

Гальваномагнитные явления в продольном автосолидоне в p -InSb в поперечном и продольном магнитных полях

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

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

(Получена 28 сентября 2010 г. Принята к печати 22 октября 2010 г.)

Исследовалось поведение продольного автосолидона в p -InSb в поперечном и продольном магнитных полях. Показано, что движение шнура тока в образцах, которое осуществляется в поперечном магнитном поле, при одновременном воздействии продольным магнитным полем не происходит. Предлагается вывод, что появляющийся гальваномагнитный эффект Эттингсгаузена в продольном автосолидоне в поперечном магнитном поле полностью блокируется диамагнитным эффектом, возникающим в автосолидоне при θ -пинче.

Описанные в теоретических работах [1,2] термодиффузионные автосолидоны (АС), возбужденные в неравновесной электронно-дырочной плазме (ЭДП), представляют собой локализованные области экстремальных концентраций носителей заряда и их температуры. Эти области в плотной ЭДП в электрическом поле представляют собой шнуры тока — продольные АС, а в ЭДП невысокой плотности — домены электрического поля, перпендикулярные линиям тока, — поперечные АС [3–5]. Экспериментальная реализация этих АС, осуществленная в ряде полупроводниковых материалов, описана в работах [6–11]. Показано [12], что продольные АС, сформированные в созданной джоулевым разогревом неравновесной ЭДП в образцах p -InSb, являются холодными, т.е. локализованными областями повышенной концентрации носителей заряда с пониженной температурой. В поперечном магнитном поле ток АС скачком понижается вследствие смещения АС под действием силы Лоренца в холодную область образца [13]. При определенных значениях тока АС и магнитного поля наблюдаются колебания тока в цепи образца, обусловленные движением АС в направлении периферии образца, отличающейся пониженной температурой, где существование АС неустойчиво, что приводит к цикличности процесса [14]. Исследования поведения тока продольного АС в продольном магнитном поле выявили ряд особенностей: наблюдается понижение порогового электрического поля, при котором формируется АС, появляются диамагнитные свойства, возбуждаются колебания тока АС в цепи образца, обусловленные пульсацией и делением продольного АС [15].

Одновременная реализация диамагнетизма АС, появляющегося в продольном магнитном поле, и эффекта Эттингсгаузена в этом АС, возникающего в поперечном магнитном поле и являющегося причиной перемещения АС (шнура тока), может привести к очень интересным результатам.

Начнем с эксперимента, приведем результаты экспериментальных исследований и соответствующее резюме.

Экспериментальные исследования посвящены выяснению поведения продольного АС (шнура тока) в компенсированном хромом p -InSb при воздействии на образец одновременно поперечного и продольного магнитных полей. Для исследования использовались образцы размерами от $2.5 \cdot 10^{-2}$ до $2 \cdot 10^{-1}$ см, с концентрацией дырок $p = (2-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и их подвижностью $\mu_p = 2500-7000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при температуре 77 К. Неравновесная ЭДП и продольные АС создавались джоулевым разогревом при воздействии на образец импульса электрического поля длительностью $\tau_E = 4 \cdot 10^{-3}$ с. Образец помещался в устройство, состоящее из двух соленоидов, создающих поперечное и продольное магнитные поля (индексы \perp и \parallel соответственно) относительно направления электрического поля, прикладываемого к образцу. Длительность импульсов магнитных полей τ_H , их амплитуда и полярность ($N \rightarrow S, S \leftarrow N$) регулировались автономно, при этом $\tau_{H\parallel} < \tau_{H\perp} < \tau_E$.

На рис. 1 представлены осциллограммы временных реализаций тока продольного АС в поперечном магнитном поле при одновременном воздействии продольного магнитного поля. Во-первых, представлена осциллограмма импульса тока продольного АС в образце в отсутствие магнитного поля (рис. 1, *a*). При воздействии на образец импульса поперечного магнитного поля H_{\perp} ток АС скачком падает (рис. 1, *b*) вследствие смещения АС на периферию образца, отличающуюся пониженной температурой, где АС исчезает. Движение АС вызвано тем, что в поперечном магнитном поле возникающий поток тепла в направлении силы Лоренца — поток Эттингсгаузена — создает дополнительное прогревание материала на переднем фронте шнура тока, а на заднем — охлаждение. При одновременном приложении импульса продольного магнитного поля ток АС в поперечном магнитном поле повышается (рис. 1, *c, d*). При $H_{\parallel} = 4.19 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ в нашем случае ток АС восстанавливается, как будто поперечного магнитного поля нет (рис. 1, *e*).

