

# Осцилляции тока при латеральном транспорте в гетероструктурах GaAs/InGaAs с квантовыми ямами

© А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, Е.В. Демидов<sup>¶</sup>, Б.Н. Звонков\*, Е.А. Ускова\*

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\* Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 14 июня 2004 г.)

Измерены вольт-амперные характеристики и получены осциллограммы импульсов тока в многослойных гетероструктурах  $n$ -InGaAs/GaAs с квантовыми ямами и эпитаксиальных пленках  $n$ -GaAs с различным уровнем легирования. Показано, что при низких уровнях легирования в полях порядка 300–400 В/см имеет место насыщение вольт-амперных характеристик. В более сильно легированных образцах наблюдается возникновение осцилляций тока с периодом, соответствующим транспортной скорости  $(3–3.5) \cdot 10^5$  см/с при  $E \parallel [110]$  и примерно в 1.5 раза большим при  $E \parallel [100]$ . Полученные результаты объясняются возникновением в структурах соответственно статических и движущихся акустоэлектрических доменов. В полях выше 1.5 кВ/см наблюдались высокочастотные осцилляции ганновского типа, соответствующие пролетной скорости электронов  $1.5 \cdot 10^7$  см/с.

## 1. Введение

Явление пространственного переноса носителей заряда в полупроводниковых гетероструктурах с селективно легированными барьерами (в частности,  $\delta$ -легированными) в сильном латеральном электрическом поле (т.е. направленном в плоскости ямы) широко изучалось в 80-е годы (см., например, обзор [1]). Из-за разогрева носителей заряда электрическим полем возможен их вынос из квантовых ям в легированные барьерные слои, в результате чего их подвижность уменьшается вследствие „включения“ механизма рассеяния на ионизированных примесях, что может приводить к падению тока, т.е. к возникновению отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП)  $N$ -типа, как это имеет место в эффекте Ганна в электронных полупроводниках типа GaAs (см., например, [2]). Возникновение ОДП  $N$ -типа может приводить к образованию электронной неустойчивости, в частности к образованию статических или бегущих доменов сильного поля. Пространственный перенос горячих носителей заряда из квантовых ям, где их подвижность и эффективная температура относительно высоки, в вышележащие по энергии состояния с малой подвижностью, где эффективная температура падает, может приводить к инверсии населенностей [3–8].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию электрического транспорта горячих носителей заряда в гетероструктурах  $n$ -InGaAs/GaAs с квантовыми ямами в сильных латеральных электрических полях. Ранее в таких структурах при температурах жидкого гелия и азота в полях 300–1000 В/см наблюдалось насыщение вольт-амперных характеристик (ВАХ) и возникновение осцилляций тока [9–11], что связывалось с пространственным переносом горячих носителей и воз-

никающей в этих условиях  $N$ -ОДП. В настоящей работе на основе сопоставления результатов измерений ВАХ и осциллограмм импульсов тока в гетероструктурах с квантовыми ямами  $n$ -InGaAs/GaAs и в эпитаксиальных пленках  $n$ -GaAs с литературными данными, относящимися к гетероструктурам GaAs/AlGaAs, сделан вывод, что наблюдаемые осцилляции связаны с развитием в образцах акустоэлектронной неустойчивости.

Так как GaAs является пьезоэлектриком, то деформация, созданная поперечной акустической волной, распространяющейся вдоль направления [110], индуцирует макроскопическое электрическое поле, которое приводит к интенсивному взаимодействию электронов, движущихся вдоль того же направления, с колебаниями решетки. Поэтому при превышении электронами скорости распространения акустической волны они начинают активно испускать фононы (аналог черенковского излучения) [12–14].

