

АВТОСОЛИТОНЫ В РАЗОГРЕТОЙ И ВОЗБУЖДЕННОЙ ИМПУЛЬСОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЕ АНТИМОНИДА ИНДИЯ

© А.А.Степуренко

Институт физики им. Х.И.Амирханова Российской академии наук,
367003 Махачкала, Россия
(Получена 18 января 1995 г. Принята к печати 6 марта 1995 г.)

Экспериментально показано, что в антимониде индия можно возбудить импульсами сильного электрического поля автосолитоны как в виде слоев тока, так и страт электрического поля. Обнаружено несколько мод колебаний во внешней цепи образца, обусловленных движущимися автосолитонами в электрическом поле. Для каждой моды характерен свой интервал напряжения. Частота колебаний уменьшается, а амплитуда растет у одних мод с увеличением напряжения, у других — частота колебаний плавно растет, а изменение амплитуды имеет положительный экстремум.

В работах [1-4] теоретически предсказано, что в неравновесной электронно-дырочной плазме (ЭДП) дополнительным внешним возмущением можно создать локализованные области относительно низкой концентрации и повышенной температуры носителей заряда — автосолитоны (АС). Во внешнем электрическом поле эти АС могут проявляться как слои тока, направленные вдоль приложенного электрического поля [5,6], или в виде перпендикулярных линиям тока слоев сильного электрического поля [7-9], которые в несимметричной плазме движутся вдоль линий электрического поля.

К настоящему времени экспериментально обнаружено и изучено расслоение разогретой электрическим полем ЭДП, возникающей в условиях ударной ионизации или инжекции в n -GaAs [10-11], а также за счет фотогенерации в n -Ge [12]. В работе [13] показано, что в ЭДП, полученной джоулевым разогревом в InSb, могут появляться АС как в виде слоев тока, так и в виде движущихся слоев сильного электрического поля. Колебания тока во внешней цепи, обусловленные движением доменов по образцу, менялись при изменении приложенного напряжения, однако какие-либо закономерности изменения частоты и амплитуды колебаний не были установлены.

Исследования на постоянном электрическом токе неравновесной ЭДП в образцах InSb [13] не позволяют определить степень термодинамического равновесия между ЭДП и решеткой. В данной работе для

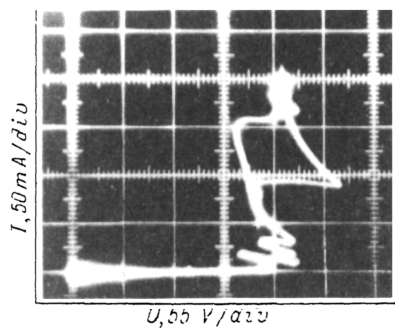


Рис. 1. Динамическая ВАХ образца антимионида индия.

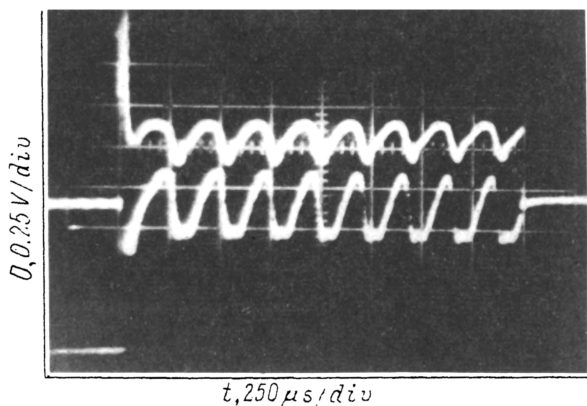


Рис. 2. Осциллограммы изменения разности потенциалов электрического поля во времени ΔU_{t_1} и ΔU_{t_2} двух соседних пар зондов образца.

этого используется метод импульсного воздействия электрическим полем на образец.

Идея работы основана на том, что тепловые процессы намного инерционнее электрических, поэтому, подавая на образец импульсы напряжения соответствующей длительности и частоты, можно добиться того, чтобы джоулев разогрев образца, приводящий к термогенерированию ЭДП, и ее термодинамическая неравновесность относительно решетки, приобретаемая в сильном электрическом поле, были разделены во времени.