На рис. 1, *f* приведена осциллограмма импульса тока $I(t)$ продольного АС при приложении к образцу импульса только продольного магнитного поля. Из рис. 1, *e* и *f* видно, что повышение тока продольного АС в

[¶] E-mail: stepurenko-a@yandex.ru

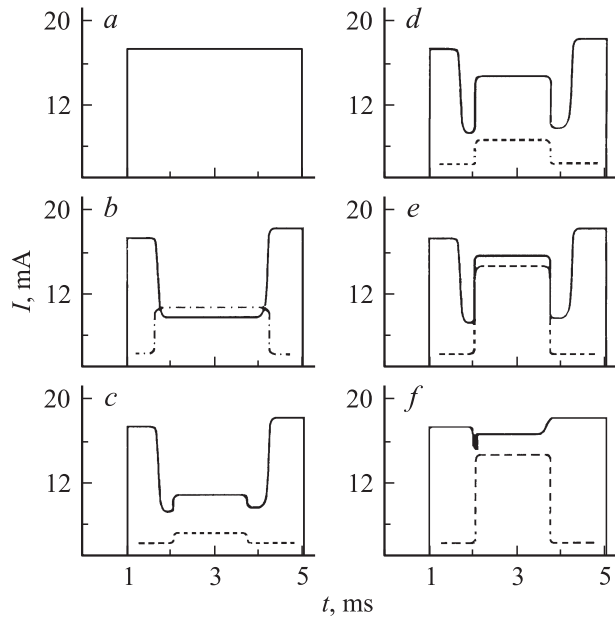


Рис. 1. Осциллограммы временных реализаций тока продольного автосолитона в поперечном и продольном магнитных полях H_{\perp}/H_{\parallel} , А/м: a — $0/0$, b — $1.99 \cdot 10^4/0$, c — $1.99 \cdot 10^4/8.99 \cdot 10^3$, d — $1.99 \cdot 10^4/1.93 \cdot 10^4$, e — $1.99 \cdot 10^4/4.19 \cdot 10^4$, f — $0/4.19 \cdot 10^4$.

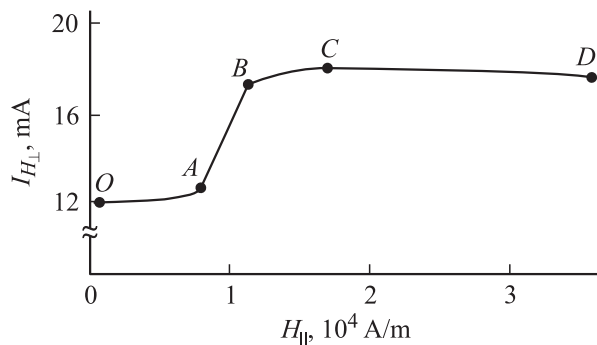


Рис. 2. Зависимость тока продольного автосолитона в поперечном магнитном поле $I_{H_{\perp}}$ от продольного магнитного поля H_{\parallel} .

образце в поперечном магнитном поле под действием продольного магнитного поля далеко не адекватно понижению тока продольного АС только в продольном магнитном поле. Изменение тока таково (рис. 1, e), как будто поперечное магнитное поле отсутствует, а присутствует только продольное магнитное поле.

Анализируя эти результаты экспериментальных исследований, приходим к выводу: ток продольного АС в образце в поперечном магнитном поле не изменяется, если приложить к образцу продольное магнитное поле достаточной величины. Данный эффект обусловлен, скорее всего, тем, что движение шнура тока в образце, которое осуществляется только в поперечном магнитном поле, не происходит.

На рис. 2 представлена динамическая специальная гаусс-амперная характеристика — зависимость тока АС $I_{H_{\perp}}$ в поперечном магнитном поле заданного значения ($H_{\perp} = \text{const}$) от величины продольного магнитного поля. Как видно из рисунка, $I_{H_{\perp}}$ с ростом продольного магнитного поля сначала медленно, можно сказать, линейно повышается (участок OA). Затем происходит резкий скачок (участок AB) тока с последующим сублинейным нарастанием (участок BC) и переходом на насыщение и даже спад (участок CD). Участок OA свидетельствует о линейном замедлении движения АС в поперечном магнитном поле. Участок AB — крутой положительный скачок тока — указывает на резкое торможение и прекращение движения шнура тока. Участок BD показывает, что изменение тока АС происходит под влиянием только продольного магнитного поля, хотя поперечное магнитное поле при этом присутствует.