При включении вдоль направления [110] электрического поля больше некоторого критического значения в кристалле происходит усиление звуковых волн, двигающихся от катода к аноду. В результате огибающая потока экспоненциально нарастает к аноду. Так как звуковая волна вызывает акустоэлектрический ток, направленный против дрейфового движения электронов, для сохранения полного тока падение напряжения на прианодной области увеличивается, а в остальной части образца поле падает. В свою очередь с ростом электрического поля в этой области существенно возрастает коэффициент усиления акустической волны. Такая положительная обратная связь приводит к образованию статического прианодного электроакустического домена с большими звуковым и электрическим полями [12–14] и насыщению ВАХ в сильных полях. Картина развития акустической неустойчивости принципиально меняется в режиме большого усиления (более 100 дБ/см). В этом режиме

<sup>¶</sup> E-mail: demidov@ipm.sci-nnov.ru

Параметры исследованных образцов  $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  с одиночными и двойными квантовыми ямами и эпитаксиальных слоев  $n\text{-GaAs}$  (приведенные значения концентрации соответствуют комнатной температуре)

Номер структуры	$x$	$d_{1QW}, \text{Å}$	$d_{2QW}, \text{Å}$	Число периодов	Толщина структуры, мкм	$n_s, 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (на один период)	$N_s, 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (полная)
2987	0.08	200	100	20	2.3	1.1	2.2
3490	0.08	200	100	20	2.3	3.0	6.0
3517	0.08	200	—	20	2.5	3.9	7.8
3518	—	—	—	—	2.5	—	7.0
3628	—	—	—	—	2.4	—	48
3629	—	—	—	—	2.4	—	18.5
3630	—	—	—	—	2.4	—	7.0
3631	—	—	—	—	2.4	—	3.4
3732	0.1	200	—	20	2.5	0.3	0.6
3734	0.1	200	—	20	2.5	2.4	4.8
3735	0.1	200	100	20	2.6	2.0	4.0
4079	0.06	200	—	20	2.6	1.4	2.9
4081	0.06	200	100	20	2.6	2.5	4.9

акустический поток очень быстро достигает уровня нелинейности, что приводит к образованию движущегося акустоэлектрического домена. Он представляет собой короткий пакет (около 100 мкм) акустических колебаний, движущихся по образцу со скоростью, близкой к скорости звука. При приложении поля в других направлениях усиливались косые волны, распространяющиеся под углом к направлению поля. Детальное исследование осцилляций, обусловленных акустоэлектрическими доменами, в гетероструктурах  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  с квантовыми ямами было проведено в [15]. При превышении полем (приложенным вдоль направления [110]) критического значения наблюдались сильные осцилляции тока. При пороговом поле дрейфовая скорость электронов составляла  $10^6\text{--}10^7$  см/с. В слоях с невырожденными носителями наблюдались затухающие осцилляции с частотой, соответствующей пролетной скорости  $\sim 3.5 \cdot 10^5$  см/с, что совпадает со скоростью акустических фононов. Осцилляции были наиболее выражены при температуре жидкого азота. С увеличением температуры амплитуда осцилляций уменьшалась, при  $T = 200$  К они исчезали. В слоях с большой концентрацией электронов колебания тока не затухали, а их частота была существенно выше.

## 2. Эксперимент

Исследования электрического транспорта горячих носителей проводились в импульсных электрических полях, длительность импульса  $\tau$  прикладываемого к образцу электрического напряжения до 1000 В составляла несколько микросекунд. Для исключения перегрева образца использовалась низкая частота повторения импульсов 3–10 Гц. Длительность переднего фронта импульса высоковольтного напряжения не превышала 30 нс. Амплитуду импульса напряжения можно было медленно (в течение нескольких минут) изменять от

