

Автосолитоны в InSb в магнитном поле

© И.К. Камиллов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев

Институт физики им. Х.И. Амирханова,
367003 Махачкала, Россия

(Получена 26 мая 1997 г. Принята к печати 23 декабря 1997 г.)

Экспериментально показано, что продольное магнитное поле сравнительно небольшой величины вызывает существенное изменение скорости движения автосолитонов в образцах антимонида индия и приводит к заметному перераспределению электрического поля этих автосолитонов. При этом частота и амплитуда колебаний тока во внешней цепи образца увеличиваются или уменьшаются в зависимости от направления продольного магнитного поля.

Теоретические исследования Кернера и Осипова [1–4] показали, что в разогретой электронно-дырочной плазме (ЭДП) можно внешним дополнительным возмущением возбудить термодиффузионные автосолитоны (АС). В плотной ЭДП при наличии внешнего электрического поля АС проявляются в виде слоев тока, направленных вдоль приложенного электрического поля [5–6], а в ЭДП не слишком высокой плотности образуются АС в виде слоев сильного электрического поля, перпендикулярных линиям тока [7–9].

В работах [10–14] показано, что неравновесная ЭДП в *n*-GaAs, образующаяся в результате ударной ионизации или инжекции, в электрическом поле расслаивается на многочисленные шнуры тока и домены электрического поля. В [15–16] приводятся результаты обнаружения и экспериментального исследования бегущего горячего АС в разогретой электрическим полем однородно-фотогенерируемой ЭДП в *n*-Ge.

В [17–18] показано, что в неравновесной ЭДП, полученной в образце InSb джоулевым разогревом, в сильном электрическом поле появляются АС в виде как слоев тока, так и областей сильного электрического поля. Это в какой-то степени аналогично экспериментальным результатам, полученным в [10–12]. Поскольку в InSb ЭДП несимметрична (для эффективных масс дырок m_p^* и электронов m_e^* выполняется $m_p^* > m_e^*$), области сильного электрического поля движутся в электрическом поле вдоль слоев тока в сторону движения горячих электронов, т.е. от катода к аноду, вызывая колебания тока во внешней цепи образца. Форма и скорость движения АС близки к полученным в [15–16]. В работе [18] показано, что из сложных колебаний можно выделить два основных типа. Для каждой из этих мод характерен свой интервал прикладываемого напряжения. Было найдено, что у одной из них (I тип) частота колебаний уменьшается, а амплитуда растет с увеличением прикладываемого к образцу напряжения, у другой (II тип) частота колебаний плавно растет, а амплитуда колебаний изменяется так, что ее увеличение сменяется уменьшением.

АС в образцах InSb должны быть достаточно чувствительны к магнитному полю [19]. Поскольку рассматриваемые АС представляют собой локализованные области градиента концентрации носителей и темпера-

туры [17,18], влияние магнитного поля на них будет обусловлено скорее всего термомагнитными эффектами Эттингсгаузена и Нернста [19].

Мы исследовали поведение АС в образцах InSb в продольном магнитном поле. Магнитное поле напряженностью до 10^4 А/м создавалось в соленоиде, внутри которого размещался образец. Для исследования использовался ряд образцов InSb различных размеров, которые при температуре $T = 77$ К имели концентрацию носителей $p = (2 \div 4) \cdot 10^{12}$ см⁻³ с подвижностью $\mu \approx 4000$ см²/В·с. Мы использовали методику электрических измерений такую же, как и в [18]. Исследовалось влияние продольного магнитного поля на движущиеся АС. При этом магнитное поле включалось только тогда, когда во внешней цепи образца появлялись колебания тока.

На рис. 1 представлены осциллограммы колебаний тока моды типа I (*a, b*) и зависимости частоты (*c*) и амплитуды (*d*) этих колебаний с изменением приложенного магнитного поля в интервале от 0 до 1500 А/м.

