

Явления коллективного поведения автосолионов в диссипативной структуре в InSb

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

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

(Получена 1 июля 2002 г. Принята к печати 24 декабря 2002 г.)

Показано, что поведение автосолионов можно рассматривать как поведение коллектива взаимодействующих уединенных локализованных состояний в электронно-дырочной плазме. В результате исследований обнаружены переходы от режимов хаотических колебаний тока во внешней цепи образца, вызванных движением автосолионов, к регулярным, а от регулярных колебаний — к другим регулярным колебаниям через бифуркацию посредством удвоения периода с ростом уровня возбуждения электронно-дырочной плазмы. Делается вывод, что система, состоящая из коллектива взаимодействующих автосолионов, обладает свойством самоорганизации. Показано, что движущиеся по образцу автосолионы во внешнем продольном магнитном поле до $13.6 \cdot 10^3$ А/м также обнаруживают синергетическое поведение в диссипативной структуре в InSb.

Теоретически исследовано [1–17] и экспериментально показано, что в неравновесной возбужденной электронно-дырочной плазме (ЭДП), созданной либо ударной ионизацией или инжекцией в *n*-GaAs [8,9], либо за счет фотогенерации в Ge [10], а также джоулевым разогревом в InSb [11,12], появляются локализованные области экстремальной концентрации и температуры носителей заряда — автосолионы (АС) как в виде слоев тока (продольные АС), так и в виде слоев сильного электрического поля (поперечные АС).

Согласно численным расчетам, результаты которых приведены в работах [13–17], кинетика образования АС в ЭДП полупроводников, их эволюция весьма разнообразны. В работе [13] рассматривается случай генерации АС в ЭДП на неоднородности в образце. В электрическом поле движущиеся по образцу последовательно АС, достигая конца образца и разрушаясь, вызывают скачки тока и проявляются в виде релаксационных колебаний тока во внешней цепи образца. Период T этих колебаний определяется временем задержки t_d возникновения АС на неоднородности $T = t_d(E)$. С другой стороны, $T = \mathcal{L}/v_{AC}$, $\mathcal{L} > L$, где \mathcal{L} — длина образца, L — амбиполярная диффузионная длина носителей заряда, v_{AC} — скорость АС, $v_{AC} \propto \mu E$, μ — амбиполярная подвижность носителей, E — напряженность прикладываемого к образцу электрического поля. С изменением E изменяется скорость АС и время задержки t_d , что приводит к изменению частоты колебаний тока в цепи образца. При достижении E некоторого значения расстояние \mathcal{L}_c между АС станет близким к L . В случае $\mathcal{L}_p \leq L$ становится возможным взаимодействие типа перекачки [1,10] между образовавшимися на неоднородности движущимися АС. Вследствие этого в образце возникает случайная последовательность движущихся АС, которая приводит к стохастическим колебаниям во внешней цепи образца. Естественное наличие в образце нескольких неоднородностей, хотя бы и разных амплитуд, может

привести к появлению нескольких последовательностей движущихся АС по образцу, что обуславливает сложную картину колебаний тока во внешней цепи образца.

Поперечные АС, образующиеся в возбужденной ЭДП в образце, находящемся в электрическом поле, представляют собой области повышенной напряженности электрического поля. При достижении некоторого уровня возбуждения, т.е. определенного значения напряженности электрического поля, в этих областях начинается процесс ударной ионизации [13–17]. В зависимости от скорости генерации и рекомбинации, а также от уровня возбуждения автосолион деформируется или разделяется. Во внешней цепи образца такая ситуация проявляется в виде колебаний тока с осцилляциями на вершине колебаний или колебаний удвоенной частоты. Явление ударной ионизации в АС должно легче всего наблюдаться в однодолинных полупроводниках, в которых ударная ионизация начинается при меньших температурах носителей, чем междолинные переходы.

Движение поперечных АС, возникающих в ЭДП в полупроводнике, помещенном во внешнее электрическое поле, может сопровождаться их пульсацией. Анализ численных исследований [17] показывает, что в процессе пульсаций можно выделить две фазы: рост амплитуды АС и некоторое его сужение; уменьшение амплитуды АС и небольшое его расширение. Частота происходящих пульсаций $\omega \propto \tau_r^{-1}$, где τ_r — характерное время рекомбинации. С ростом уровня разогрева ЭДП амплитуда пульсаций АС монотонно возрастает. При некотором уровне разогрева ЭДП амплитуда пульсаций достигает такой величины, когда происходит деление пульсирующего АС на два разбегающихся друг от друга АС, которые на достаточно большом расстоянии друг от друга в свою очередь также делятся. В результате последовательности таких делений образец заполняется взаимодействующими АС.