Наблюдаемый эффект осуществляется в результате одновременной реализации двух явлений, рассмотренных в работах [13–15]. Как показано в работах [13,14], шнур тока (продольный АС) под действием поперечного магнитного поля вследствие эффекта Эттингсгаузена приобретает градиент температуры в направлении силы Лоренца. Именно этот градиент температуры и обеспечивает перемещение АС в направлении периферии образца, отличающейся пониженной температурой. В зависимости от поперечных размеров образца АС достигает границы образца или области, где температура такова, что продольный АС исчезает. Экспериментально это проявляется отрицательным скачком тока или неустойчивостями тока продольного АС. С другой стороны, в продольном магнитном поле продольный АС (шнур тока) становится диамагнетиком, т.е. представляет собой цилиндр, состоящий из спиралей траекторий движущихся вокруг обогащенной дырками области электронов, создающих собственное магнитное поле [15]. С ростом только продольного магнитного поля ($H_{\perp} = 0$) происходит уменьшение тока АС, обусловленное уменьшением подвижности из-за искривления траекторий радиально движущихся потоков электронов, а также уменьшением подвижности электронов согласно $\mu_e \propto 1/n$ (n — концентрация) для уплотняющейся и без того плотной плазмы в результате сжатия шнура тока при θ -пинче. Повышение плотности плазмы шнура приведет к понижению температуры носителей в центре, что может стать одной из причин преждевременного гашения АС. Однако основной сутью блокирования воздействия поперечного магнитного поля на АС является, скорее всего, появление диамагнетизма АС в продольном магнитном поле. Вращающиеся электроны способны переносить тепло от горячего фронта шнура тока к холодному. Чем больше продольное магнитное поле, тем быстрее вращаются электроны, тем значительнее происходит перенос тепла. В результате перепад температур фронтов шнура тока, обеспечивающий движение шнура, сглаживается, от чего скорость шнура замедляется. При некоторой достаточной величине

