

Движение продольного автосолитона в p -InSb в поперечном магнитном поле

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

Институт физики им. К.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук, 367003 Махачкала, Дагестан, Россия

(Получена 24 августа 2006 г. Принята к печати 4 сентября 2006 г.)

Экспериментально показано, что возбужденный электрическим полем в неравновесной электронно-дырочной плазме в p -InSb продольный автосолитон при воздействии поперечного магнитного поля движется в направлении периферии образца, отличающейся пониженной температурой, где неустойчивое существование автосолитона приводит к цикличности процесса, обуславливая колебания тока в цепи образца. Средняя скорость движения автосолитона составляет $2 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$ см/с в магнитном поле в пределах 5962.5–22 657.5 А/м.

PACS: 42.65.Tg, 52.35.Sb

В [1] рассматриваются электрические свойства полупроводников, в которых отрицательное сопротивление образуется за счет резкой зависимости проводимости от температуры, в скрещенных магнитном и электрическом полях. Показано, что при определенной геометрии образца образуется уединенная волна плотности тока, движущаяся с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полям, при этом приводится оценка скорости движения шнура тока. В работах [2,3] показано, что в неравновесной возбужденной электронно-дырочной плазме (ЭДП), созданной джоулевым разогревом в p -InSb, появляется диссипативная структура, представляющая собой ЭДП с локализованными 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).

Установлено [4], что продольные АС в p -InSb реализуются как локализованные области повышенной концентрации носителей заряда и пониженной температуры, т. е. являются холодными.

Согласно экспериментальным исследованиям [5], наблюдается деление продольных АС при воздействии на них продольного магнитного поля.

Продольный холодный АС в p -InSb в электрическом поле представляет собой шнур тока с соответствующим распределением плотности тока по сечению шнура [4,6]. Прикладывая поперечное магнитное поле, можно, по видимому, как показано в работе [1], привести в движение продольный автосолитон в образце в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полям, не придерживаясь особых ограничений на форму и размеры образцов.

В данной работе была поставлена задача обнаружить и исследовать явление перемещения продольного автосолитона, когда на образец воздействует поперечное к направлению тока, протекающего через образец, магнитное поле.

Измерения проводились при $T = 77$ К на образцах, имеющих концентрацию носителей $p = 1.9 \cdot 10^{12}$ см⁻³ с подвижностью $\mu = 6870$ см²/В·с. Для исключения появления колебаний тока, вызванных движением поперечных АС, использовались короткие образцы с длиной $a = 0.025$ см $\sim \mathcal{L} = (L \cdot l)^{1/2}$, где \mathcal{L} — размер АС, L — длина биполярного диффузионного смещения, l — длина остывания электронов. Поперечные размеры образцов значительно превышали их длину ($a < b = c$). К образцу, помещенному в соленоид, прикладывалось импульсное электрическое поле длительностью $\tau_E = 4 \cdot 10^{-3}$ с. Создаваемое в этом соленоиде импульсное магнитное поле (до 31 800 А/м), являлось слабым как для дырок ($\mu_p H/c \approx 5 \cdot 10^{-3} \ll 1$), так и для электронов ($\mu_e H/c \approx 0.5 < 1$, так как $\mu_e/\mu_p \approx 100$). Длительность импульса магнитного поля составляла $\tau_H = 2 \cdot 10^{-3}$ с $< \tau_E$.

Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) одного из образцов представлена на рис. 1.

Пороговое поле, при котором создается ЭДП, составляет 1.1 В. Возбуждение ЭДП приводит к формированию

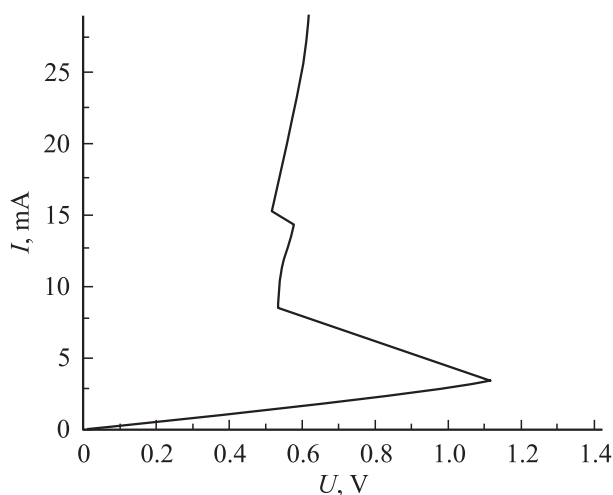


Рис. 1. ВАХ образца p -InSb.

