

## МНОГОШНУРОВЫЕ И МНОГОДОМЕННЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ГОРЯЧЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЕ GaAs

*Б.С. Кернер, В.Ф. Синкевич*

Установлено, что разогретая полем электронно-дырочная плазма (ЭДП) в GaAs при комнатной температуре вначале расслаивается перпендикулярно полю. В результате образуются многочисленные шнуры тока, которые по мере увеличения напряжения на образце расслаиваются вдоль поля на домены (страты), и образец заполняется „каплями” плазмы.

В данном сообщении приводятся результаты экспериментального исследования обнаруженного явления образования стационарных устойчивых многошнуровых и многодоменных сос-

тояний в разогретой электрическим полем квазинейтральной ЭДП, теоретически предсказанного в  $^{1-4}$ . Расслоение ЭДП наблюдалось при комнатной температуре ( $T_0 \cong 300$  К) в однородных образцах  $n$ - GaAs толщиной  $l_z = 0,25 \cdot 10^{-4}$  см и длиной  $l_x = 20 \cdot 10^{-4}$  см с концентрацией равновесных электронов  $n_0 = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , полученных методом газовой эпитаксии на полуизолирующем GaAs ( $n < 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) (рис.1) Планарные антизапорные контакты были получены напылением пленки AuGe – Au в вакууме с последующим ее вжиганием. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) образцов до начала ударной ионизации (при  $U < U_i$  рис. 2) имела стандартный вид  $^5$ : при  $U_H < U < U_i$  наблюдается участок насыщения тока  $J$ , отвечающий наличию домена сильного поля у анода (рис. 1). В исследуемых образцах ЭДП возни-

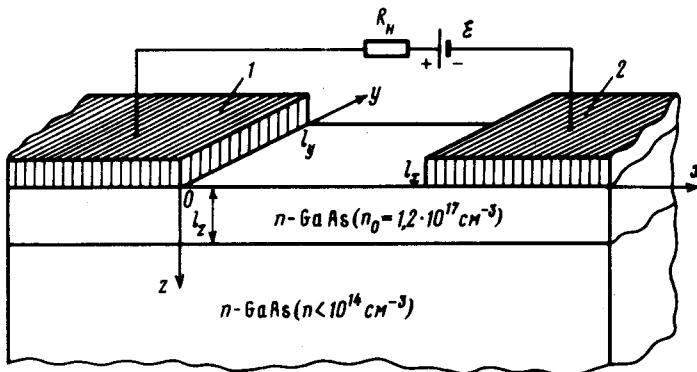


Рис.1. Структура исследованных образцов (1 – анод, 2 – катод)

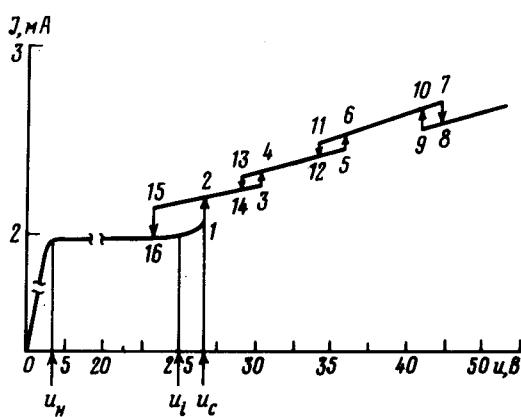


Рис.2. Вид ВАХ одного из образцов. Ветви  
15 – 3 отвечают состоянию с  $N = 3$  шну-  
рами; 13 – 5 –  $N = 4$ ; 11 – 7 –  $N = 5$ ;  
9 – 8 – с  $N = 5$  шнурами и  $M = 2$  доме-  
нами ( $m = 7$ , „каплями”)

кала вследствие ударной ионизации носителей в области статического домена у анода. Начало ударной ионизации носителей сопровождается появлением области слабого рекомбинационного свечения, примыкающего к аноду. При некотором критическом напряжении  $U = U_c > U_i$  на участке ВАХ с положительной дифференциальной проводимостью свечение в прианодной области расслаивается в направлении оси  $y$ , перпендикулярном приложенному в направлении оси  $x$  полю (рис.1 и рис.3, а), что свидетельствует о расслоении ЭДП и образовании шнурков тока. Это явление, как правило, сопровождается скачком тока  $J$  на ВАХ (переход 1 → 2, рис. 2). Яркость и контрастность свечения ЭДП в каждом из шнурков убывает в направлении оси  $x$  вследствие рекомбинации дырок по мере их амбиполярного дрейфа к катоду и поперечной диффузии, т.е. шнур имеет вид „кометы”: „голова” шнура – „капля” ЭДП – расположе-