Исходя из всего сказанного, можно заключить, что мы имеем дело с кооперативной системой — автосолионами, склонность которой к самоорганизации естественна. Во внешней цепи образца должны, по-видимому,

[¶] E-mail: kamilov@datacom.ru

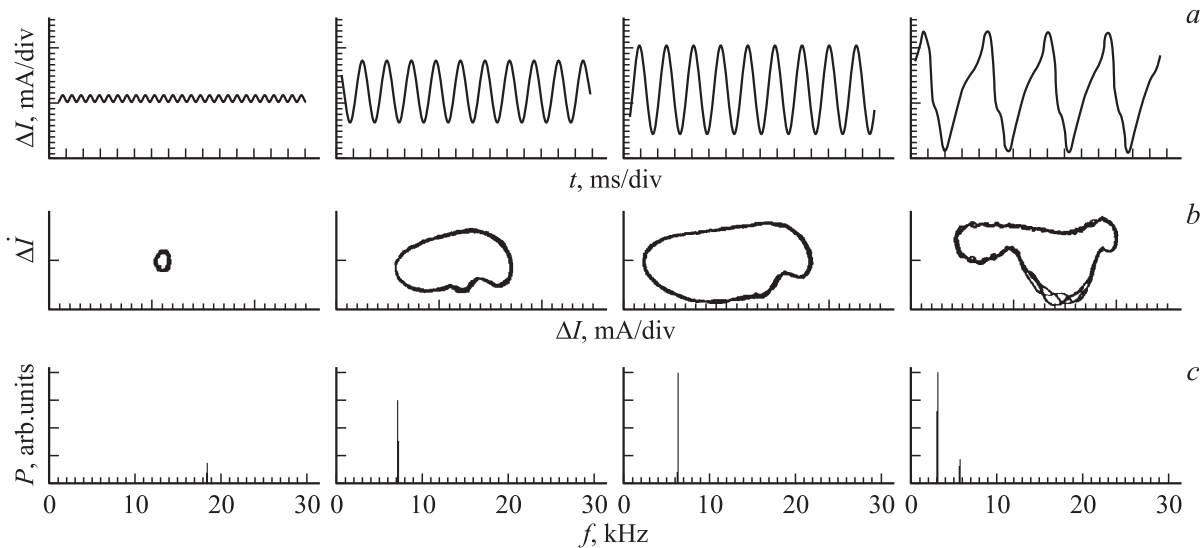


Рис. 1. Осциллограммы колебаний тока (а) в образце InSb-d2, фазовые портреты (b) и спектры мощности (c). $U_a = 48.4\text{--}52.9\text{ В}$.

наблюдаться периодические релаксационные колебания тока, которые с повышением прикладываемого к образцу напряжения становятся хаотическими и далее опять принимают форму регулярных колебаний. Возможны бифуркации через удвоение периода колебаний и другие сложные сценарии развития, отражающие коллективное поведение движущихся АС.

Классическим объектом для экспериментального исследования кооперативного поведения движущихся АС является известный полупроводник InSb. Это полярный, однодолинный полупроводник с небольшой шириной запрещенной зоны $E_g = 0.17\text{ эВ}$; эффективные массы электронов и дырок $m_e^* = 0.013m_0$ и $m_p^* = 0.6m_0$; отношение подвижностей электронов и дырок $b = \mu_e/\mu_p \approx 100$; $\Theta = 264\text{ К}$. Время рассеяния энергии электронов на фононах $\tau_{ef} \propto E^{-1/2}$, а время рассеяния импульса электронов на дырках, как на заряженных центрах, $\tau_p \propto E^{3/2}$ [1,18]. Условие расслоения горячей неравновесной ЭДП $\alpha + s > 0$ [1] для InSb ($\alpha = 3/2$, $s = -1/2$, $\alpha + s = 1 > 0$) выполняется. При температурах выше 150 К образцы InSb приобретают собственную проводимость [18], что позволяет создать неравновесную ЭДП при относительно небольшой выделяемой мощности в условиях джоулевого разогрева. Дальнейшее повышение электрического поля, приложенного к образцу, приводит к разогреву неравновесной ЭДП, что делает возможным образование АС.

