций тока $I(t)$ продольного АС при $I = 2.32$ мА с ростом продолжительности импульса приложенного продольного магнитного поля, их фазовые портреты $\dot{I}(I)$ и спектры мощности $P(f)$. Из осциллограмм видно, что осцилляции носят релаксационный характер, фазовые портреты соответственно представляют собой несимметричные замкнутые циклы. С ростом магнитного поля

в неустойчивости тока развивается бифуркация через удвоение периода, что отражено и на фазовых портретах. С дальнейшим ростом магнитного поля регулярность осцилляций нарушается, сопровождаясь их исчезновением. Как видно из рис. 3, *a*, изменение магнитного поля приводит к изменению как частоты, так и амплитуды колебаний тока продольного АС. На рис. 3, *b*, *c* представлены кривые зависимости амплитуды ΔI и частоты f колебаний тока от магнитного поля. Амплитуда колебаний тока нарастает, затем, осциллируя, спадает с ростом продольного магнитного поля. Наличие двух ветвей на кривой отражает тот факт, что появляются нерегулярности в колебаниях тока, характеризующиеся набором гармоник с различной амплитудой. Частотная зависимость колебаний тока продольного АС от магнитного поля (рис. 3, *c*) показывает плавное уменьшение. Интервал значений магнитного поля, в котором происходит эволюция неустойчивостей, достаточно узок ($\Delta H = 6.1 \cdot 10^3$ А/м).

На рис. 4 представлены осциллограммы временных реализаций тока $I(t)$ продольного АС с ростом тока, их фазовые портреты $\dot{I}(I)$ и спектры мощности $P(f)$. Выбиралась устойчивая по параметру времени и амплитуды возбужденная продольным магнитным полем регулярная неустойчивость тока АС. С ростом тока АС регулярная неустойчивость перестраивается, появляются периоды 2, 3. При токе АС $I = 2.6$ мА неустойчивость тока становится опять регулярной с частотой уже в 2 раза меньше изначальной. Далее с ростом тока неустойчивость уже не реализуется. Эволюция амплитуд трех периодов представлена на рис. 4, *b*. Видна тенденция, приводящая к однопериодичности неустойчивости тока. Эволюция частоты неустойчивости тока с ростом тока АС, показанная на рис. 4, *c*, демонстрирует преимущество реализации низкочастотной неустойчивости.

Как показывает анализ, обнаруженные неустойчивости тока в p -InSb в результате экспериментальных исследований ряда образцов в электрических полях 20–50 В/см и при воздействии продольного магнитного поля до $4 \cdot 10^4$ А/м можно разделить на три группы (рис. 5, *a*, *b*, *c*).

1. Колебания тока малой амплитуды (μA) и высокой частоты (~ 20 кГц) (рис. 5, *a*).
2. Колебания тока амплитудой доли мА и частотой до 10 кГц (рис. 5, *b*).
3. Колебания тока большой амплитуды — единицы мА и сравнимой частотой до 10 кГц (рис. 5, *c*).

Колебания тока продольного АС в продольном магнитном поле первой группы могут быть вызваны пульсацией АС. Пульсация тока продольного АС в продольном магнитном поле может быть обусловлена тем, что при некотором значении магнитного поля, благодаря θ -пинчу, плотность тока (концентрация носителей заряда в центре АС) окажется повышенной. В результате температура этой области понизится настолько, что прекратится процесс воспроизводства собственной проводимости, что повлечет, следовательно, понижение