При направлении магнитного поля, совпадающем с направлением электрического поля, $\mathbf{H} \uparrow \uparrow \mathbf{E}$, наблюдается уменьшение частоты колебаний тока с ростом напряженности магнитного поля (кривые 1–3 соответствуют разным амплитудам импульсов электрического напряжения $U_1 < U_2 < U_3$, при которых появляются колебания, отличающиеся величинами частот и амплитуд; с этих величин и прослеживается зависимость частоты и амплитуды от магнитного поля).

При антипараллельном (взаимно противоположном) направлении магнитного и электрического полей, $\mathbf{H} \downarrow \uparrow \mathbf{E}$, частота этих же колебаний тока в образце изменяется иначе (рис. 1, *c*, кривые 1'–3'). При наименьшем значении исходного напряжения U_1 (кривая 1') частота колебаний сначала плавно уменьшается с ростом напряженности магнитного поля, а затем проходит через три экстремума, приобретая тенденцию к возрастанию. При большем исходном напряжении U_2 (кривая 2') значение частоты колебаний растет плавно с увеличением напряженности магнитного поля, а затем проходит через два экстремума, сохраняя тенденцию к возрастанию. При наибольшем исходном напряжении U_3 (кривая 3') частота колебаний растет при увеличении напряженности магнитного поля во всем интервале его изменения.

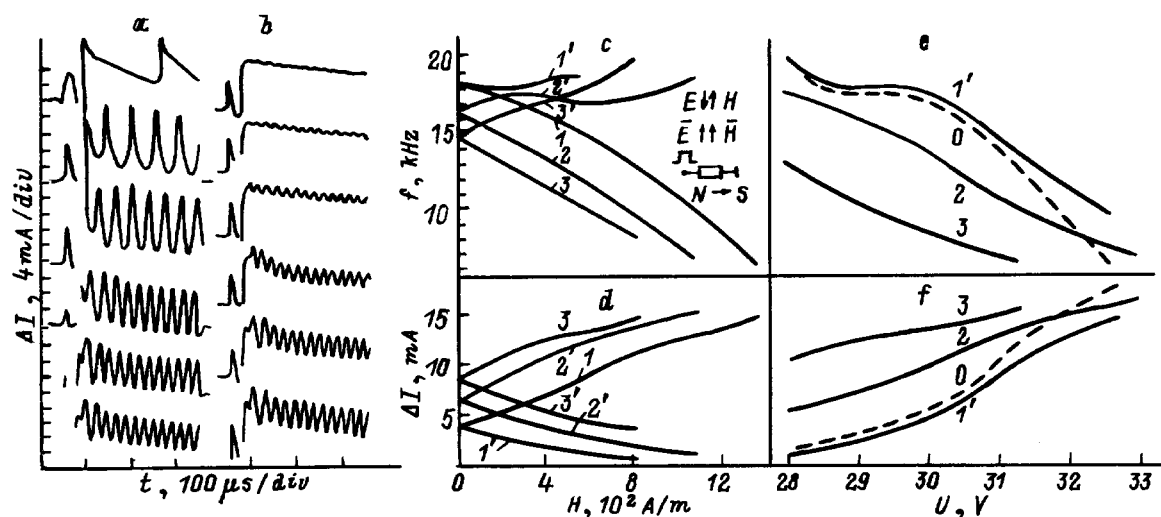


Рис. 1. Колебания тока моды типа I во внешней цепи образца антимионида индия. *a, b* — осциллограммы колебаний тока при $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ и $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ соответственно. $U_2 = 30.3$ В; H увеличивается для осциллограмм снизу вверх. *c, d* — зависимости частоты (f) и амплитуды колебаний тока (ΔI) от величины напряженности магнитного поля при постоянном значении электрического поля $U_1 = 29.5$ В ($1, 1'$), $U_2 = 30.3$ ($2, 2'$), $U_3 = 30.8$ В ($3, 3'$). $1, 2, 3$ — $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$; $1', 2', 3'$ — $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$. *e, f* — зависимости частоты и амплитуды колебаний от прикладываемого электрического напряжения при постоянном значении магнитного поля H , А/м. 0 — 0 , $1'$ — 136 ($\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$), 2 — 544 ($\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$), 3 — 1088 ($\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$).