на у анода ( $x = 0$ ), а вытянутый в направлении приложенного поля (оси  $x$ , рис. 3,  $a$ ) „хвост” распущен вдоль оси  $y$ . При дальнейшем увеличении  $U$  число шнурков ( $N$ ) и, соответственно, „капель” у анода увеличивается, а при уменьшении  $U$  — уменьшается, что, как правило, сопровождается многочисленными участками гистерезиса (рис. 2). В достаточно однородных образцах реализуются стационарные состояния с периодическим расположением шнурков тока („капель” у анода) вдоль всего поперечного размера  $l_y$  образца (рис. 1). Для образцов с  $l_y = 1,5 \cdot 10^{-3}$  см максимальное число шнурков составляет 6–8, а для  $l_y = 15 \cdot 10^{-3}$  см — несколько десятков.

Начиная с некоторого значения  $U$  вдоль одного (иногда сразу нескольких) из шнурков свечение ЭДП (в „хвосте” шнура) скачкообразно расслаивается — возникает некоторое число ( $M$ ) „капель” ЭДП, расположенных вдоль от анода вдоль оси  $x$  (рис. 3,  $b$ ;  $M = 2$ ). Это свидетельствует о расслоении шнура тока вдоль оси  $x$  на домены (страты). Такое явление сопровождается скачком  $J$  ( скачок  $7 \rightarrow 8$ ; рис. 2). С ростом  $U$  количество ( $M$ ) удаленных от анода „капель” увеличивается как из-за появления новых „капель” вдоль данного шнура, так и за счет расслоения ЭДП вдоль других шнурков тока. В результате образец заполняется „каплями” ЭДП, число которых  $m = N + M$ , причем радиус „капель” и минимальное расстояние между ними  $\sim 10^{-4}$  см. Яркость свечения и радиус „капель” вдоль оси  $y$  практически постоянны, но по мере их удаления от анода несколько уменьшаются.

При достаточно больших  $U$  из-за разогрева решетки GaAs происходит необратимый пробой образца. Образец либо проплавляется узкими каналами вдоль шнурков тока, либо образуется ряд локальных разрушений пленки GaAs в местах расположения „капель”<sup>1)</sup>.

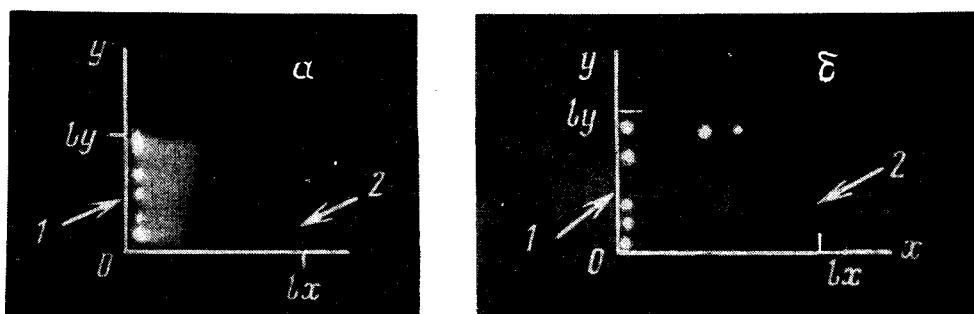


Рис. 3. Фотографии свечения (в видимом диапазоне спектра) расслоившейся ЭДП в образце, вид ВАХ которого представлен на рис. 2, отвечающие двум различным состояниям с  $N = 5$  шнурками тока (ветвь 11–7 на рис. 2) — (a) и  $m = 7$  „каплями” ( $N = 5$  шнурков тока и  $M = 2$  домена; ветвь 9–8 на рис. 2) — (б) (1 — анод, 2 — катод). Оси координат на рис.  $a$  и  $b$  коррелируют с соответствующими осями на рис. 1. (С целью более наглядной иллюстрации „капель” въздержка при получении фотографии на рис.  $b$  была выбрана в 8 раз меньше, чем на рис.  $a$ . Поэтому на рис.  $b$  видны локализованные вблизи анода „головы” шнурков, но отсутствуют зафиксированные на рис.  $a$  менее яркие „хвосты” шнурков). Рис.  $b$  соответствует случаю, когда на домены ( $M = 2$ ) расслоился лишь один из шнурков, находящийся при  $y \cong l_y$  ( $l_y = 1,5 \cdot 10^{-3}$  см).

Обнаруженное явление можно объяснить в рамках теории расслоения ЭДП, развитой в<sup>1–4</sup>. Для  $n$ -GaAs при  $T_0 = 300$  К энергия носителей рассеивается на полярных оптических фононах, а импульс на тех же фононах и на донорах ( $n_0 \geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), а в случае плотной ЭДП преобладает электронно-дырочное рассеяние импульса. Поэтому времена релаксации импуль-

<sup>1)</sup> При наличии в образце неоднородностей многошинуровые и соответственно, многодоменные периодические состояния не реализуются. По мере увеличения  $U$  раньше происходит локальный тепловой пробой образца в области шнура тока, локализованного на неоднородности.

