

Распределение носителей заряда в диссипативной структуре в полупроводниках

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

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

(Получена 8 мая 2001 г. Принята к печати 12 июля 2001 г.)

Экспериментально показано, что в объеме монокристаллов Te и InSe при формировании и возбуждении сильным электрическим полем диссипативной структуры в неравновесной электронно-дырочной плазме происходит перераспределение концентрации носителей заряда. При этом, когда в диссипативной структуре реализованы только продольные автосолитоны, концентрация носителей вне автосолитонов понижается, а в случае присутствия поперечных автосолитонов концентрация носителей заряда вне автосолитонов повышается. Предлагается объяснение эффектов: продольные автосолитоны, формирующиеся в созданной джоулевым разогревом неравновесной электронно-дырочной плазме, являются холодными, а поперечные автосолитоны — горячими.

Теоретически исследовано [1–7] и экспериментально показано, что в неравновесной возбужденной электронно-дырочной плазме (ЭДП), созданной ударной ионизацией или инъекцией в *n*-GaAs [8,9], либо за счет фотогенерации в *n*-Ge [10], а также джоулевым разогревом в InSb [11,12], появляются локализованные области экстремальной концентрации и температуры носителей заряда — автосолитоны (АС) — как в виде слоев тока, так и в виде движущихся слоев сильного электрического поля.

В работе [13] рассмотрены и описаны горячие и холодные АС — локализованные области высокой температуры и низкой концентрации носителей заряда и локализованные области низкой температуры и повышенной концентрации носителей соответственно. Эти АС составляют незначительную локализованную часть объема образца порядка $[(LI)^{1/2}/2]^3$, где L — биполярная диффузионная длина, l — длина остывания горячих электронов. Концентрация, температура локализованных областей, их топология достаточно полно описаны в работах [1–7,13]. Процессы и закономерности этих процессов, происходящих в остальной части объема образца, взаимодействующей с АС, недостаточно отражены в теоретических и экспериментальных работах.

Была поставлена задача выяснить, как отражается образование и эволюция локализованных состояний ЭДП — автосолитонов — на распределении концентрации и подвижности носителей заряда в объеме образца, а также, каким является продольный АС, сформировавшийся в ЭДП, полученной джоулевым разогревом. Для этой цели были исследованы образцы InSb различных размеров, имеющие при $T = 77$ К концентрацию носителей заряда $p = (2–4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ с подвижностью $\mu \approx 4000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и образцы Te, имеющие при $T = 77$ К концентрацию носителей $p = 1.45 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ с подвижностью $\mu \approx 2400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Токовводами служили припаянные индием или приваренные медные проводочки. Образец InSb делился на две области (рис. 1, а) —

активатор (А) и детектор (D). В активаторе возбуждались АС тем же способом, как это делалось в [11,12]; на детектор подавалась напряжение, достаточное для регистрации изменения омической проводимости. Если происходили какие-либо изменения концентрации носителей в активаторе, то это прямым образом отражалось на проводимости детектора.

Другим способом исследования диссипативной структуры в образцах может быть акустическое зондирование. Известно [14–19], что для Te характерен сильно выраженный акустоэлектрический эффект, заключающийся в том, что в сильном электрическом поле, когда скорость дрейфа носителей v_d становится больше фазовой скорости звука v_s , в кристалле происходит генерация фононов, взаимодействующих с носителями заряда. В работе [16] экспериментально показано, что степень акустоэлектронного взаимодействия в теллуре линейно

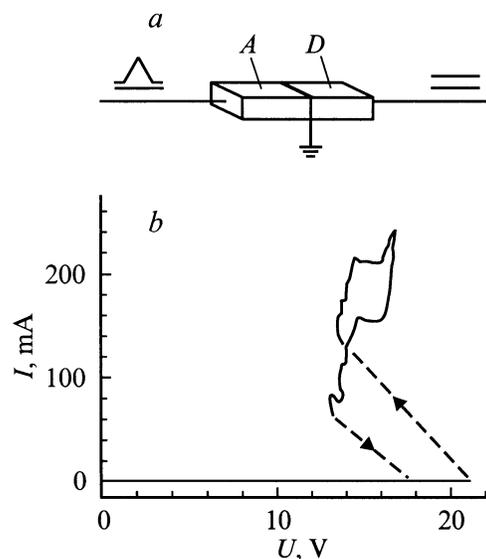


Рис. 1. а — схема деления на активатор (А) и детектор (D), а также схема включения образца InSb в измерительную цепь. б — вольт-амперная характеристика активатора.