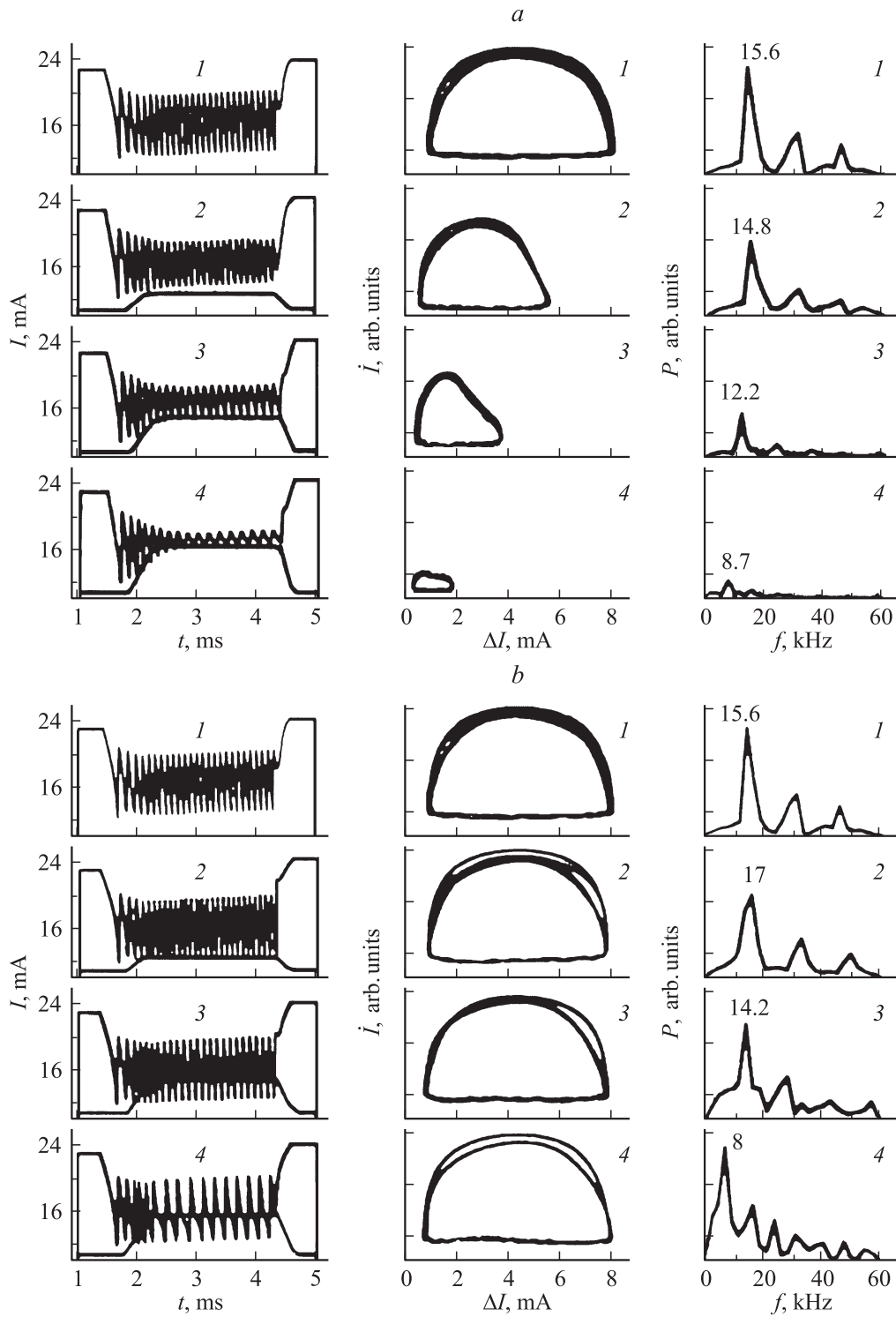


Рис. 3. Осциллограммы $I(t)$, фазовые портреты $\dot{I}(\Delta I)$ и спектры мощности $P(f)$ колебаний тока продольного автосолитона, возбужденные поперечным магнитным полем $H_{\perp} = 5.65 \cdot 10^3$ А/м, в продольном магнитном поле H_{\parallel} , 10^3 А/м: 1 — 0, 2 — 1.34, 3 — 3, 4 — 3.66; направление поля: *a* — $\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$, *b* — $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$. (*c*, *d*) — изменение частоты f и амплитуды ΔI колебаний тока автосолитона с ростом продольного магнитного поля направлений $\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$ (сплошная линия) и $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$ (штриховая).

продольного магнитного поля градиент температуры в шнуре тока исчезает и, как следствие, шнур тока перестанет смещаться, хотя прежнее поперечное магнитное поле присутствует. Таким образом, происходит блоки-

ровка эффекта Эттингсгаузена продольным магнитным полем.

В работе [13] показано, что при определенных значениях тока продольного АС и поперечного магнитного

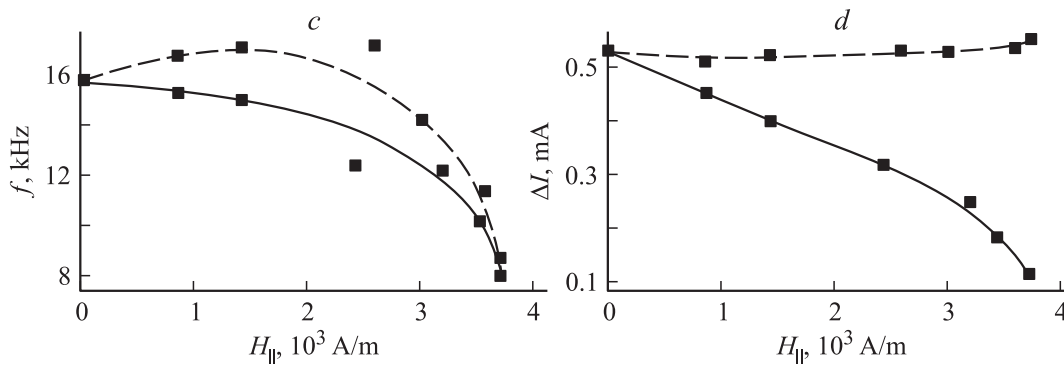


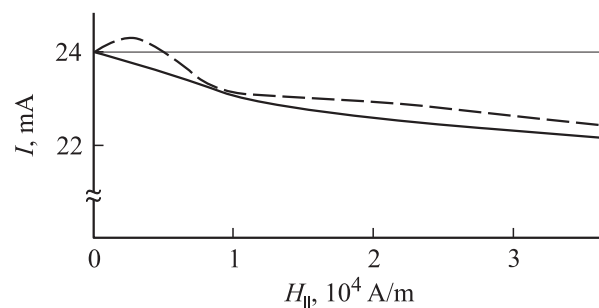
Рис. 3 (продолжение).

