

АВТОСОЛИТОНЫ В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ

А. А. Степуренко

Институт им. Х. И. Амирханова Российской академии наук
Дагестанский научный центр, 367003, Махачкала, Россия
(Получена 28 января 1993 г. Принята к печати 24 июня 1993 г.)

Показано, что в электронно-дырочной плазме, полученной в узкозонном полупроводнике InSb термической генерацией носителей заряда за счет выделяющегося джоулева тепла при приложении к образцу электрического поля и возбужденной этим же полем, реализуются автосолитоны — самоподдерживающиеся локализованные области относительно низкой концентрации и повышенной температуры носителей заряда — как в виде слоев тока, направленных вдоль приложенного электрического поля, так и в виде перпендикулярных линиям тока слоев сильного электрического поля — доменов, движение которых в электрическом поле обусловлено несимметричностью электронно-дырочной плазмы.

Теоретически показано [1–3], что в устойчивой неравновесной электронно-дырочной плазме (ЭДП) внешним дополнительным возмущением можно возбудить термодиффузионные автосолитоны (АС) — самоподдерживающиеся локализованные области относительно низкой концентрации и повышенной температуры носителей.

Во внешнем электрическом поле эти АС могут проявиться как слои тока, направленные вдоль приложенного электрического поля в случае $\tau_{ee} \ll \tau_p \ll \ll \tau_{ef}$ [4] или в виде перпендикулярных линиям тока слоев сильного электрического поля и низкой концентрации носителей, которые в несимметричной плазме движутся вдоль поля в случае $\tau_p \ll \tau_{ee} \ll \tau_{ef}$ [5], где τ_p , τ_{ef} — времена релаксации импульса и энергии электронов на дефектах и фононах; τ_{ee} — время межэлектронных столкновений.

Эти теоретические исследования были экспериментально реализованы в работах [6, 7], где ЭДП создавалась либо ударной ионизацией носителей в сильном электрическом поле в *n*-GaAs [6], либо фотогенерацией в *n*-Ge [7].

В узкозонных полупроводниках ЭДП может быть создана термической генерацией носителей при относительно низких температурах [1]. Поэтому в этих полупроводниках нагревом решетки за счет выделяющегося джоулева тепла при приложении к образцу электрического поля сравнительно легко создается разогреваемая этим же полем до некоторого уровня неравновесности ЭДП, в которой возможно возникновение локализованного сильно неравновесного состояния АС.

Одним из узкозонных полупроводников является антимонид индия. При температурах выше 150 К любые образцы InSb приобретают собственную проводимость [8], что позволяет создать ЭДП при относительно небольшой выделяемой мощности в условиях джоулева разогрева. Дальнейшее повышение электрического поля, приложенного к образцу, приводит к разогреву ЭДП, что делает возможным возбуждение АС.

Целью настоящей работы является исследование вольт-амперной характеристики (ВАХ) кристаллов InSb при воздействии на них медленно меняю-