[¶] E-mail: kamilov@datacom.ru

зависит от концентрации носителей заряда n

$$\gamma = Cn, \quad (1)$$

где

$$C = \frac{K^2 e^3 v_s^3 \beta}{2 \varepsilon k^2 T^2 \omega^2 \mu},$$

K — коэффициент электромеханической связи, $\beta = 1 - v_d/v_s$ — параметр дрейфа, ε — диэлектрическая проницаемость среды, ω — круговая частота генерируемых звуковых волн, μ — подвижность носителей заряда.

Результаты исследования образцов InSb представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1, *b* приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) активатора при подаче на него пилообразного напряжения до формирования и возбуждения АС. Все участки ВАХ, кроме участков, отмеченных на рисунке стрелками, воспроизводимы и устойчивы во времени. Соответствующая этой ВАХ временная реализация тока в активаторе I_A и изменение проводимости детектора $\sigma_D \propto I_D$ приведены на рис. 2, *a, b* соответственно. Увеличение проводимости детектора на участке АВ рис. 2, *b* происходит из-за увеличения концентрации носителей в активаторе в результате джоулева разогрева. Дальнейший разогрев приводит к появлению собственной проводимости в активаторе, что сопровождается резким увеличением концентрации неравновесных носителей заряда (рис. 2, *a*, участок ВС), которые, диффундируя в область детектора, также резко увеличивают его проводимость (рис. 2, *b*, участок ВС).

Наличие участка ВС свидетельствует о том, что в активаторе создается ЭДП, которая с дальнейшим ростом напряжения преобразуется в диссипативную структуру (ДС), т.е. ЭДП расслаивается на локализованные области экстремальной температуры и концентрации носителей в виде шнуров тока и страт электрического поля [1–7]. Из рис. 2, *a* (участок CD) видно, что сформировался электрический шнур тока (продольный АС), величина которого контролируется внешним приложенным к образцу напряжением. Если в объеме образца формируются и существуют локализованные области пониженной или повышенной концентрации носителей, то в остальном объеме образца концентрация носителей должна соответственно повыситься или понизиться, что приведет к тому, что проводимость детектора возрастет или упадет. Эксперимент в данном случае показывает, что проводимость детектора ступенчато падает (рис. 2, *b*, участок CD), в то время как ток в активаторе растет (рис. 2, *a*, участок CD). Это означает, что концентрация носителей в объеме активатора с формированием и возбуждением ДС понижается, что говорит о том, что локализованные области обогащаются носителями заряда, температура которых понижается относительно остальной части объема образца [13]. Ступенчатое падение проводимости детектора отражает тот факт, что с увеличением прикладываемого напряжения, т.е. с повышением уровня возбуждения ДС, формируются дополнительные продольные АС, как правило, скачком,