са  $\tau_{e,h}^{\epsilon} \sim T_{e,h}^a$  и энергии  $\tau_{e,h} \sim T_{e,h}^s$  являются возрастающими функциями средней энергии горячих электронов ( $T_e$ ) и дырок ( $T_h$ ), т.е.  $a,s > 0$ <sup>6</sup>. При  $n \cong 10^{17} \text{ см}^{-3}$  время межэлектронных соударений  $\tau_{ee} \cong 2 \cdot 10^{-13} \text{ с} \ll \tau_{e,h} \sim 10^{-12} \text{ с}$ <sup>6</sup>. Длина релаксации энергии носителей  $l_{\epsilon} \cong 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ , амбиполярная длина диффузии  $L \sim 10^{-4} \text{ см}$ , а длина экранирования  $l_D \sim 10^{-5} \text{ см}$ . Следовательно  $l_D < l_{\epsilon} \ll L \ll l_x, l_y$ . Таким образом, все необходимые условия для расслоения горячей ЭДП<sup>3,4</sup> выполнены. Концентрация дырок  $p$  максимальна вблизи анода и спадает по мере их дрейфа к катоду. Поэтому вблизи анода ЭДП оказывается плотной ( $\tau_{ee} < \tau \ll \tau$ ), и именно в этой области выполняются все условия для расслоения тока<sup>3</sup> и образуются многочисленные шнуры. По мере удаления от анода к катоду плотность ЭДП падает, т.е. условия расслоения тока выполняются лишь в относительно малой (вдоль оси  $x$ ) части образца (вблизи анода, рис. 3, a). Поэтому шнуры имеют вид „комет” (рис. 3, a). Однако для менее плотной ЭДП ( $\tau < \tau_{ee} \ll \tau$ ) вдали от анода, где уже не выполняются условия шнурования тока<sup>3</sup>, выполняются условия расслоения ЭДП вдоль поля<sup>4</sup>. В результате ЭДП в шнурах расслаивается на страты (домены)<sup>4</sup>. В области же образующихся страт ЭДП вновь становится плотной. Поэтому плотность ЭДП (тока) в каждой страте дополнительно расслаивается (стягивается) в направлении оси  $y$ , и в образце возникают „капли” ЭДП практически одинакового размера<sup>1</sup>.

Наблюдаемое экспериментально каждое из состояний с  $N$ -шнурями и  $M$ -стратами ( $m = N + M$ , „каплями”) существует лишь в некотором диапазоне напряжений  $U_{min}^m \leq U \leq U_{max}^m$ . При  $U > U_{max}^m$  число шнурков или страт увеличивается (например, 3 → 4, рис. 2), а при  $U < U_{min}^m$  уменьшается (рис. 2). Причем,  $U_{max}^m > U_{max}^n$  и  $U_{min}^m > U_{min}^n$  при  $m > n$ . Эти закономерности эволюции числа шнурков и доменов (страт) при изменении  $U$  согласуются с результатами нелинейной теории неоднородных состояний в неравновесных системах<sup>1, 2</sup>. Согласно теории<sup>2-4</sup>, минимальное расстояние между шнурками и стратами для исследуемых образцов GaAs должно иметь величину порядка  $L \cong 10^{-4} \text{ см}$ , что также соответствует экспериментально наблюдаемым значениям.

В заключение выражаем благодарность Н.А. Козлову за участие в постановке и проведении экспериментальных исследований и В.В. Осипову за полезные замечания, сделанные при обсуждении работы.

#### Литература

1. Кернер Б.С., Осипов В.В. ЖЭТФ, 1978, 74, 1675.
2. Кернер Б.С., Осипов В.В. ЖЭТФ, 1980, 79, 2218; ФТП, 1979, 13, 721.
3. Кернер Б.С., Осипов В.В. ЖЭТФ, 1976, 71, 1542; ФТП, 1979, 13, 891.
4. Кернер Б.С., Осипов В.В. ФТП, 1979, 21, 2342.
5. Бонч-Бруевич В.Л., Миронов А.Г., Звягин И.П. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М.: „Наука”, 1972.
6. Конузил Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. М.: Мир, 1970.

Поступила в редакцию  
21 сентября 1982 г.

1) Из-за уменьшения в ремени жизни носителей с ростом их концентрации плотность ЭДП в „каплях” имеет тенденцию к насыщению. При этом выделение энергии при рекомбинации приводит к сильному локальному разогреву GaAs, что при больших  $U$  ведет к испарению As в местах локализации „капель” ЭДП, т.е. „пятнистому” разрушению образца.