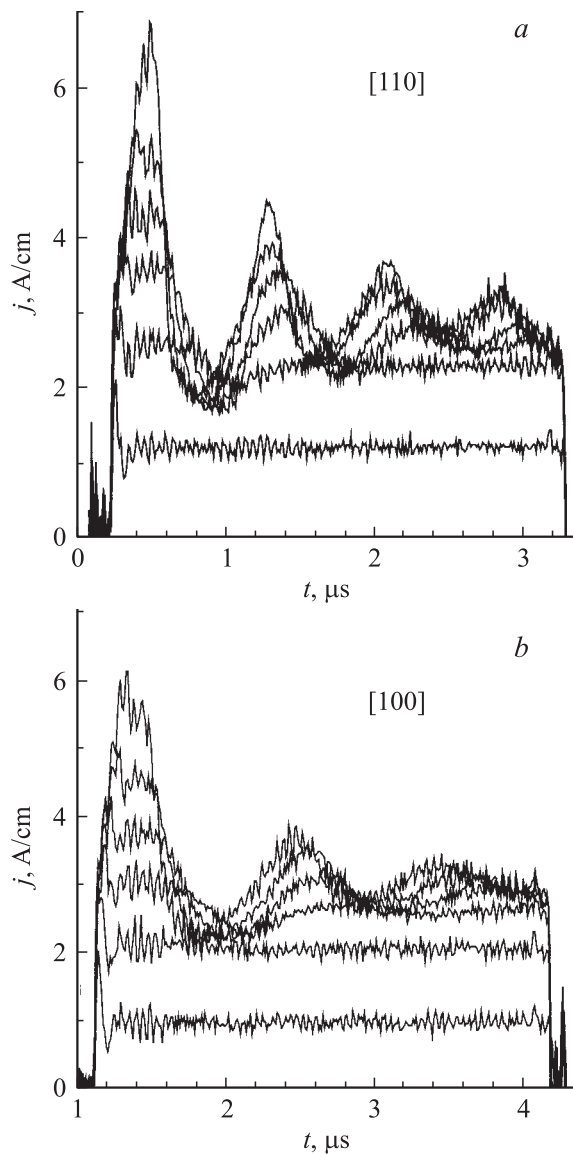
нуля до максимального значения. Контроль за амплитудой и формой импульсов напряжения и тока через образец осуществлялся путем наблюдения сигналов на экране цифрового осциллографа Tektronix TDS3034B с полосой пропускания 350 МГц, с помощью которого сигналы также записывались в память ЭВМ. Измерения проводились как при комнатной, так и при низких температурах  $T = 77$  и 4.2 К. В последних случаях держатель с образцом погружался в транспортные сосуды Дьюара с жидким азотом или гелием соответственно.

Исследуемые образцы были выращены методом газотранспортной эпитаксии на подложках полуизолирующего  $\text{GaAs}(001)$ . Параметры образцов приведены в таблице. Исследовались многослойные гетероструктуры  $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  с одиночными и двойными квантовыми ямами, а также тонкие эпитаксиальные слои  $n\text{-GaAs}$ . Гетероструктуры содержали 20 пар квантовых ям шириной 200 и 100 Å, разделенных барьером  $\text{GaAs}$  толщиной 50 Å (или 20 одиночных квантовых ям шириной 200 Å), разнесенных на 800–900 Å. В образцах 2987, 4079, 4081 осуществлялось  $\delta$ -легирование узких ям кремнием, все остальные образцы были однородно легированными. Подвижность электронов при комнатной температуре слабо зависела от уровня легирования и составляла около  $4500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Из структуры выкалывались образцы прямоугольной формы с размерами  $5 \times 5$  мм. На поверхность образцов наносились и вжигались полосковые омические контакты на расстоянии около 3 мм.