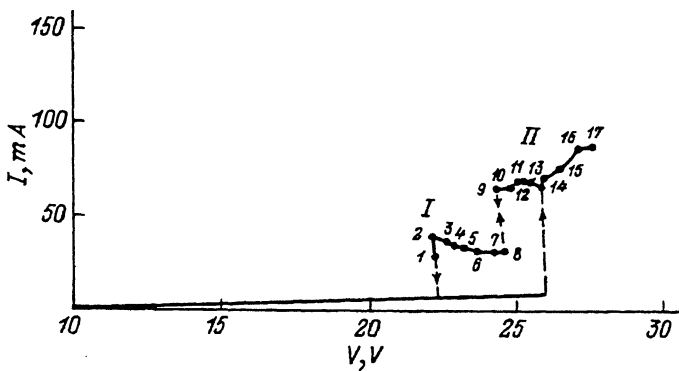


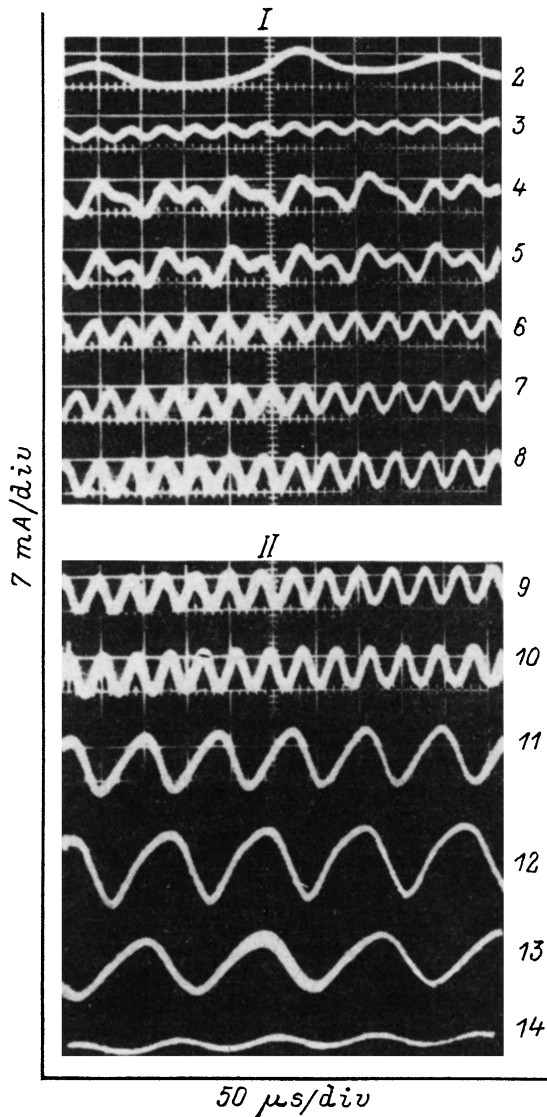
Рис. 1. Квазипостоянная вольт-амперная характеристика антимионида индия.

щегося электрического поля. Одновременно исследовались нелинейные участки ВАХ с помощью осциллографа.

Исследовались образцы кристалла, имеющего при $T = 77$ К концентрацию носителей $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и подвижность $7000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Измерения проводились в жидком азоте на образцах различной длины L и поперечных размеров S . В качестве электрических контактов использовался индий. Создание электрического поля в образце, регистрация тока и ВАХ образца осуществлялись по методике, описанной в работе [9].

На рис. 1 представлена ВАХ образца InSb ($0.55 \times 0.26 \times 0.19 \text{ см}$). На хорошо воспроизводимых ВАХ наблюдается несколько участков, отличающихся закономерностью изменения тока от напряжения: линейный участок, скачком переходящий при напряжении, превышающем пороговое ($V_{th} = 26 \text{ В}$), на нелинейный участок, имеющий две ветви (I и II), сохраняющиеся при любом изменении напряжения в интервале $22 \div 30 \text{ В}$. Как видно из рис. 1, ВАХ имеет гистерезис, т. е. значения тока в образце при уменьшении напряжения ($V < V_{th}$) имеют уже совершенно другие (нелинейные) зависимости от напряжения (ветви I и II). Следует отметить, что в случае шнурования тока при джоулевым разогреве образца ВАХ, вообще говоря, становится S -образной, как это имеет место в [10]. Исследование образца в режиме генератора напряжения (осуществляемом в данной работе) привело бы к тому, что вместо S -образности на ВАХ появился бы резкий скачок тока, приводящий, как правило, к разрушению образца. Вместе с тем в данном же случае после резкого скачка тока на ВАХ образца появляются устойчивые во времени нелинейные участки, где ток мало меняется с изменением напряжения в определенном интервале значений, что предполагает образование в образце устойчивой диссипативной системы с уединенными состояниями — автосолитонами. S -образность на ВАХ также наблюдается, но при больших значениях приложенного напряжения. Поскольку все участки ВАХ, кроме участков, показанных на рисунке стрелками, устойчивы во времени, то представлялось возможным проводить исследования проходящего через образец тока с помощью осциллографа. На рис. 2 представлены осциллограммы колебаний тока во внешней цепи образца, зафиксированные в точках 2—17 (рис. 1) нелинейных ветвей I и II ВАХ. Видно, что начиная с точки 2 во внешней цепи образца появляются отрицательные скачки тока, которые с ростом напряжения на образце приобретают сначала периодический характер, затем аperiodический (рис. 2, а, осциллограммы 4, 5), затем снова приобретают периодичность (осциллограмма б); далее периодичность колебаний сохраняется, при этом они незначительно увеличиваются по амплитуде (осциллограммы 6, 7, 8). На ветви II ВАХ образца в точках 9, 10 характер колебаний сохраняется (рис. 2, осциллограммы