[¶] E-mail: ask@iwt.ru

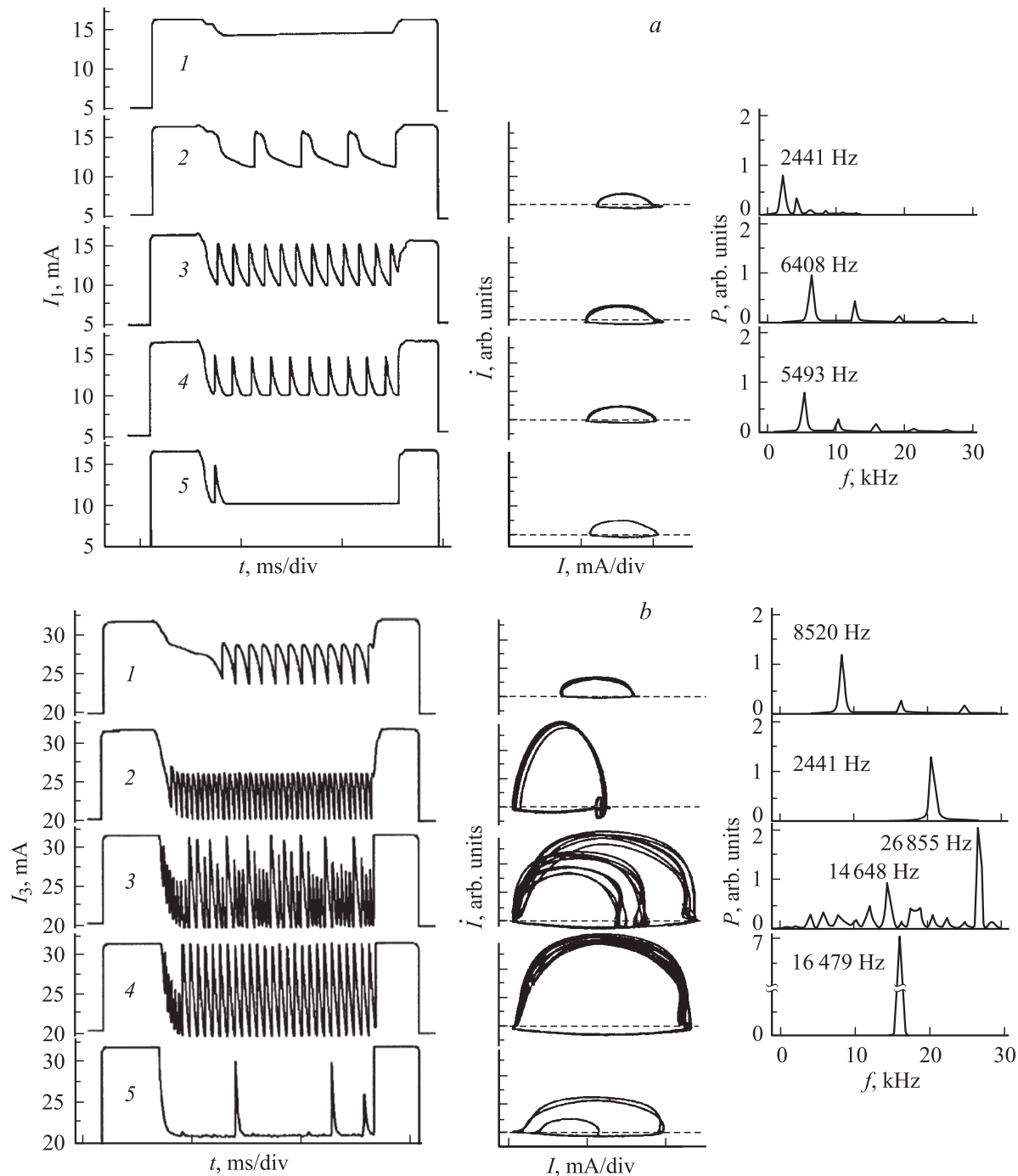


Рис. 2. Осциллограммы, фазовые портреты и спектры мощности колебаний тока I_1 и I_3 продольного АС при разных магнитных полях: $a - I_1 = 16 \text{ мА}$, H , А/м: 1 — 6042, 2 — 6757.5, 3 — 9381, 4 — 10891, 5 — 112098.5. $b - I_3 = 32 \text{ мА}$, H , А/м: 1 — 11289, 2 — 16377, 3 — 22657.5, 4 — 23214, 5 — 31402.5.