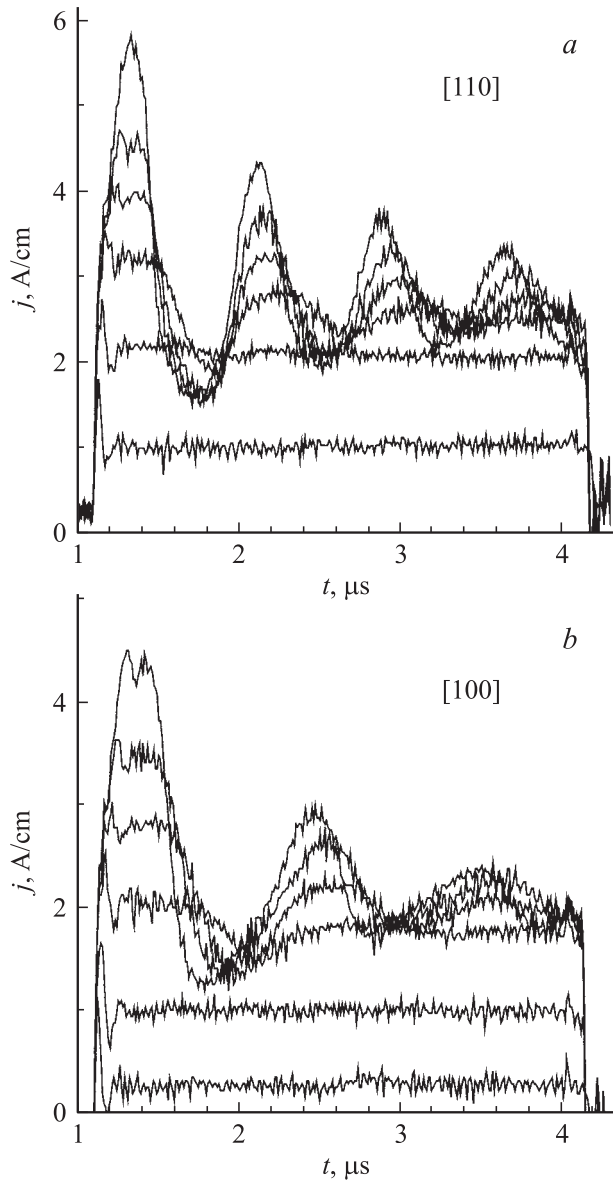
## 3. Результаты и обсуждение

Типичные осциллограммы импульсов тока в гетероструктурах с одиночными и двойными квантовыми ямами представлены на рис. 1 и 2. Начиная с некоторого порогового значения приложенного напряжения

( $U/l \approx 300$  В/см) на импульсе тока возникают осцилляции. Возникновение токовой неустойчивости наблюдалось при  $T = 4$  и  $77$  К, однако при комнатной температуре осцилляции уже не возникали. При уменьшении расстояния между контактами втрое (до  $l = 1$  мм) частота осцилляций увеличилась примерно в 3 раза. С другой стороны, при уменьшении ширины образца частота осцилляций и форма осциллограмм тока практически не изменялись. Это говорит о том, что частота колебаний не зависит от сопротивления образца (и, таким образом, не определяется внешней электрической цепью, а связана именно с его длиной). Структуры с двойными квантовыми ямами и селективным легированием (2987, 4081) были „сконструированы“ с целью изучения пространственного переноса носителей в сильных латеральных электрических полях. В таких гетероструктурах нижний уровень в узкой ( $\delta$ -легирован-



**Рис. 1.** Осциллограммы импульсов тока образца 3734, измеренные при  $E \parallel [110]$  (a) и  $E \parallel [100]$  (b);  $T = 4.2$  К,  $l = 3$  мм.



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока образца 3735, измеренные при  $E \parallel [110]$  (a) и  $E \parallel [100]$  (b);  $T = 4.2$  К,  $l = 3$  мм.

ной) квантовой яме расположен примерно на  $10$  мэВ выше, чем в широкой яме, в то время как энергия Ферми составляет несколько мэВ.

Таким образом, при низких температурах большая часть носителей сосредоточена в широких ямах. При разогреве носителей в электрическом поле пространственный перенос из более широкой квантовой ямы на вышележащий уровень в узкой яме (за счет рассеяния на оптических фононах) должен приводить к падению подвижности (из-за сильного примесного рассеяния в узких легированных квантовых ямах) и охлаждению электронов в узких ямах. Обратный переход оказывается затруднен, следствием чего может являться падение тока и развитие электрической неустойчивости, что качественно соответствует наблюдаемой картине.

Дальнейшие исследования показали, что осцилляции тока наблюдались и в однородно легированных образцах с двойными квантовыми ямами (3490, 3735). Было высказано предположение, что причиной возникновения неустойчивостей в условиях пространственного переноса из широких ям в узкие является рассеяние на шероховатостях границы, которое должно играть большую роль в более узкой квантовой яме. Естественно было предположить, что, как и в обычном эффекте Ганна, период осцилляций определяется временем пролета через образец домена сильного электрического поля. В эффекте Ганна скорость движения домена соответствует дрейфовой скорости носителей заряда. Аналогичный результат был получен и для доменной неустойчивости в селективно легированных гетероструктурах GaAs/AlGaAs в условиях пространственного переноса [1]. В нашем случае моменту возникновения неустойчивости соответствует дрейфовая скорость порядка  $3 \cdot 10^6$  см/с. С другой стороны, из периода осцилляций, который для образца длиной 3 мкм составляет около 1 мкс, легко оценить скорость движения домена, которая оказывается всего  $3 \cdot 10^5$  см/с, т.е. на порядок меньше дрейфовой скорости носителей. Такое же расхождение имело место и для осцилляций тока, наблюдавшихся в гетероструктурах InGaAs/GaAs *p*-типа [16], и свидетельствовало „против“ предложенного механизма ОДП, связанной с пространственным переносом.