Образование АС, как показано в работах [11,12], сопровождалось колебаниями тока, имеющими несколько мод. Частота и амплитуда колебаний изменялись с определенной закономерностью для каждой моды с увеличением приложенного к образцу электрического поля. Дальнейшие исследования позволили обнаружить моды более сложных колебаний тока, указывающие на явные признаки самоорганизации диссипативной структуры (ДС) в InSb.

Цель настоящей работы — исследование динамики развития ДС в InSb с изменением уровня возбуждения, идентификация наблюдаемых колебаний тока с соответствующими АС, кинетика формирования и движения которых описана в работах [13–17], а также выявление закономерностей явлений самоорганизации АС в ДС в InSb. Для исследования использовался ряд образцов кристаллов InSb с концентрацией дырок $p = (2\text{--}4) \cdot 10^{12}\text{ см}^{-3}$, с подвижностью $\mu_p \approx 4000\text{--}7000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при температуре $T = 77\text{ К}$.

В данной работе приведены экспериментальные результаты для образцов:

InSb-d2 ($p = 1.5 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-3}$, $\mu_p = 5200\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) с размерами $l = 6.9\text{ мм}$, $a = 2.2\text{ мм}$, $b = 1.1\text{ мм}$ и сопротивлением $R = 19.2\text{ кОм}$;

InSb-b1-2 ($p = 4 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-3}$, $\mu_p = 7000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) с размерами $l = 4.9\text{ мм}$, $a = 2.2\text{ мм}$, $b = 1.4\text{ мм}$ и сопротивлением $R = 9.16\text{ кОм}$;

InSb-b5-2 ($p = 1.8 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-3}$, $\mu_p = 5060\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) с размерами $l = 6.1\text{ мм}$, $a = 2.3\text{ мм}$, $b = 1.4\text{ мм}$ и сопротивлением $R = 9.16\text{ кОм}$.

Неравновесная ЭДП в образцах создавалась джоулевым разогревом импульсом напряжения электрического поля прямоугольной формы с длительностью 2.5 мс с частотой следования 10 Гц . Созданная ЭДП возбуждалась этим же импульсом напряжения в результате чего возникли продольные АС в виде шнуров тока и поперечные АС в виде слоев сильного электрического поля. Поскольку в InSb ЭДП несимметрична ($m_p^* > m_e^*$), эти слои движутся в электрическом поле от катода к аноду, вызывая колебания тока во внешней цепи образца. Изменение тока в цепи образца регистрировалось осциллографом и посредством аналого-цифрового преобразователя вводилось в память компьютера. Записанная информация подвергалась компьютерной обработке.

На рис. 1 представлены: осциллограммы колебаний тока во внешней цепи образца InSb-d2, обусловленные

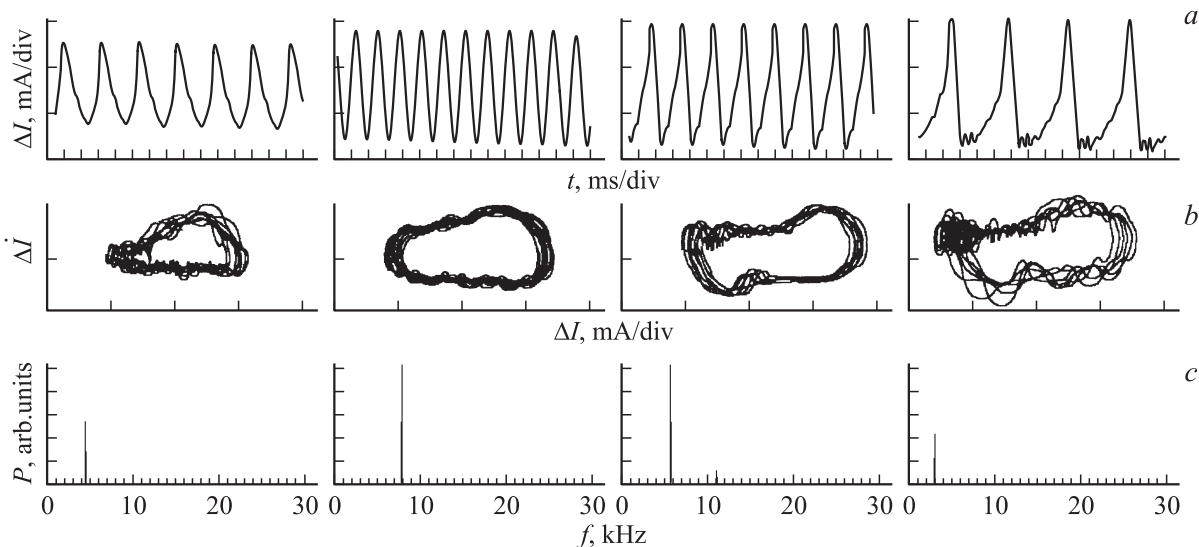


Рис. 2. Осциллограммы колебаний тока (а) в образце InSb-b5-2, фазовые портреты (b) и спектры мощности (с).

