

# Электронный транспорт и оптические свойства структур с нанонитями из атомов олова на вицинальных подложках GaAs<sup>1</sup>

© Р.А. Хабибуллин, А.Э. Ячменев, Д.В. Лаврухин, Д.С. Пономарев, А.С. Бугаев, П.П. Мальцев

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105 Москва, Россия

E-mail: khabibullin@isvch.ru

(Получена 13 января 2015 г. Принята к печати 20 апреля 2015 г.)

Проведено исследование электронного транспорта и оптических свойств в структурах с нанонитями из атомов олова (Sn-НН) на вицинальных подложках GaAs с углами разориентации 0.3 и 3° относительно точной ориентации (100). На вольт-амперных характеристиках образцов обнаружена анизотропия тока насыщения при протекании тока вдоль (ориентация  $\parallel$ ) и поперек (ориентация  $\perp$ ) Sn-НН: для гомоструктур отношение токов  $I_{\parallel}/I_{\perp} \approx 1.2$ , для РНЕМТ-структур  $I_{\parallel}/I_{\perp} \approx 2.5$ . В реальном масштабе времени проведены исследования колебаний тока в зависимости от тянущего напряжения и светового воздействия при протекании тока перпендикулярно Sn-НН. Показана явная анизотропия частотных характеристик РНЕМТ.

## 1. Введение

Структуры с пониженной размерностью электронного газа представляют повышенный интерес как с точки зрения изучения фундаментальных свойств полупроводников с квантово-размерными эффектами, так и с точки зрения повышения быстродействия приборов, изготовленных на базе таких структур, благодаря эффективному уменьшению температуры электронного газа и увеличению дрейфовой скорости носителей.

Фундаментальным механизмом, ограничивающим максимальное значение дрейфовой скорости электронов в полупроводниках, является их рассеяние на полярных оптических фононах (ПОФ). В работах [1,2] было теоретически рассмотрено взаимодействие электронного газа с ПОФ для двумерного (2D) и одномерного (1D) случаев. Показано, что 1D электронный газ имеет малые скорости поглощения ПОФ, а также особенности их испускания и, как следствие, более высокую дрейфовую скорость электронов по сравнению с 2D случаем. Таким образом, полупроводниковые приборы на основе материалов с 1D электронным газом будут обладать большим быстродействием. Применительно к полевому транзистору, улучшение частотных характеристик может быть достигнуто переходом от канала с 2D электронным газом к каналу с 1D электронным газом.

Существуют разные подходы по созданию полупроводниковых объектов с квази-1D электронным газом: самоорганизация нанонитей (НН) при росте напряженных эпитаксиальных слоев [3,4], рост НН с использованием затравок [5], использование селективной газофазной эпитаксии [6], специальная техника травления полупроводников [7].

<sup>1</sup> Посвящается светлой памяти Алексея Петровича Сеничкина, канд. техн. наук, основоположника тематики по созданию нанонитей из атомов олова на вицинальных поверхностях арсенида галлия.

В работах [8,9] теоретически была показана возможность реализации квази-1D электронных каналов при декорировании примесными атомами краев террас на вицинальной поверхности с последующим заравниванием образовавшихся нанонитей. Ранее [10,11] мы показали возможность изготовления структур на вицинальных подложках GaAs, содержащих массив НН из атомов олова (Sn-НН), встроенных в кристалл GaAs. Преимуществом данной технологии являются относительно простой способ изготовления и то, что в получаемых структурах формирование Sn-НН происходит вместе с остальными слоями в едином технологическом процессе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Кроме того, в данном случае возможна реализация РНЕМТ (pseudomorphic high electron mobility transistor) с пространственной модуляцией электронной плотности в квантовой яме (КЯ). В работе [12] расчетным путем показано, что если при модулированном легировании использовать систему заряженных нанонитей, то в КЯ максимум концентрации электронов будет иметь место вблизи заряженных нанонитей, а минимум — между двумя соседними нанонитями.

Целью данной работы является исследование электронного транспорта и оптических свойств в структурах с Sn-НН на вицинальных подложках GaAs. Ожидается, что формирование квази-1D каналов проводимости в исследуемых структурах приведет к анизотропии транспортных свойств в зависимости от направления протекания тока. В работе проводятся электрофизические измерения в слабых и сильных электрических полях при ориентации образцов для протекания тока вдоль (ориентация  $\parallel$ ) и поперек (ориентация  $\perp$ ) Sn-НН, исследуются оптические свойства с помощью спектроскопии фотолюминесценции, а также измеряются частотные характеристики РНЕМТ с профилем легирования в виде Sn-НН.