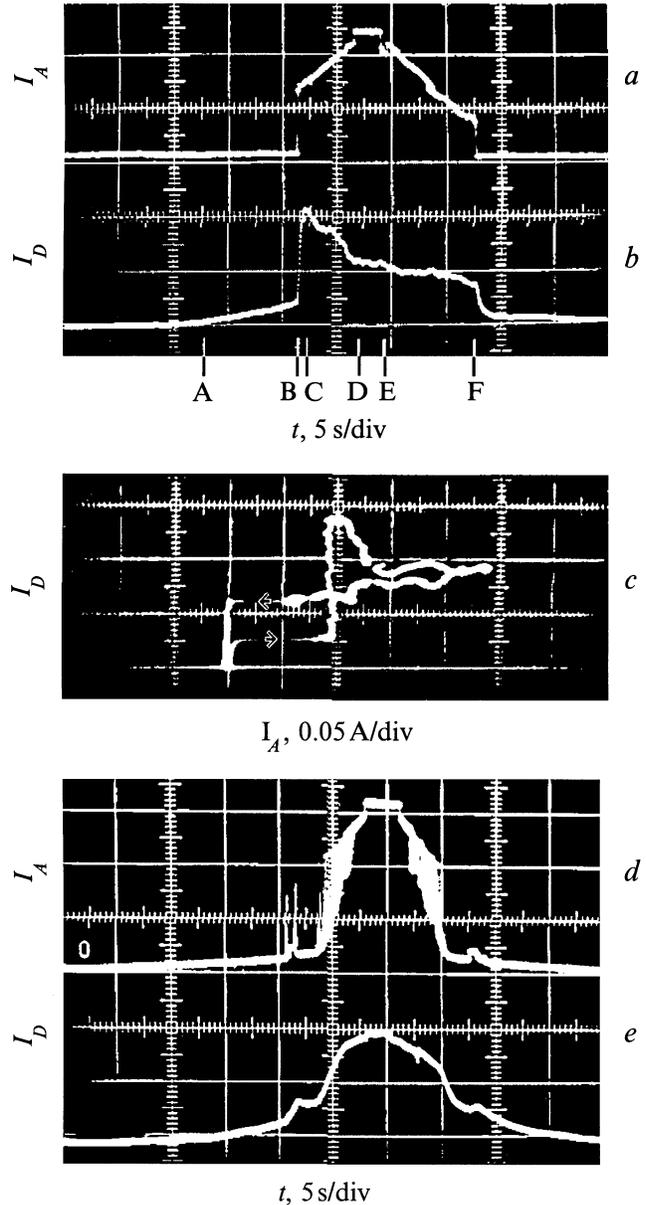


Рис. 2. *a, b* — осциллограммы временной реализации тока в активаторе (*a*) и проводимости детектора (*b*) при возбуждении продольных автосолитонов в активаторе. Единицы измерения: I_A — 0.1 А/дел, I_D — $2 \cdot 10^{-4}$ А/дел. *c* — зависимость проводимости детектора от тока в активаторе. Единицы измерения: I_D — $1.5 \cdot 10^{-4}$ А/дел. *d, e* — осциллограммы временной реализации тока в активаторе (*d*) и проводимости детектора (*e*) при возбуждении поперечных автосолитонов в активаторе. Единицы измерения токов I_A и I_D — те же, что и на осциллограммах *a, b*.

в результате чего концентрация носителей в объеме активатора также скачком понижается.

На рис. 2, *c* приведена характеристика зависимости проводимости детектора $\sigma_D \propto I_D$ от тока в активаторе I_A . Видно, что при росте тока в активаторе проводимость детектора, следовательно, и концентрация в активаторе

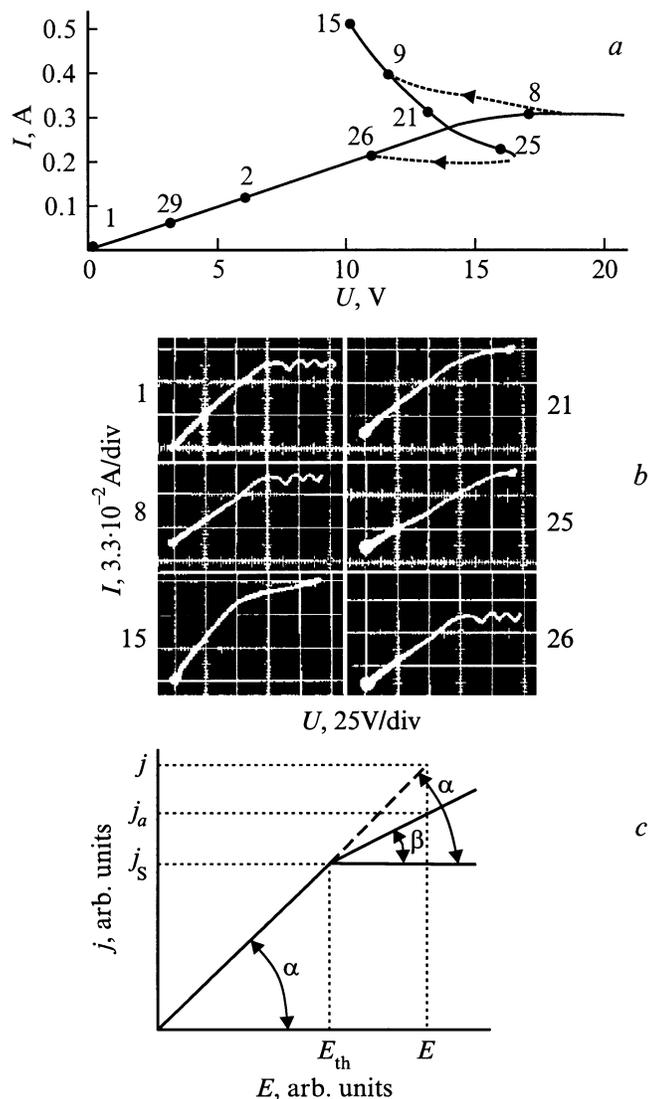


Рис. 3. *a* — квазистационарная вольт-амперная характеристика образца теллура. *b* — осциллограммы динамических вольт-амперных характеристик образца Те. *c* — типичная вольт-амперная характеристика Те в условиях акустоэлектронного взаимодействия. Цифры около осциллограмм на рис. *b* соответствуют цифрам, отмечающим точки на рис. *a*.