движением поперечных АС по образцу; фазовые портреты и спектры мощности при изменении подаваемого на образец напряжения от $U_a = 48.4$ В до $U_a = 52.9$ В.

Экспериментально наблюдаемая кинетика образования АС и его движение по образцу достаточно хорошо согласуется с результатами теоретической работы [13]. Показанную картину регулярных колебаний тока можно представить как последовательность движущихся АС после формирования их на неоднородности и отрыва от нее; при этом $\mathcal{L}_c > L$. Фазовый портрет (аттрактор) представляет собой предельный цикл. Форма фазового портрета указывает на то, что колебания тока являются далеко не гармоническими, а скорее всего релаксационными. Из рис. 1, b видно, что фазовые портреты изменяют свою форму. Это означает, что АС при своем движении с ростом уровня возбуждения испытывают деформацию как на переднем фронте, так и на заднем. Частота колебаний тока понижается, и уже при максимуме напряжения в интервале значений электрического поля для этой моды появляется вторая гармоника. Последние колебания тока, их фазовый портрет и спектр мощности этих колебаний обнаруживают тенденцию АС к делению. Представленная мода колебаний тока обладает определенной закономерностью динамики развития с ростом уровня возбуждения ЭДП, описанной в работе [12], т. е. частота колебаний уменьшается, а амплитуда растет. Эта мода является часто встречающейся во всех экспериментах при исследовании АС в InSb.

Другой часто встречающейся модой колебаний тока с иной закономерностью развития является такая, у которой изменение частоты с ростом возбуждения ЭДП имеет положительный экстремум. На рис. 2 представлены: осциллограммы колебаний тока во внешней цепи образца InSb-b5-2 именно с указанной закономерностью динамики развития с ростом возбуждения ЭДП; фазовые портреты и спектры мощности при изменении

подаваемого на образец напряжения от $U_a = 56.7$ В до $U_a = 58.5$ В.

Из осциллограмм колебаний тока и фазовых портретов видно, что АС заметно деформируются как на переднем фронте, так и на заднем, хотя регулярность колебаний сохраняется. Так же как и для вышеописанной моды, фазовый портрет представляет предельный цикл с изменяющейся конфигурацией с ростом уровня возбуждения ЭДП. В спектрах мощности колебаний присутствует один пик, положение которого относительно частот с ростом возбуждения ЭДП сначала смещается вправо, достигнув максимума частоты ($f \approx 8$ кГц), затем смещается влево до $f \approx 3$ кГц.

При $\mathcal{L}_c \leq L$ возникает взаимодействие между образующимися на неоднородности АС, что может привести к нарушению регулярности последовательности движущихся АС. С повышением уровня возбуждения ЭДП нарушенная регулярность последовательности или случайная последовательность движущихся АС в ЭДП может самоорганизоваться и в регулярную последовательность.

На рис. 3 представлены: осциллограммы колебаний тока во внешней цепи образца InSb-d2; фазовые портреты и спектры мощности при изменении подаваемого на образец напряжения от $U_a = 56.2$ до 60.0 В.

При напряжении электрического поля $U_a = 56.2$ В изменение тока (осциллограмма 1) во внешней цепи образца представляет собой набор релаксационных колебаний. На фазовом портрете присутствует предельный цикл, четыре периода, спектральное распределение мощности состоит из четырех пиков. С повышением напряжения (уровня возбуждения ЭДП) колебания упорядочиваются, число периодов предельного цикла сохраняется, в спектре мощности происходит перераспределение. И уже при напряжении $U_a = 56.8$ В в колебаниях тока появляются бифуркации через удвоение периода (осциллограмма 3). На фазовом портрете остается предельный