поля наблюдаются релаксационные колебания тока в цепи образца, обусловленные движением АС, вызванные эффектом Эттингсгаузена в шнуре тока в поперечном магнитном поле в направлении периферии образца. Воздействие продольного магнитного поля определенным образом скажется на указанных колебаниях, если принять во внимание описанное выше явление ослабления эффекта Эттингсгаузена этим полем. На рис. 3, *a, b* представлены осциллограммы релаксационных колебаний тока $I(t)$ продольного АС, возбужденные поперечным магнитным полем, при воздействии продольным магнитным полем двух направлений ($\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$ и $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$), их фазовые портреты $\dot{I}(\Delta I)$ и спектры мощности $P(f)$. Из осциллограмм видно, что с ростом продольного магнитного поля изменение параметров неустойчивостей тока АС неоднозначно относительно направлений этого поля. На рис. 3, *c, d* приведены зависимости частоты f и амплитуды колебаний тока ΔI соответственно от продольного магнитного поля двух направлений. В обоих случаях частотная зависимость колебаний тока продольного АС от продольного магнитного поля показывает плавное уменьшение, за исключением начального участка при $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$. Амплитуда колебаний в случае $\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$ слабо сублинейно спадает, а в случае $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$ остается почти неизменной. Рассматриваемые колебания сохраняются при воздействии продольного магнитного поля небольших значений — до $3.98 \cdot 10^3$ А/м. При больших величинах продольного магнитного поля колебания резко исчезают. Само по себе влияние продольного магнитного поля на ток продольного АС имеет свои особенности. На рис. 4 показаны гаусс-амперные характеристики (ГАХ) продольного АС при противоположных направлениях продольного магнитного поля. Для этих ГАХ характерно уменьшение тока с ростом магнитного поля, за исключением начального участка при $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$, где ток слегка возрастает. Возрастание тока на начальном участке ГАХ при $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$ обусловлено повышением подвижности носителей заряда μ_e из-за увеличения поперечного размера L шнура тока АС на $2\mu_e E_i \tau_e$ вследствие появления эдс индукции E_i в радиальном диффузионном потоке электронов при изменении величины продольного магнитного поля [15], т.е. поперечный размер

становится равным $L_H = L + 2\mu_e E_i \tau_e$, где τ_e — время жизни электронов.

Резюмируя приведенные экспериментальные результаты, можно сделать ряд выводов. Ослабление эффекта Эттингсгаузена вызывает понижение скорости движения шнура тока и возрастание минимального импульса тока, где реализуются осцилляции. Все это приводит к уменьшению частоты и амплитуды колебаний тока АС. Увеличение тока АС при небольших значениях продольного магнитного поля (ГАХ, рис. 4) компенсирует ослабление эффекта Эттингсгаузена, тем самым обуславливая неизменность или даже небольшое повышение скорости движения шнура тока. Амплитуда колебаний тока АС, как видно из рис. 3, *c, d* и 4, также коррелирует с изменением тока в продольном магнитном поле в случае $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$.

На рис. 5 представлены осциллограммы временных реализаций тока при воздействии продольного и поперечного магнитных полей, разделенных во времени. Рис. 5, *a* иллюстрирует импульс тока при отсутствии шнура тока в образце при напряжении электрического поля меньше критического, $U < U_{th}$, при котором формируется продольный АС. На рис. 5, *b* показан тот же импульс тока, но при воздействии на образец импульса продольного магнитного поля длительностью $\tau_{H_{\parallel}} = 0.5$ мс и величиной $H_{\parallel} = 8.75 \cdot 10^3$ А/м. Видно, что сформировался продольный АС с наведенным диамагне-

Рис. 4. Зависимость тока продольного автосолидона от продольного магнитного поля направлений $\mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$ (сплошная линия) и $\mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$ (штриховая).