В данной работе исследовались монокристаллические образцы InSb , имеющего при $T = 77 \text{ K}$ концентрацию носителей $p = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и подвижность $\mu = 4000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Измерения проводились на образцах различной длины l и поперечных размеров S , помещенных в жидкий азот. На образец подавались импульсы напряжения прямоугольной или треугольной формы длительностью до 2 мс, с частотой следования порядка 10 Гц. При значениях напряжения, когда вольт-амперная характеристика (ВАХ) образца оставалась линейной, осуществлялись измерения в режиме генератора напряжения ($R_{\text{samp}} \gg R_l$, где R_{samp} — сопротивление образца, R_l — сопротивление нагрузки). В нелинейной области ВАХ, когда проводимость образца сильно возрастала, реализовался уже режим генератора тока ($R_{\text{samp}} < R_l$).

На рис. 1 представлена осциллограмма динамической вольт-амперной характеристики (ВАХ), полученная в условиях, когда к образцу InSb ($0.51 \times 0.19 \times 0.13 \text{ см}^3$) подавались импульсы напряжения треугольной формы длительностью 1 мс. При напряжении $U = U_c = 20 \text{ В}$ на ВАХ появляется скачок тока, как результат образования ЭДП за счет джоулева разогрева образца. Этот ток сохраняется с ростом напряжения до некоторого значения, затем снова появляется скачок. После нескольких скачков тока ВАХ переходит к S -образной форме. Скачки тока и его слабое изменение в некоторых пределах напряжения скорее всего связаны с образованием и существованием АС, в данном случае в виде слоя или слоев тока, направленных вдоль приложенного электрического поля.

При приложении к образцу прямоугольного импульса напряжения определенного значения ($U = U_c = 20$ В) на токовом импульсе также появляется скачок тока, свидетельствующий о возникновении неравновесной ЭДП. При значении напряжения $U > U_c$ во внешней цепи появляются колебания тока релаксационного характера.

С помощью зондов с шагом $\Delta l = 0.08$ см проводились исследования временного изменения потенциала электрического поля ΔU_t на различных участках образца InSb при подаче импульса напряжения прямоугольной формы с амплитудой выше порогового значения U_c появления автоколебаний. На рис. 2 представлены осциллограммы изменения во времени разности потенциалов электрического поля ΔU_{t_1} и ΔU_{t_2} , полученных с двух соседних пар зондов. Верхние колебания на осциллограмме получены при измерении разности потенциалов второй пары зондов. Видно отставание этих колебаний по фазе относительно колебаний, полученных при измерении на первой паре зондов (нижние колебания). Это позволяет определить скорость распространения по образцу области сильного электрического поля (домена), а значит, скорость движения области пониженной концентрации носителей заряда, т.е. АС. Эксперимент показывает, что скорость движения АС $v_{AS} = 27$ м/с.

Образование АС в виде слоев тока и появление движущихся АС в неравновесной ЭДП означает ее преобразование в диссипативную структуру (ДС).

В процессе эксперимента было обнаружено, что в этой ДС одни наблюдаемые колебания с изменением напряжения сменяются другими, т.е. происходит перестройка мод, сопровождающаяся, как правило, скачком тока на импульсе. Для каждой моды имеется свой интервал значений напряжения. В этом интервале амплитуда и частота колебаний определенной моды меняются с изменением величины импульса напряжения.

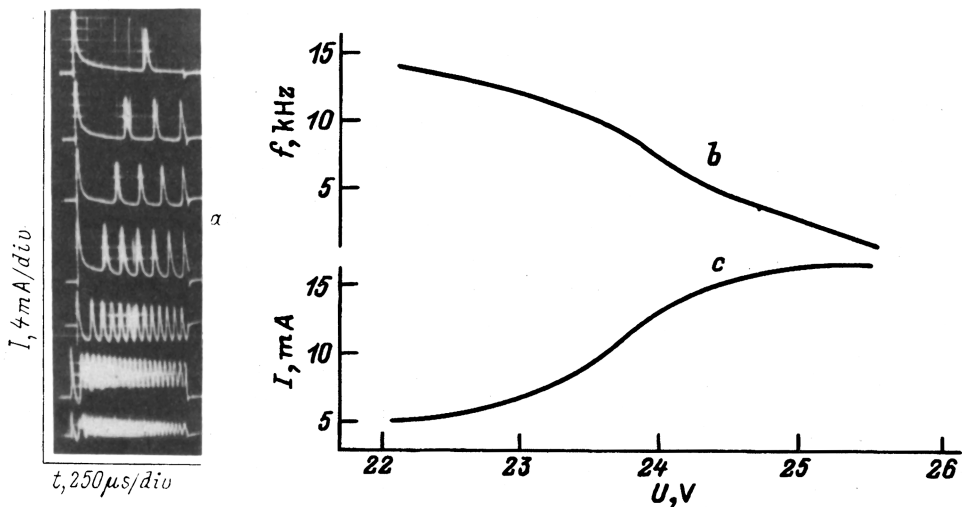


Рис. 3. Осциллограммы колебаний тока во внешней цепи образца антимида индия, мода I (a); b, c — зависимости частоты f и амплитуды колебаний тока I от напряжения U .