На рис. 1, *d* показаны изменения амплитуды колебаний тока ΔI , возникающие при тех же постоянных напряжениях $U_1 < U_2 < U_3$, с ростом напряженности магнитного поля. Величина амплитуды плавно нарастает, когда $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ (кривые $1-3$), а при $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ так же плавно убывает (кривые $1'-3'$).

Изменение частоты и амплитуды колебаний тока с ростом напряженности магнитного поля для случая $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ качественно аналогично изменению этих же параметров с ростом электрического поля (рис. 1, *e, f*, кривые $0, 0$). На рис. 1 представлены также зависимости частоты f (рис. 1, *e*, кривые $1', 2, 3$) и амплитуды ΔI колебаний тока (рис. 1, *f*, кривые $1', 2, 3$) при увеличении электрического напряжения U_1 , прикладываемого к образцу, находящемуся в постоянном магнитном поле. При $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ уменьшение частоты колебаний тока происходит при более низких значениях U по сравнению со случаем $H = 0$, т.е. $f_H(U) < f(U)$ (рис. 1, *e*, кривые $0, 2, 3$). При $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ наблюдается обратная ситуация $f_H(U) > f(U)$ (рис. 1, *f*, кривые $0, 1'$). Кривые электрополевой зависимости амплитуды колебаний тока при постоянном магнитном поле расположены в обратном порядке, т.е. $\Delta I_H(U) > \Delta I(U)$ при $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ (рис. 1, *f*, кривые $0, 2, 3$) и $\Delta I_H(U) < \Delta I(U)$ при $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ (рис. 1, *f*, кривые $0, 1'$).

На рис. 2 представлены результаты исследования влияния магнитного поля на частоту и амплитуду колебаний тока моды типа II [17,18]. Поведение этой моды с изменением электрического поля представлено на рис. 2, *e* и *f*. В данном случае эта мода претерпевает не только бифуркацию через удвоение периода, но и утроение периода с ростом приложенного к образцу электрического поля. Штриховкой выделены области напряжений, где

появляются и существуют удвоение и утроение периода, а линии, окаймляющие эти области, показывают значения амплитуд колебаний тока этих периодов. Осциллограммы на рис. 2, *a* и *b* иллюстрируют динамику изменения частоты и амплитуды колебаний тока с ростом напряженности магнитного поля в интервале значений H от 0 до 4800 А/м при $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ (рис. 2, *a*) и при $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$ (рис. 2, *b*). Соответствующие графики показывают, что частота в среднем уменьшается при $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ с ростом напряженности магнитного поля (рис. 2, *c*, кривые $1, 2$ — приведены для двух значений исходного напряжения на образце $U_1 < U_2$). При этом колебания тока при U_1 наблюдаются в интервале напряженности магнитного поля от 0 до 2150 А/м. При обратном направлении магнитного поля, $\mathbf{H} \downarrow \mathbf{E}$, частота колебаний растет, хотя в конце интервала, где еще существуют колебания тока при повышении напряженности магнитного поля, появляется тенденция к уменьшению частоты.

На рис. 2, *d* показаны изменения амплитуды колебаний тока в образце с изменением напряженности магнитного поля. При U_1 в магнитном поле $\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$ амплитуда колебаний тока плавно растет во всем интервале напряженности магнитного поля, где колебания существуют (рис. 2, *d*, кривая 1). При $U_2 > U_1$ с увеличением напряженности магнитного поля ($\mathbf{H} \uparrow \mathbf{E}$) амплитуда колебаний заметно растет (рис. 2, *d*, кривая 2); при $H = 1900 \div 2200$ А/м данная мода претерпевает бифуркацию удвоения периода. С дальнейшим ростом поля происходит переход к регулярным колебаниям, амплитуда этих колебаний сублинейно растет, и далее начиная с $H = 3300$ А/м мода претерпевает следующую бифуркацию удвоения периода.