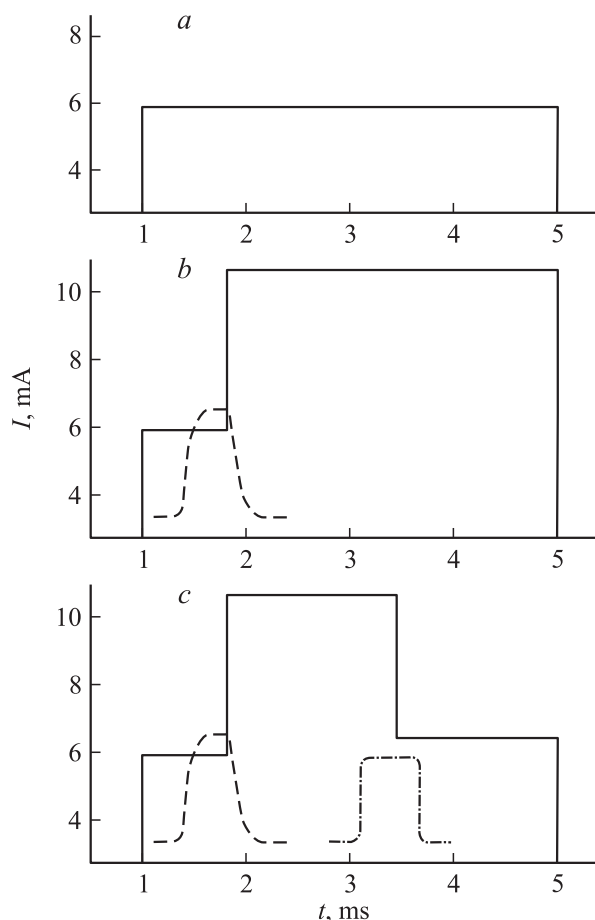


Рис. 5. Осциллограммы временных реализаций тока продольного автосолитона в продольном и поперечном магнитных полях, разделенных во времени. Пояснение в тексте.

тизмом [15]. Наконец, на рис. 5, *c* показана временная реализация тока при воздействии на образец продольным магнитным полем и через промежуток времени $t = 2$ мс поперечным магнитным полем $H_{\perp} = 6.37 \cdot 10^3$ А/м длительностью $\tau_{H_{\perp}} = 0.5$ мс. Ясно видно, что после приложения поперечного магнитного поля следствие воздействия продольного магнитного поля исчезает, что свидетельствует, скорее всего, о разрушении θ -пинча. При больших значениях продольного магнитного поля и тока θ -пинч сохраняется при воздействии поперечным магнитным полем любых имеющихся величин (до $3.18 \cdot 10^4$ А/м).

Итак, приведенные экспериментальные результаты показали, что появляющийся гальваномагнитный эффект Эттингсгаузена в продольном АС в поперечном магнитном поле полностью блокируется диамагнитным эффектом, возникающим в АС при θ -пинче. Неустойчивость тока АС, возникающая в поперечном магнитном поле, под действием продольного магнитного поля модулируется адекватно изменению тока в этом поле при $H_{\perp} = 0$.

По-видимому, поперечные гальваномагнитные и термомагнитные эффекты в полупроводниках можно ослабить или полностью анулировать диамагнетизмом, воз-

никающим в полупроводнике в продольном относительно направления тока магнитном поле.

Список литературы

- [1] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **71**, 1542 (1976).
- [2] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. Письма ЖЭТФ, **41**, 381 (1985).
- [3] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. Письма ЖЭТФ, **18**, 122 (1973).
- [4] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **21**, 2342 (1979).
- [5] А.Л. Дубицкий, Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **28**, 1290 (1986).
- [6] Б.С. Кернер, В.Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, **36**, 359 (1982).
- [7] M.N. Vinoslavskii, B.S. Kerner, V.V. Osipov, O.G. Sarbey. J. Phys.: Condens. Matter, **2** (12), 2863 (1990).
- [8] R. Symanczyk, E. Pieper, D. Jäger. Phys. Lett. A, **143**, 337 (1990).
- [9] R. Symanczyk, S. Gaelings, D. Jäger. Phys. Lett. A, **160**, 397 (1991).
- [10] А.А. Степуренко. ФТП, **28**, 402 (1994).
- [11] А.А. Степуренко. ФТП, **30**, 76 (1996).
- [12] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалёв. ФТП, **36** (2), 187 (2002).
- [13] К.Л. Звездин, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **58**, 160 (1970).
- [14] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.Э. Гумметов, А.С. Ковалёв. ФТП, **42**, 393 (2008).
- [15] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.Э. Гумметов. ФТП, **44** (2), 154 (2010).

Редактор Л.В. Шаронова

Galvanomagnetic phenomena in the longitudinal autosoliton in p -InSb at the cross and longitudinal magnetic fields

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

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

Abstract The behavior of longitudinal autosoliton in p -InSb at the cross and longitudinal magnetic fields was investigated. The movement of the current cord in the samples which occurs in a cross magnetic field, is shown not to occur at simultaneous longitudinal magnetic field. The conclusion is supposed, what appearing galvanomagnetic Ettingshausen effect in longitudinal autosoliton is blocked completely at the cross magnetic fields by diamagnetic effect arising in the autosoliton at θ -pinch.