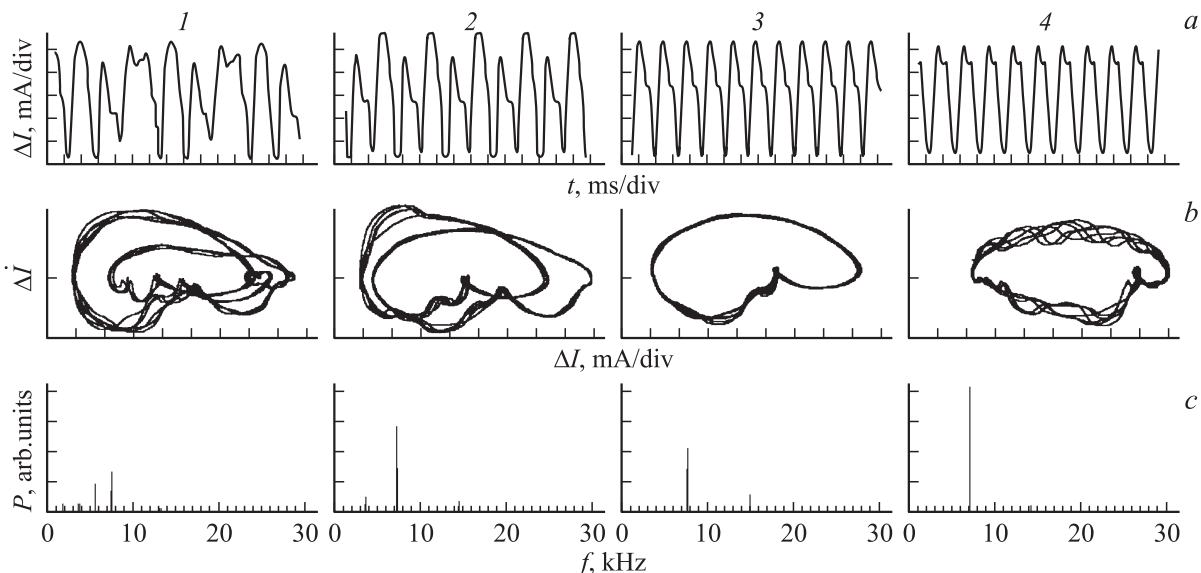


Рис. 3. Осциллограммы колебаний тока (*a*) в образце InSb-*d*2, фазовые портреты (*b*) и спектры мощности (*c*). $U_a = 56.2\text{--}60.0\text{ В}$.

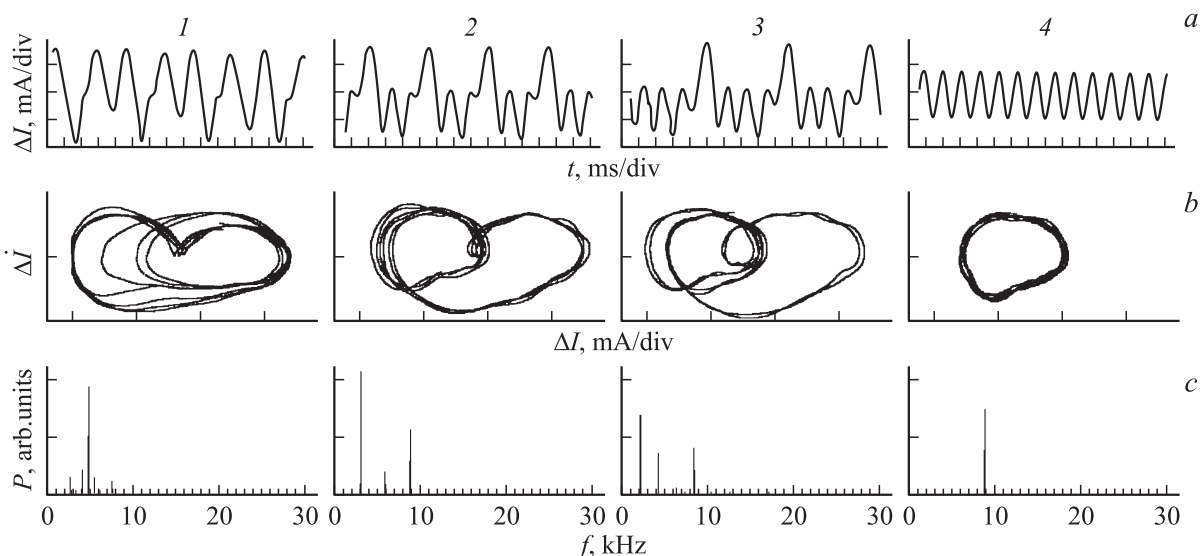


Рис. 4. Осциллограммы колебаний тока (*a*) в образце InSb-*b*1-2, фазовые портреты (*b*) и спектры мощности (*c*).