## 2. Изготовление экспериментальных образцов

Все образцы выращивались на установке Riber 32P методом МЛЭ. Использовались вицинальные подложки GaAs, разориентированные на углы, равные  $\theta = 0.3^\circ$  и  $3^\circ$  относительно точной ориентации (100) в направлении [011]. При такой разориентации вицинальная поверхность представляет собой террасы с ориентацией (100) с высотой краев, равной половине постоянной решетки GaAs,  $h = 2.8 \text{ \AA}$  и шириной  $d = 2.8 / \tan 0.3^\circ = 534.8 \text{ \AA}$  для  $\theta = 0.3^\circ$  и  $d = 53.4 \text{ \AA}$  для  $\theta = 3^\circ$ , т.е. соответственно существенно больше и меньше величины боровского радиуса мелкой донорной примеси, составляющей для атома олова  $\sim 100 \text{ \AA}$ . Подобрать условия легирования, можно добиться такого режима поверхностной сегрегации, при котором атомы олова будут преимущественно располагаться вдоль краев террас вицинальной поверхности. Экспериментально декорирование краев террас можно обнаружить с помощью дифракции быстрых электронов на отражении (ДБЭО) по расщеплению нулевого дифракционного рефлекса при нанесении на вицинальную поверхность  $\sim 0.1$  монослоя олова, что соответствует образованию новой дифракционной плоскости, наклонной относительно исходной сингулярной поверхности (100) и состоящей из атомов олова. Таким образом, Sn-НН представляют собой цепочку из атомов олова, ориентированную вдоль краев террас вицинальной грани арсенида галлия (см. рис. 1).

### 2.1. Формирование нанонитей олова Sn-НН в GaAs

Для создания атомарно-гладких террас на поверхности выращивали буферный слой нелегированного арсенида галлия толщиной  $\sim 0.6 \text{ мкм}$  при температуре  $580^\circ\text{C}$ . По завершении выращивания буферного слоя формировали исходную для последующего  $\delta$ -легирования поверхность, минимизируя количество островков на плоскостях атомных террас путем нанесения субмонослоев арсенида галлия с последующей выдержкой в потоке мышьяка при повышенных температурах. Таким образом добивались создания системы атомарно-гладких террас. Процесс получения гладких террас контролировали по изменению интенсивности зеркального рефлекса картины ДБЭО *in situ*.

После формирования террас проводилось  $\delta$ -легирование оловом при понижении температуры подложки  $T_d$ , что обеспечило наилучшую поверхностную миграцию для сегрегации атомов легирующей примеси вдоль краев террас. Поток атомов олова выбирался таким, чтобы получить необходимую концентрацию электронов за время легирования  $\sim 4$  мин. После окончания высаживания атомов олова подложку нагревали до температур, при которых диффузионная длина атомов олова сопоставима с шириной террас  $d = 534.8 \text{ \AA}$ . Также предполагалось,

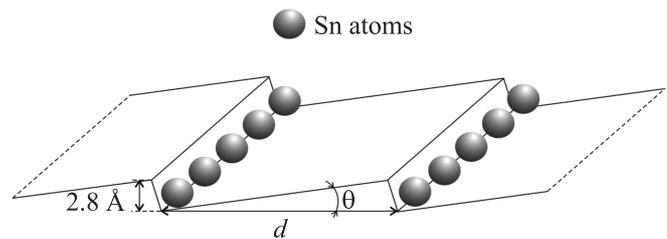


Рис. 1. Нанонити из атомов олова, ориентированные вдоль краев атомных террас вицинальной грани GaAs.

		PHEMT	
		$n^+$ -GaAs	15 nm
		$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	33 nm
		GaAs	1 nm
		GaAs	3 nm
homo		$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	4 nm
		$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	12 nm
		GaAs	600 nm
vicinal substrate		GaAs	vicinal substrate GaAs

←  $\delta$ -Sn

$\delta$ -Sn →

Рис. 2. Конструкция гомоэпитаксиальной и PHEMT-структур с  $\delta$ -легированием из атомов олова, образующих Sn-НН на гранях вицинальных террас.

что при повышенных температурах подложки реиспарение атомов олова с поверхности террас будет более интенсивным, чем с краев террас.