продольного АС (шнура тока), который при воздействии поперечного магнитного поля может прийти в движение [1].

На рис. 2 представлены осциллограммы временных реализаций неустойчивости токов $I_1 = 16 \text{ мА}$ и $I_3 = 32 \text{ мА}$ продольного АС с ростом импульса приложенного магнитного поля, их фазовые портреты и спектры мощности.

При $H = 6042 \text{ А/м}$ (рис. 2, a , осциллограмма 1) ток АС заметно понижается, что вызвано, скорее всего, смещением АС в прохладную область образца. С повышением магнитного поля действие его проявляется плавным, периодически повторяющимся уменьшением тока продольного АС (рис. 2, a , осциллограмма 2). С дальнейшим ростом магнитного поля период уменьшается, неустойчивость тока становится регулярной

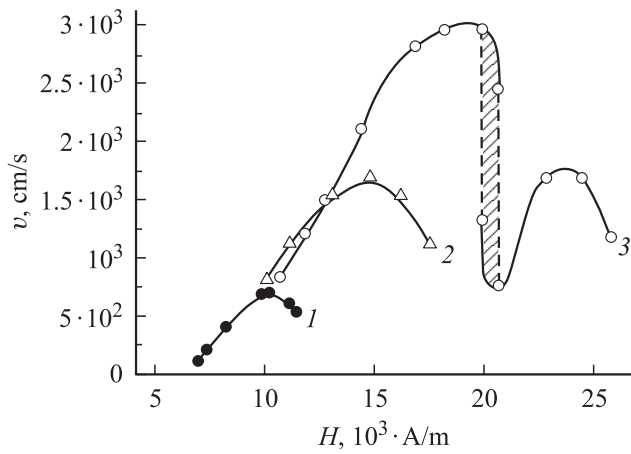


Рис. 3. Зависимость скорости движения автосолитона с ростом магнитного поля: 1 — $I_1 = 16$ мА, 2 — $I_2 = 21$ мА, 3 — $I_3 = 32$ мА.

(рис. 2, а, осциллограмма 3). Далее период неустойчивости тока увеличивается (рис. 2, а, осциллограмма 4), и при $H = 11\,209.5$ А/м эта неустойчивость пропадает (рис. 2, а, осциллограмма 5). Из осциллограмм колебаний тока и фазовых портретов видно, что токовые осцилляции представляют собой колебания релаксационного характера с крутым передним фронтом. Такая форма колебаний может указывать на то, что процесс спонтанного формирования токового шнура характеризуется значительно меньшим временем τ_I по сравнению со временем уменьшения тока шнура в поперечном магнитном поле $\tau_{I(H)}$ ($\tau_I \ll \tau_{I(H)}$). Если считать, что уменьшение тока в поперечном магнитном поле является следствием перемещения шнура тока (продольного АС), то время перемещения АС t задается временем уменьшения тока АС, т.е. $t = \tau_{I(H)} = T = 1/f$. Расстояние перемещения АС определяется поперечными размерами образца $b = c$. Скорость движения шнура найдем как $v = (b/2)/t = (b/2)f$. В нашем случае $b = c = 0.2$ см, $f = 2441$ Гц (рис. 2, а, осциллограмма 2), $v = 2.44 \cdot 10^2$ см/с. Из рис. 2 видно, что частота колебаний тока, вызванных движением продольного АС в поперечном магнитном поле, является функцией этого магнитного поля. Зависимость скорости движения продольного АС от магнитного поля, являясь аналогичной частотной зависимости, графически может быть представлена рис. 3.

При большем токе продольного АС реализуются более сложные сценарии развития неустойчивости этого тока, а следовательно, и движения токового шнура с ростом параметра по магнитному полю. На рис. 2, б представлены осциллограммы колебаний тока, возникающие под действием поперечного магнитного поля при исходном значении тока $I_3 = 32$ мА продольного АС, их фазовые портреты и спектры мощности. Из рис. 2, б видно, как регулярная неустойчивость тока, отражающая характер движения АС, с возрастанием величины

магнитного поля переходит в хаотическое состояние, а затем опять в регулярное, но уже с другой частотой и амплитудой. Далее эта неустойчивость распадается и исчезает при $H = 31\,402.5$ А/м, т.е. повторяющееся движение АС прекращается.