Рис. 2. Осциллограммы осцилляций тока во внешней цепи образца антимида индия на участках I и II в точках 2—17 ВАХ рис. 1.



9, 10), но уже в точках 11, 12, 13 наблюдается резкое уменьшение частоты колебаний (осциллограммы 11, 12, 13); максимум амплитуды колебаний приходится на точку 12. Колебания отсутствуют от точки 14 до точки 17, где они вновь появляются с относительно небольшой амплитудой.

Одновременно проводились зондовые измерения. С этой целью к длинной узкой грани образца прижимались потенциальные зонды с шагом $\Delta l = 0.08$ см, позволяющие измерять изменение во времени разности потенциалов электрического поля ΔV_i на различных участках образца Δl . Осциллограммы ΔV_i в виде релаксационных колебаний, полученные с разных пар зондов, свидетельствуют о распространении по образцу области сильного электрического поля (домена) со скоростью $v_{AS} = 1.5 \cdot 10^3$ см/с, что на четыре порядка больше скорости движения электротепловых доменов [11, 12]. На рис. 3 представлены осциллограммы ΔV_{t_1} и ΔV_{t_2} , полученные с двух соседних пар зондов.

Наблюдаемые явления можно объяснить исходя из теории расслоения горячей ЭДП, развитой в [1-5]. Как показано в [1], условие реализации расслоения определяется зависимостями времен релаксации

энергии τ_e и импульса τ_p электронов от их температуры. При степенной зависимости $\tau_p \sim T^\alpha$ и $\tau_e \sim T^s$ условием расслоения является

$$\alpha + s > 0. \quad (1)$$

Известно, что в InSb эффективная масса электронов намного меньше эффективной массы дырок ($m_e^* \ll m_h^*$), при этом для подвижности электронов μ_e и дырок μ_h выполняется соотношение $\mu_e \gg \mu_h$ [8]. При $T < \Theta = 264$ К отсутствует полярное рассеяние, время рассеяния энергии на акустических фонах τ_{ef} зависит от энергии E как $\tau_{ef} \sim E^{-1/2}$, а время рассеяния импульса электронов на дырках как на заряженных центрах $-\tau_p \sim E^{3/2}$ [8]. Таким образом, $\alpha = 3/2$, $s = -1/2$ и, значит, условие (1) выполняется. При джоулевом разогреве в узкозонном полупроводнике InSb за счет термической генерации собственная концентрация носителей заряда может быть достаточно высокой

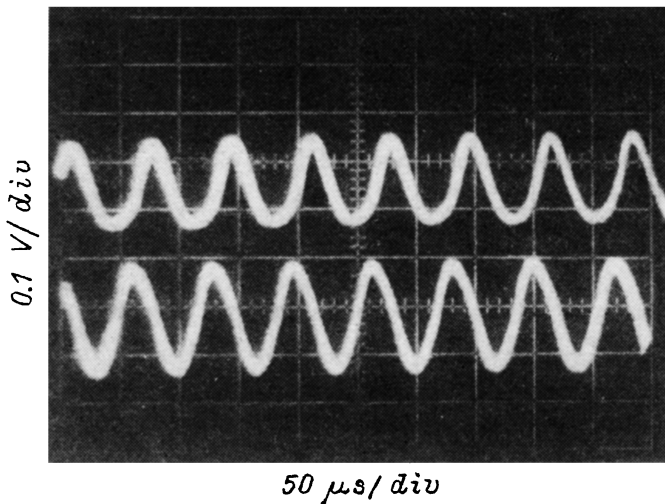


Рис. 3. Осциллограммы ΔV_{I1} и ΔV_{I2} , снятые с двух соседних пар потенциальных зондов образца.