После формирования Sn-НН при  $\delta$ -легировании осуществляли их заращивание. Температура подложки при заращивании должна быть достаточно низкой, чтобы предотвратить сегрегацию олова в растущие слои, но выше температуры образования галлиевых вакансий, значительно уменьшающих концентрацию электронов проводимости. Для этого температура подложки  $T_s$  понижалась до значения, при котором еще обеспечивается гладкость и совершенство кристалла растущего слоя GaAs.

Конструкция исследуемых образцов гомоэпитаксиальных структур, содержащих нанонити из атомов олова, показана на рис. 2. Опорный образец 1 выращен на вицинальной подложке GaAs с  $\theta = 3^\circ$ , а образцы 2 и 3 с  $\theta = 0.3^\circ$ . Образцы 2 и 3 различаются температурой подложки при высаживании атомов олова:  $T_d = 580$  и  $610^\circ\text{C}$  соответственно.

### 2.2. PHEMT с легированием в виде нанонитей олова

Особенность технологии PHEMT-гетероструктур с КЯ  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  применительно к легированию в виде Sn-НН, заключается в использовании

соединения  $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$  для создания и легирования атомарно-гладких террас вицинальной поверхности. Поскольку диффузионная длина адатомов алюминия в десятки раз меньше размера террас, сформировать гладкие террасы в таком тройном соединении невозможно. Кроме того, эффективность легирования  $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$  оловом при низких температурах роста не изучалась. Исходя из этого использовали технологический прием, заключающийся во введении дополнительных слоев GaAs в область легирования (см. рис. 2), что позволило воспроизвести уже изученные в гомоэпитаксиальных системах условия для легирования оловом, а также повысить гладкость поверхности и эффективность легирования слоя  $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ .

Приемлемая гладкость тонкого слоя GaAs, выращенного на поверхности  $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ , контролируемая по интенсивности зеркального рефлекса ДБЭО, составила  $\sim 3$  нм. Для зарощивания высаженных атомов олова использовался слой GaAs толщиной  $\sim 3$  монослоя с последующим ростом тройного соединения с алюминием. Поскольку суммарная толщина легированного слоя GaAs достаточно мала, собственная проводимость данного слоя низкая.

Опорный РНЕМТ (образец 4) выращен на вицинальной подложке GaAs с  $\theta = 3^\circ$ , и в качестве легирующей примеси использовался кремний. Образцы РНЕМТ 5, 6 и 7 были выращены на GaAs с  $\theta = 0.3^\circ$  и различаются концентрацией легирования атомами олова  $N_d$  и температурой зарощивания нанонитей из атомов олова  $T_s$  (см. таблицу).

### 3. Результаты и обсуждения

#### 3.1. Электрофизические измерения в слабых электрических полях

Для выращенных образцов были проведены измерения эффекта Холла в геометрии Ван дер Пау при температуре 300 К. Результаты измерений (концентрации  $n_H$  и подвижности  $\mu_H$ ) приведены в таблице.

В гомоэпитаксиальных структурах зависимость электрофизических параметров от угла  $\theta$  разориентации подложки GaAs не наблюдалась. Увеличение температуры подложки при  $\delta$ -легировании оловом до  $T_d = 610^\circ C$  приводит к увеличению концентрации электронов  $n_H$ . Для всех гомоэпитаксиальных образцов подвижность электронов  $\mu_H$  примерно одинакова и имеет значение менее  $2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Для увеличения  $\mu_H$  необходимо использовать материалы с меньшей эффективной массой электронов, например InGaAs [13,14], и применять метод модулированного легирования, когда донорная примесь и электроны проводимости пространственно разделены.

Измерения электрофизических параметров РНЕМТ-структур показали, что уменьшение температуры зарощивания Sn-НН с 580 до  $500^\circ C$  при одинаковой концентрации легирования (образцы 5 и 6) приводит к