С целью дальнейшего изучения условий возникновения наблюдаемой токовой неустойчивости были выращены и исследованы контрольные образцы с одиночными квантовыми ямами и однородно легированные пленки *n*-GaAs (см. таблицу). ВАХ и осциллограммы импульсов тока образцов с двойными и одиночными квантовыми ямами похожи друг на друга (ср. рис. 1 и 2). С хорошей степенью точности совпадают пороговые значения приложенного электрического поля и плотности тока, соответствующие началу осцилляций, и периоды осцилляций. Таким образом, проведенные измерения показывают, что наличие в гетероструктуре двойных квантовых ям практически не влияет на характер наблюдаемой токовой неустойчивости; следовательно, она не связана с пространственным переносом из широких квантовых ям в узкие. Следует упомянуть, что осцилляции тока в многослойных гетероструктурах с одиночными более глубокими квантовыми ямами In<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>As/GaAs ранее уже наблюдались в работе [17].

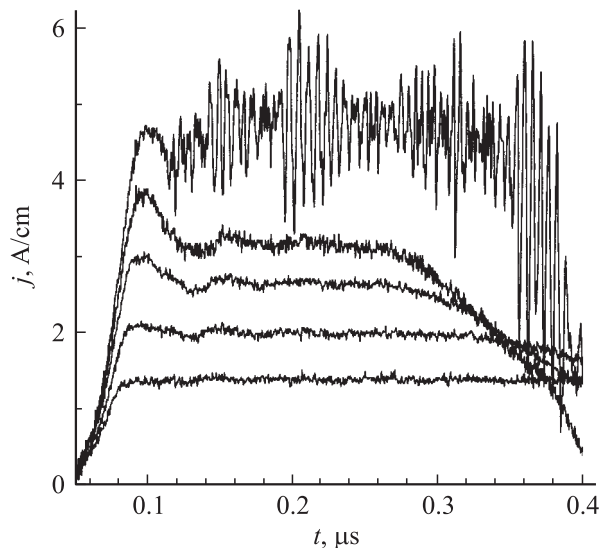
Образец 3518 представлял собой однородно легированную пленку *n*-GaAs толщиной 2.5 мкм, соответствующей толщине гетероструктур 3490 и 3518, с суммарной концентрацией носителей примерно такой же, как и в образце 3490 (см. таблицу). В этом образце характер осцилляций тока заметно изменился по сравнению с гетероструктурами. Несколько выросло пороговое значение приложенного электрического поля (до  $\approx 450$  В/см по сравнению с 300 В/см), снизилось значение пороговой плотности тока (до 1.5 А/см по сравнению с 3–4 А/см), значит, и дрейфовой скорости. Значительно изменилась

форма осцилляций. Вместо слабо затухающих осцилляций синусоидальной или пиковой формы в образце 3518 наблюдается значительный „выброс“ на переднем фронте импульса тока и следующие за ним быстро затухающие осцилляции, что характерно для установления режима статического домена в обычном эффекте Ганна. Из осциллограмм следует, что в сильных электрических полях имеет место выраженное насыщение тока, что также характерно для режима статического домена. Вместе с тем период осцилляций остался почти таким же, как и в гетероструктурах. Поскольку в сравнительно толстой эпитаксиальной пленке нет пространственного переноса носителей, очевидно, что наблюдаемые осцилляции тока имеют совершенно иную природу.