существенно понижаются. Скачок проводимости детектора не совпадает с началом скачка тока в активаторе из-за запаздывания процесса изменения проводимости детектора относительно генерации ЭДП в активаторе. Таким образом, при росте тока шнура в активаторе концентрация в остальной части активатора понижается.

На рис. 2, *d, e* представлены осциллограммы временной реализации тока в активаторе и проводимости детектора при напряжениях, когда в активаторе возбуждаются движущиеся по образцу страты электрического поля — АС, а во внешней цепи — колебания тока. Видно, что при наличии в активаторе движущихся АС в детекторе отсутствует понижение проводимости. Более того, проводимость детектора повышается, что

означает возрастание концентрации носителей заряда в активаторе. Поскольку при наличии осциллирующего тока во внешней цепи активатора в детекторе колебательное изменение проводимости отсутствует, можно утверждать, что осцилляции тока во внешней цепи активатора определяются не изменением проводимости шнура тока, а движущимися вне этого шнура стратами электрического поля.

Результаты исследования образцов Те представлены на рис. 3 и 4.

В работе [20] описана схема электрических измерений образцов Те. Приложением к образцу квазистационарного напряжения возбуждались и поддерживались продольные АС. На рис. 3, *a* представлена хорошо воспроизводимая квазистационарная ВАХ, полученная при изменении напряжения электрического поля как в прямом, так и в обратном направлениях. Штриховыми линиями показаны неустойчивые во времени участки. Приложением к образцу импульсов треугольной формы сильного электрического поля получали динамические ВАХ, имеющие нелинейный участок, обусловленный акустоэлектрическим эффектом. Так как каждая точка ВАХ при квазистационарном токе образца (рис. 3, *a*) фиксируема, то динамические ВАХ снимались при протекании через образец постоянного тока, соответствующего разным участкам квазистационарной ВАХ (рис. 3, *a*, точки 1–29).

Точки 1–8, 26–29 лежат на омическом участке квазипостоянной ВАХ (рис. 3, *a*), точки 9–25 лежат на участке квазистационарной ВАХ при напряжениях, когда в образце сформировался и существует продольный АС (АС-образец). На рис. 3, *b* представлены динамические ВАХ образца, через который протекает ток, указанный в точках 1, 8, 15, 25, 26 соответственно на квазистационарной ВАХ (рис. 3, *a*). Из рис. 3, *b* (точки 1, 8) видно, что ВАХ идентичны, хотя получены при протекании в образце омического тока разных величин. На осциллограммах в точках 15, 21, 25 (рис. 3, *b*) представлены динамические ВАХ, но уже при наличии АС в образце. Видно, что акустоэлектрические осцилляции исчезли, увеличился угол наклона нелинейного участка ВАХ,

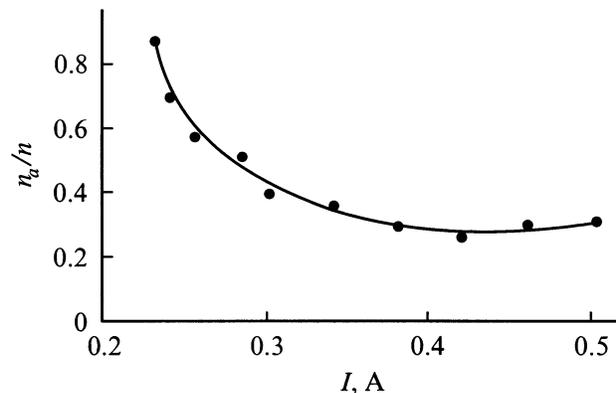


Рис. 4. Зависимость относительной концентрации носителей n_a/n в образцах Те, участвующих в акустоэлектронном взаимодействии, от тока автосилитонов.

что свидетельствует об уменьшении степени взаимодействия носителей заряда с акустическими колебаниями. Подобное происходит из-за понижения плотности потока фононов, к чему приводит уменьшение концентрации носителей заряда в объеме образца при наличии в нем АС. Концентрации носителей можно найти из экспериментальных динамических ВАХ. При электрическом поле выше критического $E > E_{th}$ (рис. 3, c) в результате насыщения ($\beta = 0$) получаем плотность тока

$$j_s = en_a \mu E = en_a v_d, \quad n_a = n,$$

В случае $\alpha > \beta > 0$ только часть носителей n_a участвует в акустоэлектронном взаимодействии, другая часть n_0 — в омическом токе (смысл углов α и β понятен из рис. 3, c). В результате имеем

$$j = en_a \mu E + en_0 \mu E = en_a v_d + en_0 \mu E, \quad n = n_a + n_0. \quad (2)$$