Технологические и электрофизические параметры структур

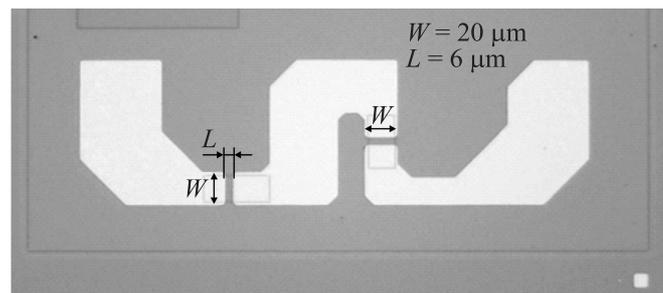
Номер образца	$\theta$ , град	$T_d$ , °C	$T_s$ , °C	$N_d$ , $\text{см}^{-2}$	$n_H$ , $\text{см}^{-2}$	$\mu_H$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
Гомоэпитаксиальные структуры						
1	3	610	470	$7.5 \cdot 10^{12}$	$3.1 \cdot 10^{12}$	1865
2	0.3	580	470	$7.5 \cdot 10^{12}$	$2.3 \cdot 10^{12}$	1740
3	0.3	610	470	$7.5 \cdot 10^{12}$	$2.7 \cdot 10^{12}$	1780
Гетероструктуры типа РНЕМТ						
4	3	610	580	$3.4 \cdot 10^{12}$ кремний	$2.1 \cdot 10^{12}$	5880
5	0.3	610	580	$1.48 \cdot 10^{13}$	$6.5 \cdot 10^{10}$	4900
6	0.3	610	500	$1.48 \cdot 10^{13}$	$9.4 \cdot 10^{11}$	5600
7	0.3	610	500	$2.96 \cdot 10^{13}$	$2.0 \cdot 10^{12}$	5540

*Примечание.* Параметры: угол разориентации вицинальной подложки GaAs  $\theta$ , температура подложки при высаживании атомов олова  $T_d$ , температура зарощивания нанонитей из атомов олова  $T_s$ , концентрация  $\delta$ -легирования оловом  $N_d$ , холловские концентрация  $n_H$  и подвижность  $\mu_H$  электронов при 300 К.

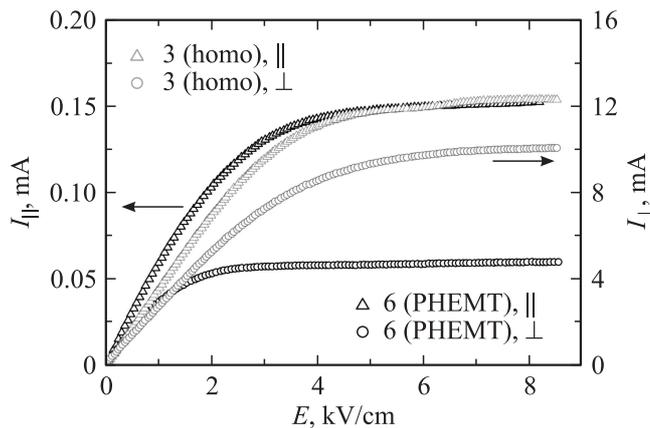
увеличению концентрации электронов  $n_H$  в КЯ. Таким образом, при уменьшении температуры зарощивания Sn-НН атомы олова подвержены меньшей диффузии и сегрегации в растущие слои. Увеличение концентрации легирования в 2 раза и использование оптимальных условий зарощивания (образец 7) приводят к получению электрофизических параметров, которые сравнимы с параметрами опорного образца 4.

#### 3.2. Электрофизические измерения в сильных электрических полях

Для проведения измерений в сильных электрических полях были изготовлены образцы со специальной топологией омических контактов для проведения измерений в двух ортогональных направлениях. Формирование омических контактов Ni/Ge/Au/Ni/Au включало в себя эспонирование на установке контактной прецизионной фотолитографии Suss MJB4, удаление резиста методом „взрыва“ (lift-off) и напыление металлов с последующим вжиганием в потоке газообразного азота. Топология контактов показана на рис. 3. Ширина контактов состав-



**Рис. 3.** Топология омических контактов для проведения измерений в двух перпендикулярных направлениях.



**Рис. 4.** ВАХ гомоэпитаксиального образца 3 и образца РНЕМТ 6 при протекании тока в направлении параллельно ( $\parallel$ ) и перпендикулярно ( $\perp$ ) Sn-НН при 300 К.