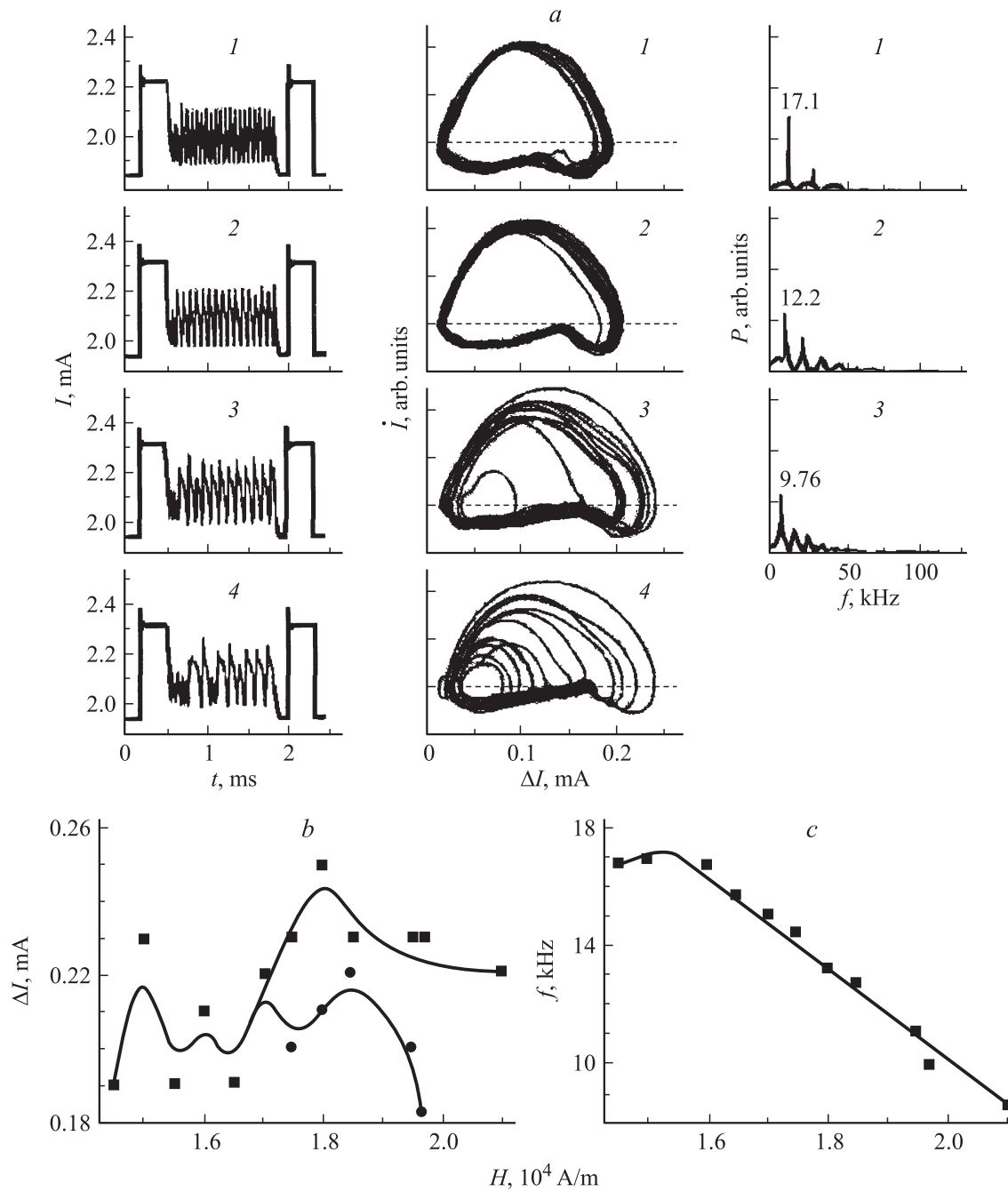


Рис. 3. *a* — осциллограммы, фазовые портреты и спектры мощности колебаний тока $I = 2.32$ мА продольного автосолитона при разных значениях продольного магнитного поля H , 10^4 А/м: 1 — 1.5, 2 — 1.8, 3 — 2, 4 — 2.1. *b* — изменение амплитуды ΔI , *c* — частоты f колебаний тока автосолитона с ростом продольного магнитного поля.

концентрации носителей в центре АС, вызывая уменьшение тока. Подводимая электрическим полем мощность остается постоянной, что обуславливает незамедлительное повышение температуры этой области и восстановление повышенной концентрации носителей в области АС и соответственно тока. Повторяемость этого цикла вызывает периодические колебания тока в цепи образца. Частота пульсаций тока такого периодически пульсирующего АС будет $\omega \propto \tau_r^{-1}$, где τ_r — характерное время рекомбинации энергии горячих носителей.

С ростом уровня возбуждения (электрического поля, приложенного к образцу) продольного АС и величины магнитного поля амплитуда пульсаций возрастает, что в конечном счете приводит к делению АС. При делении АС скачки тока имеют большую амплитуду, период деления может включать несколько периодов пульсаций. Естественно допустить, что деление АС определяет появление колебаний второй группы.