Эти исследования были дополнены измерениями электрического транспорта на серии эпитаксиальных пленок *n*-GaAs с различной степенью легирования (последовательно выращенные образцы 3628–3631). По мере роста концентрации носителей наблюдался переход от режима формирования статического домена в „слабо легированных“ образцах 3631 и 3630 к режиму слабо затухающих осцилляций в образцах 3629 и 3628.

Представляется, что наблюдаемые токовые неустойчивости могут быть объяснены возникновением в исследуемых образцах в сильных электрических полях акустоэлектрических доменов. Как уже отмечалось, GaAs является пьезоэлектриком, вследствие чего имеет место интенсивное взаимодействие электронов с акустическими фононами. Период осцилляций в наших образцах, составляющий 1 мкс, соответствует транспортной скорости  $3.6 \cdot 10^5$  см/с, что близко к скорости распространения поперечных акустических фононов в направлении [110]. Для эффективного взаимодействия электронов с акустической волной необходимо, чтобы эта волна создавала продольное электрическое поле, т.е. поле в направлении распространения волны. В GaAs и других полупроводниках с такой же кристаллической структурой имеются всего две волны такого типа: поперечная волна, поляризованная вдоль кристаллографического направления [001] и распространяющаяся вдоль направления [110], и продольная акустическая волна, распространяющаяся вдоль направления [111] [17]. В GaAs скорость распространения вышеупомянутых ТА-волны составляет  $3.35 \cdot 10^5$  см/с, а LA-волны —  $5.4 \cdot 10^5$  см/с [18]. В большинстве случаев имеет место возбуждение ТА-волны, которая лучше взаимодействует с носителями заряда из-за меньшей скорости. В работе [15] в гетероструктурах GaAs/AlGaAs возникновение токовых неустойчивостей наблюдалось, когда дрейфовая скорость носителей составляла  $10^6$ – $10^7$  см/с, т.е., как и в нашем случае, превышала примерно на порядок скорость ТА-волны.

Таким образом, по аналогии с токовыми неустойчивостями, наблюдавшимися в работе [15], естественно связать наблюдаемые нами осцилляции тока в гетероструктурах *n*-InGaAs/GaAs с квантовыми ямами и эпитаксиальных пленках *n*-GaAs с акустоэлектронной неустойчивостью. Во всех наших образцах, описанных



**Рис. 3.** Высокочастотные и низкочастотные осцилляции тока, измеренные в образце 4081  $T = 4.2$  К,  $l = 1$  мм.

выше, электрическое поле было приложено как раз в направлении [110], вдоль которого GaAs легко колется, что „автоматически“ задавало геометрию образцов и полосковых контактов. Для проверки гипотезы об „акустоэлектронном происхождении“ осцилляций из гетероструктур с одиночными (3732, 3734) и двойными (3735) квантовыми ямами (см. таблицу) были выколоты образцы прямоугольной формы как в направлении [110], так и в направлении [100]. В образце 3732 с низким уровнем легирования ( $n_s = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  на одну квантовую яму) осцилляции почти не наблюдались. При гелиевой и азотной температурах для этого образца наблюдалось ярко выраженное насыщение ВАХ, что можно связать с формированием неподвижного прианодного акустоэлектрического домена. Как видно из рис. 1 и 2, в более сильно легированных гетероструктурах 3734, 3735 при приложении электрического поля вдоль направления [110] наблюдались осцилляции тока с периодом около 1 мкс, соответствующим транспортной скорости  $3.5 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ , близкой к скорости распространения акустической ТА-волны. Однако в образцах, выколотых из тех же структур вдоль направления [100], период осцилляций увеличился примерно в 1.5 раза. Увеличение периода осцилляций естественно объяснить тем, что при  $\mathbf{E} \parallel [100]$  в кристалле по-прежнему возбуждаются акустические волны, распространяющиеся вдоль направления [110] под углом 45 градусов к направлению дрейфа электронов, что приводит к замедлению скорости движения домена в  $\sqrt{2}$  раз [19,20].