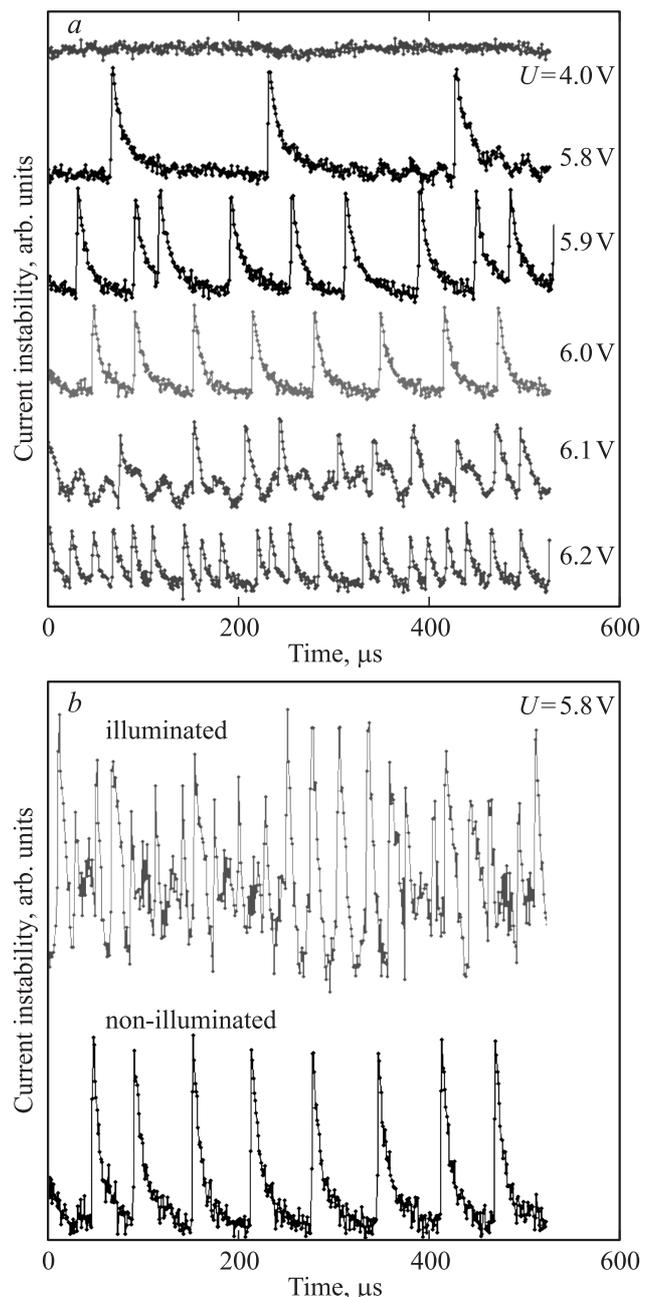
ляет  $W = 20$  мкм, расстояние между ними  $L = 6$  мкм. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились при температуре 300 К.

Для образца 1 при измерении ВАХ в геометрии протекания тока вдоль и поперек Sn-НН ( $I_{\parallel}$  и  $I_{\perp}$  соответственно) анизотропия не наблюдалась. Это связано с малым расстоянием между Sn-НН ( $\sim 5$  нм) и сильным перекрытием огибающих волновых функций. На ВАХ образца 3 хорошо различима анизотропия тока насыщения  $I_{\parallel}/I_{\perp} \approx 1.2$  (см. рис. 4), что позволяет говорить о наличии потенциального рельефа с выделенным направлением вдоль Sn-НН. При протекании тока вдоль Sn-НН в области напряженности электрического поля  $E = 5-7$  кВ/см присутствует перегиб кривой ВАХ перед областью насыщения. Обнаруженную область неустойчивости мы связываем с вовлечением в механизм проводимости носителей из локализованных состояний, возникающих при случайном распределении и внедрении атомов олова в кристаллическую решетку арсенида галлия. Отметим, что при протекании тока в перпендикулярном к Sn-НН направлении данная неустойчивость не наблюдается.

Измерения ВАХ для РНЕМТ-структур проводились для образца 6 с меньшей  $n_H$  по сравнению с образцом 7, что позволяет рассчитывать на увеличение анизотропии проводимости при протекании тока в ортогональных направлениях. На кривых ВАХ образца 6 (см. рис. 4) анизотропия тока насыщения  $I_{\parallel}/I_{\perp} \approx 2.5$  существенно превышает анизотропию, полученную в гомоэпитаксиальных структурах. Это может быть обусловлено тем, что в РНЕМТ-структурах с КЯ  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  при больших концентрациях атомов олова происходит модулирование электронной плотности квази-2D электронного газа, который распадается на систему изолированных квази-1D каналов проводимости [12].