цикл, два периода, а в спектре мощности два пика. При напряжении $U_a = 59.6\text{ В}$ колебания становятся регулярными, фазовый портрет представляется единственным периодом предельного цикла, спектр мощности состоит из одного пика. С дальнейшим повышением напряжения вершина колебаний тока раздваивается, что может свидетельствовать о локальном пробое, вследствие ударной ионизации в центре АС [14,15].

На рис. 4 представлены: осциллограммы колебаний тока во внешней цепи образца InSb-*b*1-2; фазовые портреты и спектры мощности при изменении подаваемого на образец напряжения от $U_a = 28.4$ до 28.95 В .

При напряжении электрического поля $U_a = 28.4\text{ В}$ колебания тока во внешней цепи отображают нерегулярную последовательность движущихся АС (осцилло-

грамма 1 на рис. 4), имеющих тенденцию к делению. Фазовый портрет содержит предельный цикл, два периода, в спектре мощности превагирует один пик. При напряжении $U_a = 28.5\text{ В}$ (осциллограмма 2) регулярность колебаний усиливается, усиливается также тенденция АС к делению. На следующей осциллограмме 3 видно появление трех периодов колебаний тока, что отражено и на фазовом портрете и спектре мощности колебаний. Можно сказать, что происходит последовательное деление АС. При напряжениях $U_a = 28.9\text{ В}$ происходит деление всех АС, составляющих первоначальную последовательность. Колебания тока становятся регулярными, фазовый портрет состоит из одного периода предельного цикла, в спектре мощности колебаний присутствует один пик.