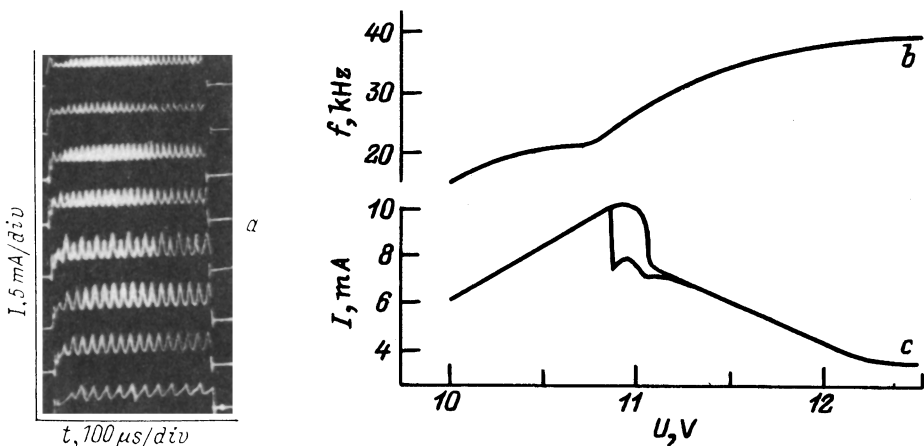


Рис. 4. Осциллограммы колебаний тока во внешней цепи образца антимионида индия, мода II (а); *b*, *c* — зависимости частоты f и амплитуды колебаний тока I от напряжения U .

На рис. 3, *a* представлены осциллограммы колебаний тока, мода I, при изменении напряжения в интервале значений $\Delta U = 4$ В. Видно, что с ростом напряжения амплитуда колебаний увеличивается, а частота уменьшается. На рис. 3, *b*, *c* представлены графики электрополовой зависимости частоты и амплитуды колебаний соответственно.

Однако наблюдаются также моды, у которых амплитуда и частота меняются уже иным образом с изменением импульса напряжения. На рис. 4, *a-c* представлены осциллограммы колебаний тока во внешней цепи образца InSb ($0.69 \times 0.21 \times 0.13$ см³), мода II, и зависимости частоты и амплитуды колебаний тока при изменении напряжения в интервале $\Delta U = 2.5$ В. У этой моды частота плавно увеличивается с ростом напряжения. При напряжении $U = 10.8$ В (рис. 4, *c*) эта мода претерпевает бифуркацию удвоения периода (см. осциллограмму на рис. 4, *a*). С дальнейшим ростом напряжения происходит переход от удвоения периода к регулярным колебаниям. Амплитуда колебаний этой моды сначала плавно растет с увеличением напряжения, а после бифуркации удвоения периода происходит ее уменьшение.

Экспериментально было установлено, что для каждой моды колебаний характерен гистерезис напряжений возникновения U_1 - и исчезновения U_2 -колебаний ($U_2 < U_1$), что было теоретически предсказано в работе [7].

Наблюдаемые явления, т.е. возникновение АС как в виде продольных шнуров тока, так и страт электрического поля, расположенных поперек напряжения тока, можно объяснить, как и в [13], на основе теории расслоения неравновесной ЭДП, развитой в работах [1-10].