Для гомоэпитаксиальной структуры (образец 3) был более подробно исследован электронный транспорт при протекании тока перпендикулярно Sn-НН. На рис. 5, а

приведены колебания тока образца 3 со временем выборки 1 мкс при различных напряжениях  $U$ , соответствующих различным напряженностям электрического поля ( $E = 10-15.5$  кВ/см). При  $E = 10$  кВ/см, соответствующей  $U = 4$  В, колебания тока отсутствуют. По мере увеличения  $E$  появляются характерные быстрые и короткие всплески тока с последующей релаксацией до исходного уровня постоянного тока. При этом частота всплесков растет с увеличением напряжения, а амплитуда всплесков уменьшается. Похожее поведение



**Рис. 5.** Колебания тока, проходящего через образец 3 в направлении перпендикулярно Sn-НН: *a* — при постоянном напряжении 4, 5.8, 5.9, 6, 6.1 и 6.2 В, *b* — при напряжении 5.8 В с освещением и без освещения.

наблюдалось в легированных сверхрешетках GaAs/AlAs, в которых получили осцилляции тока, связанные с пространственным движением границы домена через несколько периодов сверхрешетки [15].

Измерения образца 3 при освещении существенно меняют картину колебаний. На рис. 5, *b* приведены две кривые колебания тока при напряжении 5.8 В — без освещения и с освещением образца. При освещении образца средний период колебаний уменьшается с 170 до 20 мкс, увеличивается амплитуда колебаний, импульсный характер меняется на колебательный (форма колебаний при освещении образца близка к синусоидальной). Влияние освещения может быть следствием возбуждения носителей, локализованных в глубоком потенциальном рельефе, образованном атомами олова, и вовлечением их в механизм протекания тока.

### 3.3. Оптические свойства

Оптические свойства изготовленных структур исследовались методом спектроскопии фотолюминесценции при температуре 77 К. Для возбуждения люминесценции использовался He–Ne-лазер с длиной волны 632.8 нм и выходной мощностью  $P \approx 50$  мВт. Сканирование проводилось с использованием монохроматора МДР-23У. Для регистрации излучения применялся охлаждаемый ФЭУ-62 с рабочим диапазоном 1.2–1.9 эВ, что соответствует рекомбинации носителей в квантовой яме  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ .

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) исследуемых образцов приведены на рис. 6. В спектрах ФЛ гомоэпитаксиальных структур (образец 3 на рис. 4) наблюдается выраженный пик с энергией фотонов  $\hbar\omega = 1.51$  эВ, соответствующий излучательной рекомбинации носителей в GaAs [16]. Пик с  $\hbar\omega = 1.48$  эВ связан с излучательным экситонным переходом в GaAs.

В спектрах ФЛ образцов РНЕМТ наблюдаются особенности в области энергий 1.2–1.4 эВ. Опорный образец 4 показывает типичный для классических РНЕМТ-структур, легированных кремнием, спектр ФЛ, т. е. два пика от рекомбинации с двух уровней размерного квантования в КЯ с энергиями 1.26 и 1.34 эВ [17–19]. В спектре ФЛ образца 6 присутствует один слабый пик рекомбинации  $1e-1h$ , соответствующий разности энергий первых подзон размерного квантования электронов ( $1e$ ) и дырок ( $1h$ ). Отметим, что в образце 6 не наблюдается пик рекомбинации со второго уровня,  $2e-1h$ , что мы связываем с недостаточной концентрацией электронов в квази-1D каналах.

Спектр ФЛ образца 5 смещен в более высокоэнергетическую область по сравнению с  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ . Поскольку по конструкции и составу эта структура не отличается от образца 6, их энергетические диаграммы должны совпадать, чего не наблюдается. Можно сделать вывод, что повышенная температура зарастивания Sn-НН, которая применялась в образце 5, приводит к сегрегации атомов олова из  $\delta$ -слоя в растущие слои и

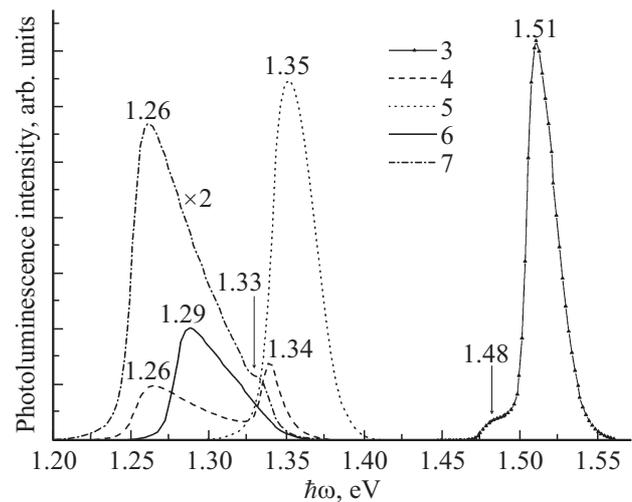


Рис. 6. Спектры фотолюминесценции гомоэпитаксиальных и РНЕМТ-образцов при 77 К. Номера образцов указаны. Отмечены основные особенности и приведены их энергии в эВ.