При этом, с одной стороны, имеем соотношение

$$\frac{j - j_a}{j - j_s} = \frac{n_a}{n},$$

где $j = \sigma E = en \mu E$. С другой стороны, согласно рис. 3, c получаем

$$\frac{j - j_a}{j - j_s} = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha},$$

и в результате

$$\frac{n_a}{n} = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

На экспериментальной динамической ВАХ омического образца (рис. 3, b, точки 1 и 8) $\beta = 0$, тогда $n_a/n = 1$. Для ВАХ АС-образца (рис. 3, b, точки 15, 21, 25) имеем

$$\frac{n_{aAS}}{n} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{AS} - \operatorname{tg} \beta_{AS}}{\operatorname{tg} \alpha_{AS}}, \quad (3)$$

где α_{AS} и β_{AS} — углы наклона линейного и нелинейного участков динамической ВАХ АС-образца. Углы α_{AS} и β_{AS} в свою очередь зависят от уровня возбуждения АС, т.е. от тока I_A . На рис. 4 представлена зависимость относительного изменения концентрации носителей заряда n_a/n , участвующих в акустоэлектрическом взаимодействии, от тока АС. С увеличением тока АС наблюдается монотонное понижение n_a/n .

Итак, экспериментально показано, что в объеме образцов монокристаллов InSb и Te при формировании и возбуждении сильным электрическим полем диссипативной структуры (ДС) в созданной джоулевым разогревом неравновесной электронно-дырочной плазме (ЭДП) происходит изменение концентрации носителей заряда. Причем, когда в ДС присутствуют только продольные автосилитоны (АС), концентрация носителей в объеме образца становится меньше и продолжает понижаться с дальнейшим повышением уровня возбуждения этих АС. Обусловлено это прежде всего повышением концентрации носителей заряда локализованных областей и уменьшением их температуры (холодные АС) [13].

Ток этих АС не зависит от концентрации носителей, поскольку ЭДП является плотной, а зависит от температуры: $j = e \mu n E \propto T^{3/2} E$ ($\mu = e \tau / m^* \propto T^{3/2} / n$). Согласно этому выражению, ток при наличии холодного АС может достигать значительно меньших значений, чем только омический ток ($j = e \mu n E$) при одном и том же электрическом поле. На примере экспериментов на образцах Te показано, что АС не разрушается даже тогда, когда разность омического тока и тока АС $\Delta j = j_0 - j_{AS}$ достигает величины $\Delta j / j_0 = 50\%$ относительно омического тока.

В случае, когда в ДС присутствуют и поперечные АС (в образцах InSb), концентрация носителей заряда в объеме образца становится повышенной, продолжая увеличиваться с возрастанием уровня возбуждения этих АС. Поскольку поперечные АС все-таки локализованные области пониженной концентрации носителей заряда и их повышенной температуры (горячие АС), то оставшая часть объема образца, естественно, более обогащена носителями заряда. По-видимому, можно считать, что продольные АС, формирующиеся в созданной джоулевым разогревом неравновесной ЭДП, являются холодными.

Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку работы (гранты № 00-02-17329 и № 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, А.Г. Южанин. ФТП, **22**, 2051 (1988).
- [14] T. Ishiguro, T. Tanaka. Japan. J. Appl. Phys., **6** (7), 864 (1967).
- [15] G. Quentin. *Phenomenes acutoelectriques dans les semiconducteurs piezoelectriques. — Application at tellure* (Paris, 1967).
- [16] T. Shiosaki, H. Matsumoto, H. Chiharo, A. Kawabata. Japan. J. Appl. Phys., **12** (3), 337 (1973).
- [17] H. Kuzmany. Phys. St. Sol. (a), **25** (1), 9 (1974).
- [18] H. Kuzmany, W. Liederer. Phys. St. Sol. (a), **15** (1), 121 (1973).
- [19] А.А. Степуренко. Автореф. канд. дис. (Махачкала, 1982).
- [20] И.К. Камиллов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев. Вестн. ДагНЦ РАН, № 8, 15 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

Distribution of charge carriers in dissipative structure of semiconductors

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

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

Abstract It has been shown experimentally that redistribution of the charge carrier concentration takes place in the volume of both tellurium single crystals and indium antimonide ones under formation and excitation by the strong field of a dissipative structure in nonequilibrium electron-hole plasma. This leads to a situation when the presence of only longitudinal autosolitons in the dissipative structure, reduces the charge carrier concentration outside autosolitons while the presence of only transversal autosolitons makes the charge carriers concentration larger. The authors suggest that longitudinal autosolitons, occurring in nonequilibrium electron-hole plasma created by the Joule warming up, be considered as cold and transversal autosolitons as hot ones.