Ранее было обнаружено [13], что после воздействия продольного магнитного поля величина исходного тока

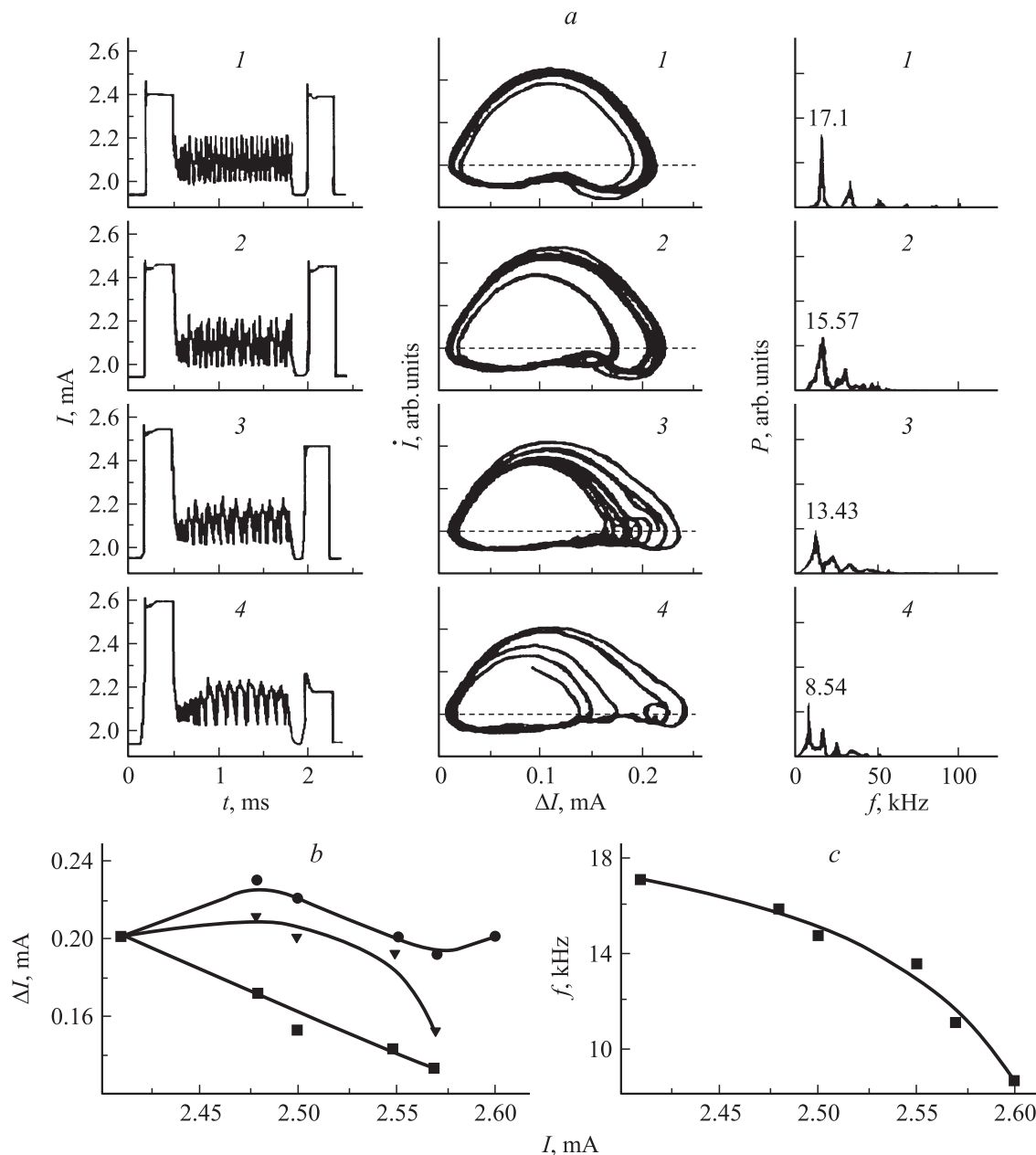


Рис. 4. *a* — осциллограммы, фазовые портреты и спектры мощности колебаний тока продольного автосолитона при значениях тока I , мА: 1 — 2.47, 2 — 2.50, 3 — 2.55, 4 — 2.60. *b* — изменение амплитуды ΔI , *c* — частоты f колебаний тока автосолитона с ростом его тока.