распределению их по толщине барьерного,  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , и контактного,  $n^+$ -GaAs, слоев. Это в свою очередь приводит к обеднению КЯ и возникновению излучательных центров рекомбинации с энергией  $< 1.5$  эВ. Наибольшую интенсивность имеет спектр образца 7 с полушириной пика 0.07 эВ и выраженным максимумом от второго уровня квантования (переходы  $2e-1h$ ), что свидетельствует о хорошем качестве гетероструктуры и оптимальном уровне легирования.

### 3.4. Измерения S-параметров РНЕМТ

Образец 7 с наилучшими электрофизическими параметрами был взят за основу для изготовления РНЕМТ. РНЕМТ был изготовлен по технологическому маршруту, включающему жидкостное травление меза-изоляции, омические контакты истока и стока и электронно-лучевые затворы вместе с контактными площадками. Пассивация затвора и дополнительная металлизация не проводились. Топология затвора — Т-образная, длина грибообразных затворов была равна 150 нм. Толщина металлизации омических контактов Ni/Ge/Au/Ni/Au составила  $\sim 300$  нм, затворной металлизации Ti/Pd/Au — 430 нм. Омические контакты вжигались в инертной атмосфере сухого азота при температуре 400 °С. Удельное контактное сопротивление составляло  $\sim 0.2$  Ом · мм. Измерения S-параметров транзисторов проводились на векторном анализаторе Agilent в диапазоне частот 0.1–67 ГГц. Напряжение смещения на затворе для всех транзисторов было равно  $-0.4$  В, напряжение на стоке составило 2 и 4 В.

Полученные частотные характеристики показывают явную анизотропию значений для ортогональных направлений протекания тока вдоль и поперек Sn-НН, что еще раз подтверждает ранее сделанный вывод о наличии потенциального рельефа в виде квази-1D каналов. Значения предельной частоты усиления по мощности  $f_{\max}$

составили 117 и 150 ГГц для транзисторов с ориентацией  $\perp$  и  $\parallel$  соответственно. Значения MSG (maximum stable gain) на частоте 10 ГГц равнялись 15.5 и 17.7 дБ для транзисторов с ориентацией  $\perp$  и  $\parallel$  соответственно. Улучшение частотных характеристик РНЕМТ при ориентации  $\parallel$  мы связываем с уменьшением рассеяния электронов на ПОФ при движении в направлении вдоль Sn-НН и, как следствие, с большей дрейфовой скоростью электронов в образовавшихся в КЯ квази-1D каналах проводимости. При этом стоит отметить, что за счет вариации толщины спейсерного слоя, пространственно разделяющего Sn-НН и КЯ, возможно получение более глубокой модуляции электронной плотности в КЯ, что приведет к большей анизотропии характеристик РНЕМТ в зависимости от его ориентации относительно Sn-НН, а также улучшит характеристики РНЕМТ с ориентацией  $\parallel$ .

#### 4. Заключение

На вольт-амперных характеристиках исследуемых образцов, изготовленных методом МЛЭ с профилем легирования в виде Sn-НН, обнаружена анизотропия тока насыщения  $I_{\parallel}/I_{\perp} = 1.2$  и  $2.5$  для гомоструктуры и РНЕМТ-структуры соответственно, что свидетельствует об образовании квази-1D каналов проводимости. Для гомоструктуры в реальном масштабе времени проведены исследования колебаний тока, зависящих от тянущего напряжения и светового воздействия, что подтверждает наличие более глубокого потенциального рельефа при протекании тока перпендикулярно Sn-НН. Показаны эффекты, возникающие при неоптимальном выборе условий зарастивания высаженных атомов олова: пик фотолюминесценции смещается в высокоэнергетическую область на 0.06 эВ, что может быть обусловлено сегрегацией атомов олова вследствие повышенной температуры зарастивания и распределения их в растущих слоях с образованием уровней излучательной рекомбинации в запрещенной зоне. Измерения динамических характеристик РНЕМТ показали анизотропию предельной частоты усиления по мощности ( $f_{\max}$ ): для РНЕМТ с ориентацией  $\parallel$   $f_{\max} = 150$  ГГц; для РНЕМТ с ориентацией  $\perp$   $f_{\max} = 117$  ГГц.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ № 14-29-00277 и РФФИ № 15-07-00110 А.