Возникающее в акустоэлектрических доменах сильное электрическое поле является, по-видимому, причиной поверхностного пробоя образцов, не позволяющей приложить к образцу поля напряженностью несколько киловольт на сантиметр, необходимые для реализации различных обсуждаемых механизмов создания инвертированных распределений носителей. Для уменьшения

вероятности пробоя нами были использованы более короткие образцы с расстоянием между контактами около 1 мм, измерения проводились на более коротких импульсах длительностью несколько десятых микросекунды. В образце 4081 при  $T = 4.2$  К нами впервые наблюдались токовые осцилляции двух типов [21]: низкочастотные, связанные с формированием в структуре движущихся акустоэлектрических доменов, как обычно, начинались в полях около 300 В/см; в полях 1.5 кВ/см возникали высокочастотные (около 150 МГц) осцилляции ганновского типа, соответствующие транспортной скорости электронов  $1.5 \cdot 10^7 \text{ см/с}$  (рис. 3). Высокочастотные осцилляции были „промодулированы“ акустоэлектрическими колебаниями. Одновременно с появлением высокочастотных осцилляций в структурах детектировалось интенсивное длинноволновое ИК излучение. При комнатной температуре акустоэлектрические колебания не возникали и наблюдались только высокочастотные осцилляции. В образце 4079 с меньшим легированием движущиеся акустоэлектрические домены не формировались, а в сильных полях наблюдались высокочастотные осцилляции. Относительно низкие значения приложенного электрического напряжения (около 1.5 кВ/см при  $T = 4.2$  К), при которых начинались ганновские осцилляции, можно объяснить неоднородным распределением поля в образце при наличии движущегося либо статического акустоэлектрического домена.

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе измерены ВАХ и получены осциллограммы импульсов тока образцов многослойных гетероструктур  $n$ -InGaAs/GaAs с квантовыми ямами и эпитаксиальных пленок  $n$ -GaAs с различным уровнем легирования. Показано, что при низких уровнях легирования ( $N_s \approx 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  для гетероструктур и  $N_s \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  для пленок GaAs) при  $T = 4.2$  и 77 К в полях порядка 300–400 В/см имеет место насыщение ВАХ. В более сильно легированных образцах в этих же условиях наблюдается возникновение осцилляций тока с периодом, соответствующим транспортной скорости  $(3-3.5) \cdot 10^5 \text{ см/с}$  при  $\mathbf{E} \parallel [110]$  и примерно в 1.5 раза большим при  $\mathbf{E} \parallel [100]$ . Полученные результаты объясняются возникновением в структурах соответственно статических и движущихся акустоэлектрических доменов за счет возбуждения горячими электронами поперечных ТА акустических волн, распространяющихся вдоль кристаллографического направления [110]. При значениях приложенного напряжения свыше 1.5 кВ/см в структурах развивались высокочастотные колебания, соответствующие транспортной скорости электронов  $1.5 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ , связываемые с образованием ганновских доменов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-02-16763), МНТЦ (проект № 2293), Министерства промышленности, науки и технологий РФ и ФЦП „Интеграция“.