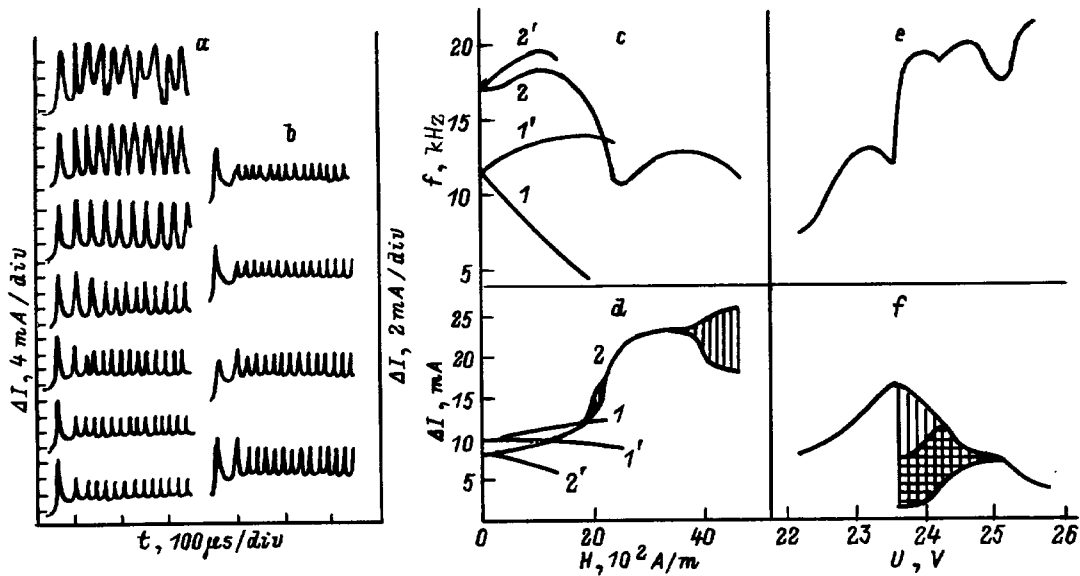


Рис. 2. Колебания тока моды типа II во внешней цепи образца антимолида индия. *a, b* — осциллограммы колебаний тока при $H \uparrow E$ и $H \downarrow E$ соответственно; $U_2 = 25.1 \text{ В}$; H увеличивается для осциллограмм снизу вверх. *c, d* — зависимости частоты (f) и амплитуды колебаний тока (ΔI) от величины напряженности магнитного поля при постоянном значении электрического поля: $U_1 = 22.7 \text{ В}$ (*1, 1'*), $U_2 = 25.1 \text{ В}$ (*2, 2'*). *1, 2* — $H \uparrow E$; *1', 2'* — $H \downarrow E$. *e, f* — зависимости частоты и амплитуды колебаний от электрического напряжения при $H = 0$.

При U_1 и U_2 в магнитном поле $H \downarrow E$ амплитуда колебаний тока исследуемой моды почти линейно уменьшается с ростом напряженности магнитного поля в интервале существования этих колебаний.

Наблюдаемые явления, т.е. изменение частоты и амплитуды колебаний тока во внешней цепи образца с изменением внешнего магнитного поля, можно объяснить решающим вкладом термомагнитных эффектов. Автосолитоны как в виде продольных шнуров тока, так и в виде поперечных линиям тока слоев пониженной концентрации носителей заряда представляют собой локализованные области повышенной температуры с резким градиентом порядка $\nabla T = (T_{AS} - T)/L/2$, где T_{AS} — температура в центральной области АС, T — температура на периферии АС; $T_{AS} \approx 2T$ [20], $l < L < (Li)^{1/2}/2$ — ширина АС [6], L — диффузионная длина носителей, l — длина остывания носителей, $\nabla T = 2T/L = 2T/l \div 4T/(Li)^{1/2}$. Для InSb $T \geq 150 \text{ К}$ [18], $L \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}$, $l \approx 9 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ [21,22], $\nabla T = (3.3 \div 4) \cdot 10^5 \text{ град/см}$. В продольном магнитном поле наличие поперечного градиента температуры ∇T шнура тока (АС) приведет вследствие эффекта Нернста–Эттингсгаузена к появлению поперечной разности потенциалов. Поле поперечного эффекта Нернста–Эттингсгаузена является нечетной функцией, т.е. знак поперечной разности потенциалов зависит от направления магнитного поля $E_{\perp}(H) = -E_{\perp}(-H)$ [23]. Под действием этой разности потенциалов движущийся во внешнем электрическом поле АС сместится по направлению к шнуру тока, или от него. В первом случае АС окажется в области более плотной и горячей ЭДП, во