продольного АС принимает другое исходное стабильное значение, сохраняющееся и после отключения магнитного поля. Прежний АС восстанавливался при новом включении электрического поля или при смене направления продольного магнитного поля. Отличие исходных токов этих АС составляет несколько мА. Физику этого явления можно пояснить следующим образом. При некотором, достаточно большом, значении электрического поля, приложенного к образцу, формируется продольный АС, ток которого в растущем магнитном поле понижается. В результате появляется вероятность возникновения параллельного, пространственно другого

АС, шунтирующего первоначальный АС. При определенных параметрах электрического и магнитного полей становится возможным существование поочередно этих АС, т.е. переключение токовых шнуров. В результате появляются скачки тока, а в цепи образца — неустойчивость тока большой амплитуды. Описанное явление может стать причиной появления колебаний тока третьей группы.

Экспериментально наблюдаются и такие колебания на импульсе тока, которые, возникнув при воздействии внешнего продольного магнитного поля определенного значения и направления, сохраняются и после окон-

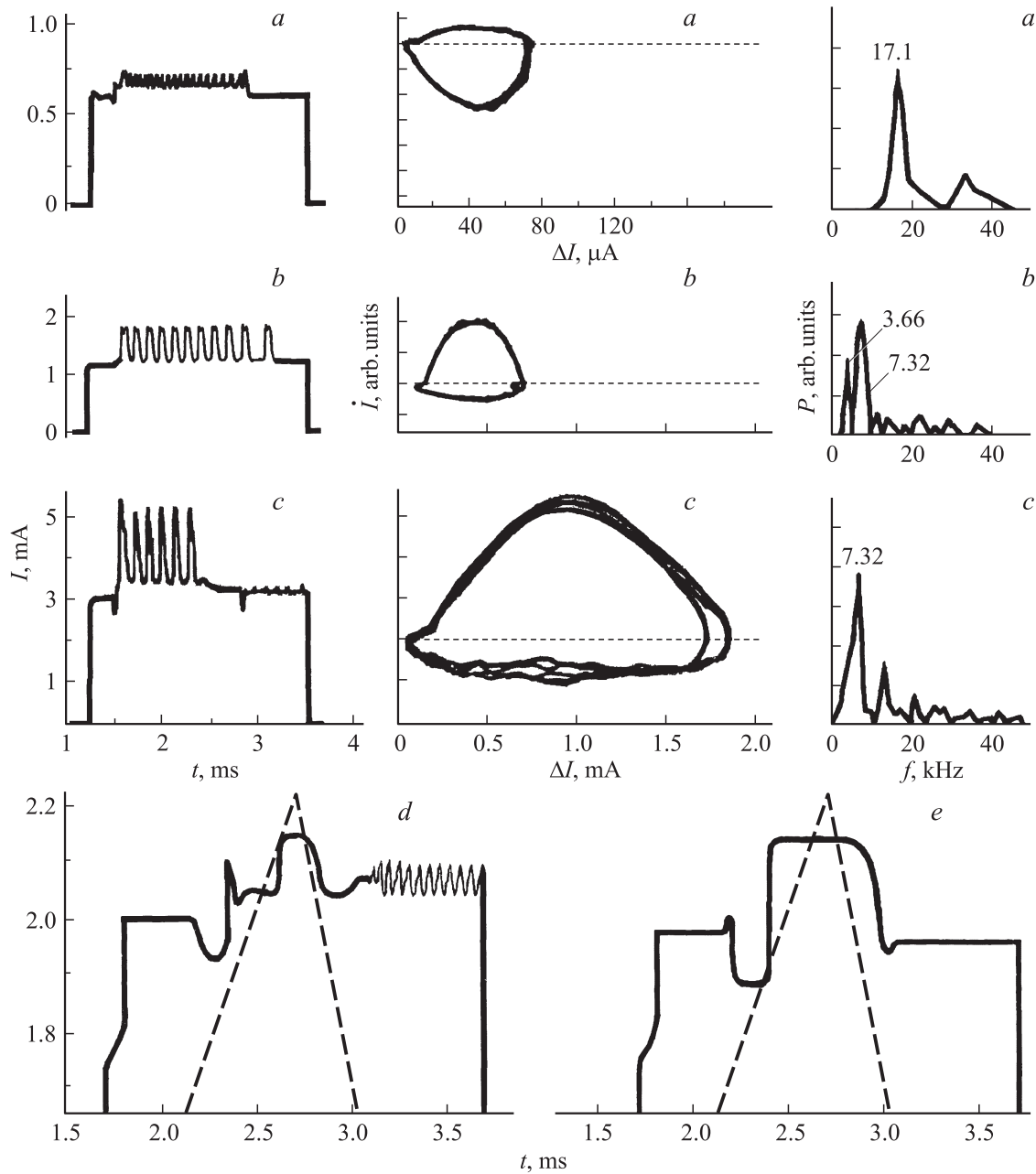


Рис. 5. Осциллограммы, фазовые портреты и спектры мощности колебаний тока продольного автосолитона в продольном магнитном поле, вызванные: *a* — пульсацией автосолитона, *b* — делением автосолитона, *c* — переключением автосолитона; *d, e* — временные реализации тока автосолитона при воздействии импульса продольного магнитного поля ориентации: *d* — $\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$, *e* — $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$.

чения импульса магнитного поля. На рис. 5, *d* представлена осциллограмма импульса тока, проходящего через образец, и треугольного импульса продольного магнитного поля, воздействующего на образец. Видно возникновение осцилляций при росте магнитного поля и на спаде. Вторые осцилляции продолжаются и в отсутствие магнитного поля. При каждом импульсе тока для появления колебаний тока необходимо воздействие импульса продольного магнитного поля.

На постоянном токе осцилляции возникают при воздействии одного импульса продольного магнитного поля

и продолжают бесконечно при отсутствии воздействия магнитного поля. Эти осцилляции исчезают при воздействии продольного магнитного поля другого направления, как и в предыдущем случае (рис. 5, *e*).