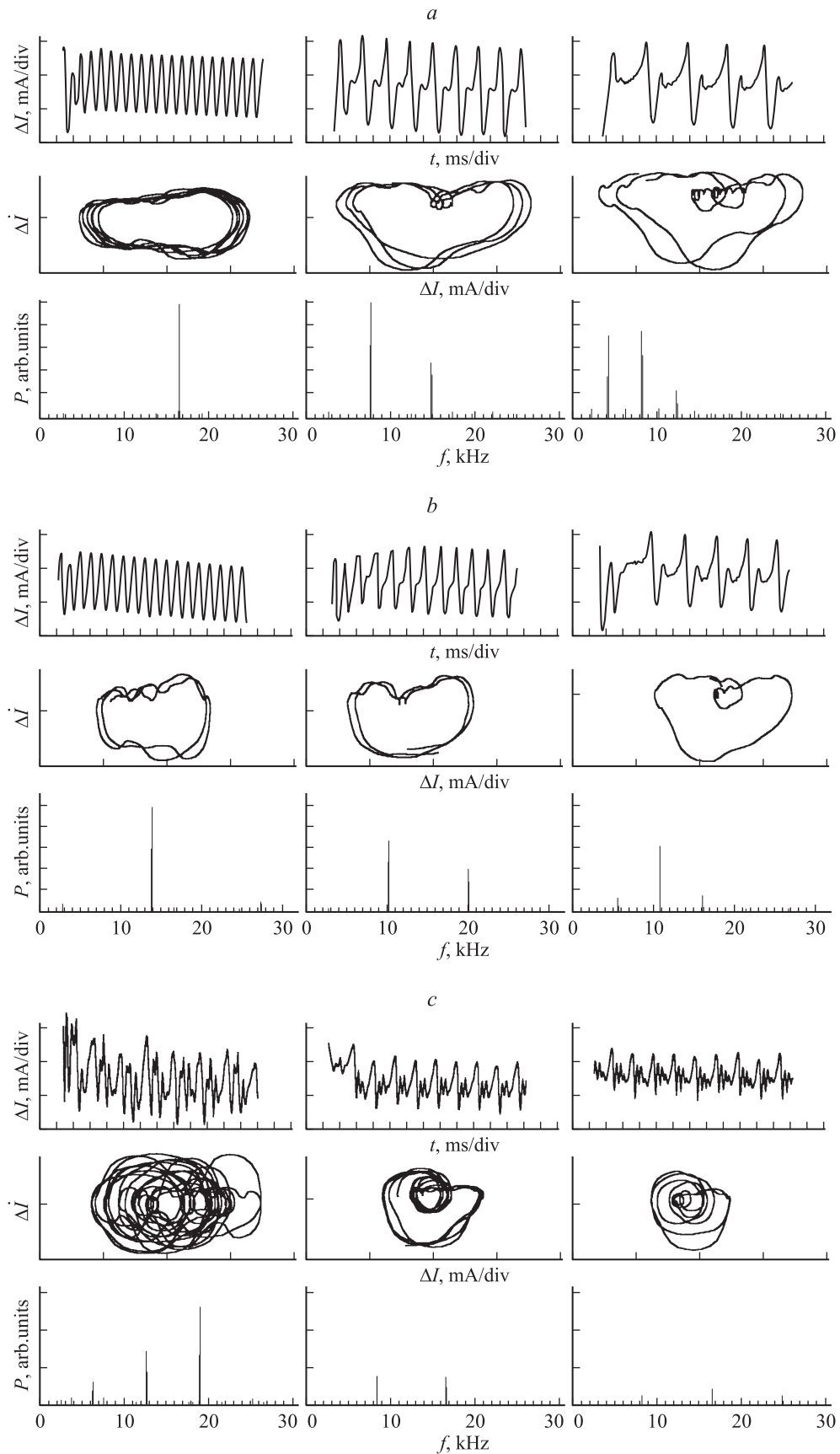


Рис. 5. *a* — осциллограммы колебаний тока во внешней цепи образца InSb-b5-2, фазовые портреты и спектры мощности этих колебаний в отсутствие магнитного поля; *b, c* — осциллограммы колебаний тока, фазовые портреты и спектры мощности этих колебаний в магнитном поле в диапазонах 0–629 А/м и $(3.6–13.1) \cdot 10^3$ А/м соответственно.

Деление АС может быть вызвано разными обстоятельствами. Как уже отмечалось [14], в InSb легко осуществима ударная ионизация. Поперечные АС представляют собой области пониженной концентрации носителей, а в электрическом поле и повышенной напряженности электрического поля. Условия для реализации ударной ионизации в локальной области АС более чем достаточны. При достижении электрическим полем в АС величины, достаточной для ударной ионизации, в центре него может произойти локальный пробой [14,15], т.е. лавинообразное увеличение концентрации носителей в центре АС, что приведет к расширению АС. С дальнейшим повышением прикладываемого к образцу напряжения, т.е. с повышением уровня возбуждения ЭДП, широкому АС легче разделиться, чем восстановиться. АС делятся не каждый в отдельности, а как составляющие некую коллективную систему взаимодействующих АС, для которых присуще свойство самоорганизации. Другим обстоятельством, вызывающим деление АС, является его пульсация при увеличении уровня разогрева ЭДП, о чем уже упоминалось.

Было проведено исследование поведения коллектива взаимодействующих АС в ДС при воздействии внешнего продольного магнитного поля H до $13.6 \cdot 10^3$ А/м (образец InSb-b5-2). В результате обнаружено, что влияние магнитного поля в пределах 0–629 А/м на поведение АС при $U_a = U_1 = \text{const} = 35.93$ В аналогично влиянию электрического поля в пределах $U_a = 35.93$ –39.16 В при $H = 0$. На рис. 5, *a* представлены осциллограммы, иллюстрирующие динамику изменения колебаний тока во внешней цепи, обусловленные движущимися по образцу АС, с ростом электрического поля. На рис. 5, *b* представлены осциллограммы, иллюстрирующие динамику изменения колебаний тока, полученные при $U_1 = \text{const}$ под воздействием внешнего магнитного поля от 0 до 629 А/м. Из рис. 5, *a, b* видно, что временная реализация неустойчивостей, их фазовые портреты и спектры мощности идентичны. С дальнейшим ростом электрического поля (при $H = 0$) колебания исчезают. Однако при продолжающемся увеличении магнитного поля (при $U_1 = \text{const}$) вновь появляются неустойчивости тока, свидетельствующие об определенной самоорганизации движущихся АС (рис. 5, *c*). Видно, что в интервале значений магнитного поля $(3.6$ – $13.1) \cdot 10^3$ А/м колебания тока в цепи образца претерпевают эволюцию от регулярных колебаний через стохастические к другим регулярным колебаниям, включая стадию бифуркации посредством удвоения периода.