втором — в области меньшей плотности и температуры ЭДП. В обоих случаях изменятся соотношения величин подвижностей (μ_e, μ_p) и температур (T_e, T_p) электронов и дырок, что приведет к изменению фазовой скорости (АС) v_{ph} [7]. Были проведены численные расчеты скорости движения АС, представленной выражением работы [7]. Оказалось, что с перемещением АС в более горячую область ЭДП скорость движения АС понизится. Соответственно частота колебаний тока во внешней цепи образца в первом случае будет увеличиваться, а во втором уменьшаться.

В горячей, более плотной области ЭДП, дефицит концентрации носителей в АС понизится, т.е. уменьшится сопротивление АС, а следовательно, уменьшится и электрическое поле в центре АС. Все это приведет к тому, что величина скачка тока во внешней цепи образца уменьшится при разрушении движущегося по образцу горячего АС.

В более холодной и менее плотной области ЭДП дефицит концентрации носителей в АС повысится, а следовательно, увеличится сопротивление и, соответственно, электрическое поле в центре АС. В результате величина скачка тока во внешней цепи образца возрастает при разрушении АС. Это объясняет, почему амплитуда колебаний тока во внешней цепи образца понижается при смещении АС в более горячую и плотную область ЭДП и возрастает при смещении АС в более холодную и менее плотную область ЭДП.

Итак, мы экспериментально показали, что продольное магнитное поле сравнительно небольшой величины (до величины порядка 10^4 А/м) вызывает существен-

ное изменение скорости движения АС, образующихся в сильных греющих полях в образцах InSb. При этом частота колебаний тока во внешней цепи образца уменьшается, а амплитуда этих колебаний растет с увеличением продольного магнитного поля, имеющего то же направление, что и приложенное к образцу электрическое поле ($\mathbf{H} \uparrow \uparrow \mathbf{E}$). При антипараллельном направлении магнитного и электрического полей ($\mathbf{H} \downarrow \uparrow \mathbf{E}$) наблюдается увеличение частоты колебаний тока, а амплитуда этих колебаний уменьшается с ростом напряженности магнитного поля.

Авторы признательны и благодарны В.В. Осипову за внимание к работе и сделанные им замечания и дополнения, способствовавшие улучшению качества работы.

Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку работы (грант 97-02-17623).

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. 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, **18**, 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.Н. Ващенко, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, В.Ф. Синкевич. ФТП, **23**, 1378 (1989).
- [13] В.Н. 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. Тыслюк. 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**, N 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] А.К. Звездин, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **58**, 160 (1970).
- [20] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, А.Г. Южанин. ФТП, **22**, 2051 (1989).
- [21] И.А. Баев. Болг. физ. журн., **7**, 198 (1980).
- [22] T.M. Lipshits, A.Ya. Oleinikov, A.Ya. Shulman. Phys. St. Sol., **14**, 511 (1966).
- [23] И.М. Цидильковский. *Термомагнитные явления в полупроводниках* (М., Госиздат физ.-мат. лит-ры, 1960).

Редактор Л.В. Шаронова

Effect of magnetic field on autosolitons in InSb

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

Kh.I. Amirkhanov Institute of Physics,
367003 Makhachkala, Russia

Abstract It is shown experimentally that the longitudinal magnetic field of a relatively small magnitude causes noticeable changes in velocity of autosoliton traveling in InSb samples and a visible redistribution of these autosolitons in electric field. As a result, the current oscillation frequency and amplitude in the external circuit of a sample either increases or decreases depending on the direction of longitudinal magnetic field.