## Список литературы

- [1] Z.S. Gribnikov, K. Hess, G.A. Kozinovsky. *J. Appl. Phys.*, **77** (4), 1337 (1995).
- [2] М.С. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991).
- [3] V.Ya. Aleshkin, A.A. Andronov, A.V. Antonov, N.A. Bekin, V.I. Gavrilenko, A.V. Muravev, S.G. Pavlov, D.G. Revin, V.N. Shastin, I.G. Malkina, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov. *Phys. Status Solidi (B)*, **204**, 563 (1997).
- [4] V.Ya. Aleshkin, A.A. Andronov, A.V. Antonov, N.A. Bekin, V.I. Gavrilenko, I.G. Malkina, D.G. Revin, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov. *Physica B*, **249–251**, 971 (1998).
- [5] V.Ya. Aleshkin, A.A. Andronov, A.V. Antonov, N.A. Bekin, A.V. Gavrilenko, V.I. Gavrilenko, D.G. Revin, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov, N.B. Zvonkov. *Inst. Phys. Conf. Ser. No 162*, IOP Publishing, 1999, p. 105.
- [6] В.Я. Алешкин, А.А. Андронов. *Письма ЖЭТФ*, **68**, 73 (1998).
- [7] В.Я. Алешкин, А.А. Андронов, А.А. Дубинов. *ФТП*, **37** (2), 224 (2003).
- [8] В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов. *ФТП*, **36** (6), 724 (2002).
- [9] V.Ya. Aleshkin, A.A. Andronov, A.V. Antonov, E.V. Demidov, A.A. Dubinov, V.I. Gavrilenko, D.G. Revin, B.N. Zvonkov, N.B. Zvonkov, E.A. Uskova, L.E. Vorobjev, D.A. Firsov, S.N. Danilov, I.E. Titkov, V.A. Shalygin, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov. *Proc. SPIE*, **4418**, 192 (2001).
- [10] Р.Х. Жукавин, С.Г. Павлов, В.Н. Шастин, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова. *Матер. совещ. „Нанопотоника“* (Н.Новгород, изд-во ИФМ РАН, 2000) с. 157.
- [11] А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова, М.Н. Винославский, П.А. Белевский, А.В. Кравченко. *Матер. совещ. „Нанопотоника“* (Н.Новгород, изд-во ИФМ РАН, 2002) с. 215.
- [12] В.М. Рысаков. *УФН*, **161** (12), 1 (1991).
- [13] В.М. Рысаков. *ФТТ*, **39** (5), 835 (1997).
- [14] Ю.К. Пожела. *Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках* (М., Наука, 1977) с. 163.
- [15] N. Balkan, V.K. Ridley, J.S. Roberts. *Superlat. Microstruct.*, **5** (4), 539 (1989).
- [16] V.Ya. Aleshkin, A.A. Andronov, A.V. Antonov, N.A. Bekin, V.I. Gavrilenko, D.G. Revin, E.R. Lin'kova, I.G. Malkina, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov. *Abstracts Int. Symp. Nanostructures* (St. Petersburg, Russia, 24–28 June 1996) p. 443.
- [17] V.K. Ridley. *Semicond. Sci. Technol.*, **3**, 542 (1988).
- [18] J. Blakemore. *J. Appl. Phys.*, **53**, R123 (1982).
- [19] А.В. Антонов, А.В. Гавриленко, В.И. Гавриленко, Е.В. Демидов, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова, М.Н. Винославский, П.А. Белевский, А.В. Кравченко. *Матер. совещ. „Нанопотоника“* (Н.Новгород, изд-во ИФМ РАН, 2003) т. 2, с. 215.
- [20] А.В. Антонов, А.В. Гавриленко, В.И. Гавриленко, Е.В. Демидов, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова, М.Н. Винославский, П.А. Белевский, А.В. Кравченко. *Изв. АН. Сер. физ.* **68** (1), 68 (2004).
- [21] А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, Е.В. Демидов, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова. *Матер. совещ. „Нанопотоника“* (Н.Новгород, изд-во ИФМ РАН, 2004) с. 195.

Редактор Л.В. Беляков

## Current oscillations under lateral transport in GaAs/InGaAs quantum well heterostructures

A.V. Antonov, V.I. Gavrilenko, E.V. Demidov, B.N. Zvonkov\*, E.A. Uskova\*

Institute for Physics of Microstructures  
of Russian Academy of Sciences  
603950 Nizhny Novgorod, Russia  
\* Physicotechnical Research Institute of NNSU,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** Current-voltage characteristics and current pulse oscillograms in multilayer *n*-InGaAs/GaAs quantum well heterostructures and *n*-GaAs epitaxial layers with different doping have been recorded. In the structures with low doping level the current saturation is shown to take place at electric fields about 300–400 V/cm. In highly doped samples the origin of current oscillations has been discovered, the oscillation period being corresponded to the drift velocity  $(3–3.5) \cdot 10^5$  cm/s at  $\mathbf{E} \parallel [110]$  and of about 1.5 times less at  $\mathbf{E} \parallel [100]$ . The results obtained are explained by formation of static and moving electro-acoustic domains in the structures. In the electric fields over 1.5 kV/cm high frequency Gunn-like oscillations have been observed, the oscillation frequency corresponding to the drift velocity  $1.5 \cdot 10^7$  cm/s.