Влияние внешнего продольного магнитного поля на поведение как отдельных АС, так и их коллектива определяется решающим вкладом термомагнитных эффектов [19,20]. Продольное магнитное поле из-за большого градиента температуры ($\sim 10^5$ град/см) в локализованной области — продольного АС — вследствие эффекта Нернста–Эттингсгаузена создает весомую поперечную разность потенциалов, знак которой зависит от направления магнитного поля. Под действием этой разности

потенциалов движущиеся по образцу поперечные АС смещаются в холодную или в горячую область ЭДП, имеющей радиальный градиент температуры. В результате, изменения частоты и амплитуды колебаний тока, обусловленные движущимися по образцу АС, будут различными в зависимости от направления приложенного магнитного поля. Повышение напряженности электрического поля (при $H = 0$) разогревает ЭДП, что является одной из причин изменения частоты колебаний во внешней цепи образца [12]. Аналогичное поведение частоты и амплитуды этих колебаний наблюдается также с ростом до небольших значений внешнего продольного магнитного поля одного из направления при $U_1 = \text{const}$. Поскольку внешнее магнитное поле не сказывается на энергетическом состоянии ЭДП, характер изменения параметров колебаний тока при более высоких значениях внешнего магнитного поля существенно отличается от характера изменения этих параметров с повышением напряженности электрического поля (при $H = 0$). Это различие обуславливает и соответствующее поведение коллектива взаимодействующих АС, возбужденных в ЭДП.

Исследования поведения других мод колебаний тока во внешней цепи образца, обусловленных движущимися по образцу АС, во внешнем продольном магнитном поле с напряженностью до $13.6 \cdot 10^3$ А/м также обнаруживают синергетическое поведение АС в ДС в InSb.

Итак, экспериментально показано, что кинетика образования и динамика развития АС в ЭДП соответствует представлениям, описанным в теоретических работах. Поведение АС можно рассматривать не как поведение отдельных объектов, а как поведение коллектива взаимодействующих АС в ДС. В результате исследований обнаружен переход от стохастических колебаний к регулярным, от регулярных колебаний к иным регулярным колебаниям, проходя стадию бифуркации через удвоение периода с ростом уровня возбуждения ЭДП. Показано также, что полное деление стохастических АС происходит через последовательное деление этих АС. Во внешней цепи образца данная эволюция проявляется появлением двух, трех и четырех периодов колебаний тока.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что система, состоящая из коллектива взаимодействующих АС, обладает свойством самоорганизации.

Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку работы (грант №-01-02-16195).

Список литературы

- [1] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **71**, 1542 (1976).
- [2] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. Письма ЖЭТФ, **41**, 386 (1985).
- [3] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. Письма ЖЭТФ, **18**, 122 (1973).
- [4] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТП, **13**, 891 (1979).
- [5] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **21**, 2342 (1979).
- [6] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТП, **13**, 721 (1979).
- [7] А.Л. Дубицкий, Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **28**, 1290 (1986).

- [8] Б.С. Кернер, В.Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, **36**, 359 (1982).
- [9] Б.С. Кернер, В.В. Осипов, М.Т. Романенко, В.Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, **44**, 77 (1986).
- [10] М.Н. Винославский. ФТТ, **31**, 315 (1989).
- [11] А.А. Степуренко. ФТП, **28**, 402 (1994).
- [12] I.K. Kamilov, A.A. Stepurenko. Phys. St. Sol. (b), **194**, 643 (1996).
- [13] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, И.В. Тысюк. ФТТ, **31**, 46 (1989).
- [14] А.Л. Дубицкий, Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТП, **20**, 1195 (1986).
- [15] А.Л. Дубицкий, Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **28**, 1290 (1986).
- [16] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, А.Г. Южанин. ФТП, **22**, 2051 (1989).
- [17] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, Т.М. Щербаченко. ФТП, **25**, 1696 (1991).
- [18] C. Hilsun, A.C. Rose-Innes. *Semiconducting III-V compounds* (Pergamon Press, Oxford-London-N.Y.-Paris, 1961) p. 323.
- [19] I.K. Kamilov, A.A. Stepurenko, A.S. Kovalev. J. Phys.: Condens. Matter, **10**, 9477 (1998).
- [20] И.К. Камиллов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев. ФТП, **34**, 433 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

Phenomena of collective behaviour of autosolitons in InSb dissipative structure

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

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

Abstract It is shown, that the behaviour of autosolitons can be regarded as that of an ensemble of interreacting individual localized states in the electron-hole plasma. As a result of the investigation found were transitions from chaotic oscillations of the current in an external circuit of the sample (that were caused by travelling autosolitons) to regular oscillations: then from regular ones to other regular oscillations through a bifurcation by means of doubling the period due to the increase of the excitation level of electron-hole plasma. The authors conclusion is that the ensemble of collective interreacting autosolitons possesses self-organizing ability. It is shown, that autosolitons travelling over the sample in an external longitudinal magnetic field up to 13.6×10^3 A/m are also characterized by synergetic behaviour in an InSb dissipative structure.