#### Список литературы

- [1] J.P. Leburton. *J. Appl. Phys.*, **56**, 2850 (1984).
- [2] U. Bockelmann, G. Bastard. *Phys. Rev. B*, **42** (14), 8947 (1990).
- [3] Z.C. Lin, W.H. Hsieh, C.P. Lee, Y.W. Suen. *Nanotechnology*, **18**, 075 403 (2007).
- [4] H. Li, T.D. Race, M.A. Hasan. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (8), 1367 (2002).
- [5] C. Thelander, L. Froberg, C. Rehnstedt, L. Samuelson, L. Wernersson. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **29** (3), 206 (2008).
- [6] K. Tomioka, M. Yoshimura, T. Fukui. *Nature*, **488**, 189 (2012).
- [7] X. Zhao, J. Alamo. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **35** (5), 521 (2014).
- [8] А.Я. Шик, Ю.В. Шмарцев. *ФТП*, **22** (6), 1091 (1988).
- [9] V. Anjos, A. Marletta. *J. Phys.: Condens. Matter*, **18**, 8715 (2006).
- [10] A.S. Bugaev, A.E. Yachmenev, A.P. Senichkin, A.N. Klochkov. Patent RU 2520538 C1 (2014).
- [11] A.P. Senichkin, A.S. Bugaev, A.E. Yachmenev. *J. Nano- and Microsystem Technique*, **11**, 52 (2012).
- [12] В.М. Осадчий. *ФТП*, **33** (10), 1229 (1999) [*Semiconductors*, **33** (10), 1119 (1999)].
- [13] V.A. Kulbachinskii, N.A. Yuzeeva, G.B. Galiev, E.A. Klimov, I.S. Vasilevskii, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 035 021 (2012).
- [14] Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Р.А. Хабибуллин, В.А. Кульбачинский, Н.А. Юзева. *ФТП*, **46** (4), 500 (2012) [*Semiconductors*, **46** (4), 484 (2012)].
- [15] J. Kastrup, R. Klann, H.T. Grahn, K. Ploog. *Phys. Rev. B*, **56**, 13761 (1995).
- [16] Д.В. Лаврухин, А.Э. Ячменев, А.С. Бугаев, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, П.П. Мальцев. *ФТП*, **49** (7), 932 (2015).
- [17] R.A. Khabibullin, I.S. Vasil'evskii, D.S. Ponomarev, G.B. Galiev, E.A. Klimov, L.P. Avakyantz, P.Yu. Bokon, A.V. Chervyakov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **345**, 012 015 (2012).
- [18] Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, В.П. Гладков, В.А. Кульбачинский, Н.А. Юзева. *ФТП*, **45** (5), 666 (2011). [*Semiconductors*, **45** (5), 657 (2011)].
- [19] Р.А. Хабибуллин, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский, В.А. Кульбачинский, П.Ю. Боков, Л.П. Авакянц, А.В. Червяков, П.П. Мальцев. *ФТП*, **47** (9), 1215 (2012) [*Semiconductors*, **47** (9), 1203 (2013)].

Редактор Л.В. Шаронова

#### Electron transport and optical properties of the structures with nanowires of tin atoms on vicinal GaAs substrates

R.A. Khabibullin, A.E. Yachmenev, D.V. Lavrukhin, D.S. Ponomarev, A.S. Bugayev, P.P. Maltsev

Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

**Abstract** Investigation of electron transport and optical properties of the structures with nanowires of tin atoms (Sn-NWs) on vicinal GaAs substrates, disoriented by 0.3 and 3° in relation to accurate orientation (100) presented. Anisotropy of the saturation current on current-voltage characteristics was obtained when current flew along ( $\parallel$  orientation) and across ( $\perp$  orientation) Sn-NWs: for homostructure  $I_{\parallel}/I_{\perp} \approx 1.2$ , for PHEMT structure  $I_{\parallel}/I_{\perp} \approx 2.5$ . Influence of the pulling voltage and light on the current oscillations in the real time was investigated when current flow was perpendicular to Sn-NWs. The evident anisotropy of the frequency characteristics for PHEMT was shown.