Следует отметить, что форма изменения тока в магнитном поле зависит от уровня исходного тока. Кроме того, изменение тока в магнитном поле имеет несколько изломов. Вследствие этого скорость изменения тока (т.е. скорость движения шнура тока) подчиняется разным нелинейным закономерностям и не является постоянной величиной ($dI/dt \propto v \neq \text{const}$). Это связано с тем, что размер шнура при его движении поперек образца обусловлен радиальным распределением температуры. Наличие изломов на осциллограммах временной реализации колебаний тока АС в поперечном магнитном поле свидетельствует как раз о том, что ток АС, так же как и поперечный размер его, меняется скачком. С увеличением размеров шнура скорость движения в магнитном поле уменьшается [1].

При токе I_3 (рис. 2, б), как и при токе I_1 (рис. 2, а), колебания тока продольного АС в поперечном магнитном поле носят релаксационный характер с крутым передним фронтом, демонстрируя вследствие локального джоулева разогрева резкий рост собственной проводимости и формирование АС с последующим его движением в холодную область образца и исчезновением.

Как и в случае тока I_1 , для тока I_3 также характерно изменение как дифференциальной скорости движения АС, так и полной. С повышением напряженности магнитного поля частота колебаний и, следовательно, скорость движения АС плавно увеличиваются от $0.85 \cdot 10^3$ до $2.6 \cdot 10^3$ см/с ($H = 11\,289 - 22\,657.5$ А/м) (рис. 3). Заштрихованная область отражает тот факт, что в интервале значений магнитного поля $H = 19\,875 - 20\,749.5$ А/м наблюдаемая нерегулярность неустойчивости колебаний тока обусловлена набором скоростей движения. К этому может привести возможность формирования второго, третьего и т.д. продольного АС в образце с повышением прикладываемого напряжения электрического поля. Повидимому, появление аттрактора сложной формы, отображенного фазовым портретом (рис. 2, б, осциллограмма 3), обусловлено как раз наличием нескольких АС при токе $I_3 = 32$ мА.

Наблюдаемые явления можно пояснить на основе модели, предложенной в работе [1]. При включении магнитного поля шнур тока (локальная область пониженной температуры и повышенной концентрации носителей) начнет двигаться в направлении действия силы Лоренца. Движение это обусловлено тем, что за счет отклонения электронов в магнитном поле возникает дополнительный поток тепла в направлении, перпендикулярном направлению электрического и магнитного полей, коэффициент Нернста δ увеличивается с ростом температуры. Отсюда на переднем фронте постоянно происходит дополнительное прогревание материала, а на заднем — охлаждение, что и вызывает движение шнура.

Перемещаясь, шнур тока пересекает радиальный температурный градиент. Концентрация носителей понижается, их подвижность растёт, шнур расширяется и, в конце концов, достигает достаточно охлажденной области, где термическая генерация носителей понизится настолько, что ток шнура станет минимально возможным или шнур исчезнет. Действие магнитного поля прекратится, приложенное электрическое поле сохраняется, вновь возникнет шнур тока, и весь процесс повторится, обуславливая колебания тока в цепи образца.

Итак, считаем, что наблюдаемые колебания тока продольного АС в поперечном магнитном поле вызваны движением этого АС в направлении периферии образца, отличающейся пониженной температурой, где неустойчивое существование АС приводит к цикличности процесса: формирование АС в электрическом поле, движение его под воздействием поперечного магнитного поля в область неустойчивого существования.

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

Список литературы

- [1] Л.К. Звездин, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **58** (1), 160 (1970).
- [2] А.А. Степуренко. ФТП, **28**, 403 (1994).
- [3] I.K. Kamilov, A.A. Stepurenko. Phys. Status Solidi B, **194**, 643 (1996).
- [4] I.K. Kamilov, A.A. Stepurenko, A.S. Kovalev. J. Phys.: Condens. Matter, **17**, 3843 (2005).
- [5] И.К. Камиллов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев. ФТП, **34**, 433 (2000).
- [6] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, А.Г. Южанин. ФТП, **22**, 2051 (1988).

Редактор Л.В. Беляков

The longitudinal autosoliton movement in the p -InSb in the transverse magnetic field

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

Kh.I. Amirkhanov Institute of Physics,
Daghestan Scientific Center,
Russian Academy of Sciences,
367003 Makhachkala, Daghestan, Russia

Abstract It is experimentally shown, that the longitudinal autosoliton excited by the electric field in nonequilibrium electron-hole plasma in p -InSb under an influence of the cross magnetic field moves in a direction of the sample outlying parts distinguished by the low temperature, where the unstable existence of the autosoliton results in cyclic process, causing current oscillations in a sample circuit. The average speed of autosoliton movement is $2 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$ cm/s in the magnetic field in limits 5962.2–22657.5 A/m.