Возможное объяснение наблюдаемого эффекта сводится к тому, что при воздействии продольным магнитным полем АС становится диамагнетиком, оставаясь им и после отключения внешнего магнитного поля. В этом случае наблюдаемые осцилляции, стимулируемые собственным магнитным полем, могут быть обусловлены, скорее всего, пульсацией продольного АС.

Итак, проведенные экспериментальные исследования влияния продольного магнитного поля на транспорт продольного АС выявили, что при определенных величинах тока АС и магнитного поля появляются релаксационные колебания тока с характерными интервалами значений частоты и амплитуды, каждый из которых обусловлен своим определенным механизмом появления этих колебаний.

Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку работы (грант № 06-02-96613 „Конкурс Юг“).

Список литературы

- [1] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **71**, 1542 (1976).
- [2] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТП, **21**, 2342 (1979).
- [3] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТП, **13**, 891 (1979).
- [4] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, И.В. Тыслук. ФТП, **31**, 46 (1989).
- [5] Б.С. Кернер, В.Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, **28**, 1290 (1986).
- [6] M.N. Vinoslavskii, B.S. Kerner, V.V. Osipov, O.G. Sarbey. J. Phys: Condens. Matter, **2** (12), 2863 (1990).
- [7] R. Symanczyk, E. Pieper, D. Jäger. Phys. Lett. A, **143**, 337 (1990).
- [8] R. Symanczyk, S. Gaelings, D. Jäger. Phys. Lett. A, **160**, 397 (1991).
- [9] А.А. Степуренко. ФТП, **28**, 402 (1994).
- [10] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, А.Г. Южанин. ФТП, **22**, 2051 (1988).
- [11] И.К. Камиллов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалёв. ФТП, **36**, 187 (2002).
- [12] И.К. Камиллов, А.А. Степуренко, А.Э. Гумметов, А.С. Ковалёв. ФТП, **42**, 393 (2008).
- [13] И.К. Камиллов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалёв. ФТП, **34**, 433 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

The current instability of the longitudinal autosolitons in a longitudinal magnetic field in p -InSb

I.K. Kamilov, A.A. Stepurenko, A.E. Gummetov

Institute of Physical Science Center,
Russian Academy of Sciences,
367003 Makhachkala, Russian

Abstract The opportunity of instability occurrence of a current longitudinal autosolitons in dissipative structure in p -InSb was experimentally investigated at influence on a sample by a longitudinal magnetic field. There are found the current fluctuations of these types with characteristic for each interval of frequency and amplitude values, and also with certain mechanism of excitation of these instabilities.