Измерения температурной зависимости электропроводности исследуемых образцов InSb показали (рис. 5), что собственная концентрация носителей заряда может быть достаточно высокой уже при относительно низкой температуре $T \approx 150$ К. Подавая на образец, помещенный в жидкий азот, импульсы напряжения определенной длительности, амплитуды и частоты следования, можно, благодаря джоулеву разогреву, легко создать квазинейтральную ($n \approx p$) плотную ЭДП с такой концентрацией электронов и дырок, когда заметным становится процесс

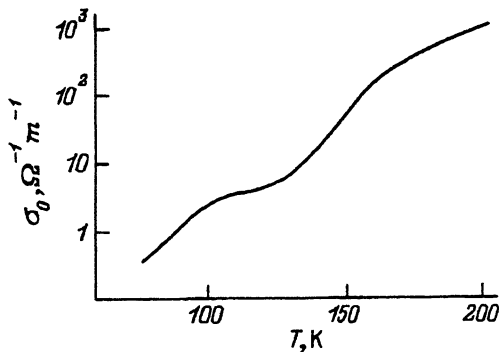


Рис. 5. Температурная зависимость проводимости образца антимионида индия.

межэлектронных столкновений. При этом подвижность электронов зависит от их концентрации n_e , время межэлектронных столкновений τ_{ee} оказывается много меньше характерных времен релаксации импульса τ_p и времени энергетической релаксации носителей на фононах τ_{eph} . В такой ЭДП, более сильно разогретой по отношению к решетке импульсом того же электрического поля, должно происходить расслоение на шнуры тока [6].

Вследствие поперечного градиента температуры, а следовательно, и плотности плазмы, реально предположить наличие в образце областей с неплотной плазмой, для которой выполняемо условие $\tau_p \ll \tau_{ee} \ll \tau_{eph}$, приводящее к тому, что неравновесная ЭДП разбивается на страты электрического поля (домены), поперечные линиям тока [7]. Эти страты в несимметричной ЭДП монокристалла InSb за счет соотношения между массами дырок и электронов $m_n^* \gg m_e$ должны двигаться (и движутся) в электрическом поле вдоль линий тока в сторону движения горячих электронов, т.е. от катода к аноду. Периодические разрушения АС у соответствующего электрода вызывают скачки тока, обуславливая колебания во внешней цепи образца. С увеличением прикладываемого к образцу напряжения диссипативная структура (ДС) греется, и при некотором значении напряжения ДС переходит в другое состояние (ток скачком изменяется). При этом поперечный градиент температуры изменяется, приводя к перераспределению областей с плотной и неплотной плазмой, возможно, уже с другими параметрами (температура, концентрация и подвижность носителей заряда). В результате могут появиться новые движущиеся АС, а значит, и другая мода колебаний во внешней цепи образца.

Если с увеличением прикладываемого к образцу напряжения в небольшом интервале значений некая область с неплотной плазмой, где формируются движущиеся АС, слабо греется и подвижность носителей заряда при этом меняется незначительно, то скорость $v_{АС}$ движения АС будет определяться электрическим полем согласно [7]. Нарастание скорости движения АС в свою очередь означает соответственно плавное увеличение частоты колебаний во внешней цепи образца (рис. 3, а, б). Возможно также, что в какой-то области образца с неплотной плазмой температура с увеличением напряжения будет возрастать настолько, что станет заметным снижение подвижности носителей заряда. Соответственно скорость движения АС, образованных в этой области, будет замедляться, что обусловит плавное уменьшение частоты колебаний во внешней цепи образца (рис. 2, а, б).

Итак, экспериментально показано, что АС как в виде слоев тока, так и в виде страт электрического поля можно возбудить в InSb импульсами электрического поля. Импульсный метод исследований позволил обнаружить несколько мод колебаний во внешней цепи образца, обусловленных движущимися АС в электрическом поле. Для каждой моды характерен свой интервал напряжений в пределах единиц вольт. Выявлены два основных типа мод колебаний. Частота колебаний уменьшается, а амплитуда растет у одних мод с увеличением напряжения, у других — частота колебаний плавно растет, а изменение амплитуды имеет положительный экстремум.

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, 13, 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] М.Н. Винославский. ФТТ, 31, 315 (1989).
- [13] А.А. Степуренко. ФТП, 28, 402 (1994).

Редактор Т.А. Полянская

Autosolitons in a heated and excited by an electric field pulse electron-hole plasma of indium antimonide

A.A. Stepurenko

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

It has been shown experimentally that autosolitons can be excited in indium antimonide by pulses of a strong electric field in the form of either current layers or electric field strata. Several oscillation modes generated by solitons moving in the electric field were found in the sample external circuit. Each mode is characterized with its own voltage range. For the first type of modes, frequency of oscillations reduced and the amplitude increased with the voltage rise, while for the other one the frequency increased smoothly and the amplitude curve displayed a positive extremum.