уже при относительно низкой температуре [1], т. е. при $T > 150$ К легко образуется квазинейтральная ($n = p$) плотная ЭДП [8] с такой концентрацией электронов и дырок, когда заметными становятся межэлектронные столкновения. При этом подвижность электронов зависит от n , а времена межэлектронных столкновений τ_{ee} много меньше характерных времен релаксации импульса и энергии носителей на фонах, т. е.

$$\tau_{ee} \ll \tau_p \ll \tau_{ef}. \quad (2)$$

Выполнение условий (1) и (2) приводит к тому, что ЭДП в InSb должна расслаиваться на шнуры тока [4]. Экспериментально полученная ВАХ (рис. 1) с двумя устойчивыми во времени и в определенных пределах напряжений нелинейными участками свидетельствует о том, что в образце образовались один или два продольных по отношению к приложенному напряжению шнура тока [13].

При джоулевом разогреве образца, помещенного в ванну с жидким азотом, обязательно создается радиальный градиент температуры ΔT_r в образце. В результате в образце найдутся области с такой температурой и соответственно концентрацией носителей в ЭДП (неплотная ЭДП), когда условие (2) нарушится и станет возможным выполнение условия

$$\tau_p \ll \tau_{ee} \ll \tau_{ef}, \quad (3)$$

при котором возникает неустойчивость вдоль линий тока, т. е. ЭДП разбивается на поперечные линиям тока страты электрического поля (домены), которые в реальной, а тем более в несимметричной ЭДП полупроводника, каковой является ЭДП в InSb ($\mu_e \gg \mu_h$), сносятся в электрическом поле вдоль линий тока, т. е. появятся движущиеся вдоль образца АС в виде перпендикулярных линиям тока слоев сильного электрического поля и низкой концентрации носителей [5]. Наблюдаемые на эксперименте колебания тока в InSb (рис. 2) как раз свидетельствуют о том, что в образовавшейся ЭДП возбуждаются внешним электрическим полем движущиеся термодиффузионные АС в виде доменов пониженной концентрации носителей и сильного электрического поля.

Итак, впервые экспериментально показано, что в ЭДП, полученной в узкозонном полупроводнике InSb джоулевым разогревом, реализуются пред-

сказанные теоретически [1-5] АС — самоподдерживающиеся локализованные области относительно низкой концентрации и повышенной температуры носителей заряда — как в виде слоев тока, направленных вдоль приложенного электрического поля, так и в виде перпендикулярных линиям тока слоев сильного электрического поля — доменов, движение которых в электрическом поле обусловлено несимметричностью ЭДП ($\mu_e \gg \mu_h$).

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] А. Л. Дубицкий, Б. С. Кернер, В. В. Осипов. ФТТ, 28, 1290 (1986).
- [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. Ф. Синкевич. Письма ЖЭТФ, 36, 359 (1982).
- [7] М. Н. Винославский. ФТТ, 31, 315 (1989).
- [8] К. Хилсум, Роуз-Инс. Полупроводники типа $A^{III}B^V$, 157. М. (1963).
- [9] А. А. Степуренко, К. М. Алиев, Н. С. Абакарова. ФТП, 23, 1584 (1989).
- [10] В. В. Антонов, Л. П. Кац. ФТП, 16, 1050 (1982).
- [11] В. Ф. Елесин, Ю. А. Быковский. ФТП, 2, 1684 (1968).
- [12] С. П. Кальвенас, А. А. Пучинкас. ФТП, 10, 1752 (1976).
- [13] В. В. Гафийчук, Б. С. Кернер, В. В. Осипов, А. Г. Южанин. ФТП, 22, 2051 (1988).

Редактор Л. В. Шаронова
