

УДК 538.91

**ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПРИБОРА PHEMT  
НА ОСНОВЕ GaAs С ПОМОЩЬЮ ПРОФИЛИРОВАННОГО  
ДЕЛЬТА-ЛЕГИРОВАНИЯ ОЛОВОМ**

**А.Э. Ячменев<sup>1,@</sup>**, научный сотрудник  
**В.И. Рыжий<sup>1</sup>**, д.т.н., главный научный сотрудник  
**П.П. Мальцев<sup>1,2</sup>**, д.т.н., профессор

<sup>1</sup>*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН),  
Москва, 117105 Россия*

<sup>2</sup>*Кафедра нанoeлектроники Физико-технологического института,  
Московский технологический университет, Москва, 119454 Россия*

*@Автор для переписки, e-mail: alex.svch@yandex.ru*

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии получены образцы структур типа PHEMT (*pseudomorphic high electron mobility transistor*) с профилем дельта-легирования в виде нанонитей из атомов олова на вицинальных подложках GaAs, разориентированных на 0.3 градуса относительно точной ориентации (100). Выполнено исследование электронного транспорта в таких структурах. Установлено, что неоптимальная температура роста закрывающих высаженных атомы олова слоев приводит к деградации электрофизических параметров образцов и предотвращает формирование одномерных каналов из атомов олова. На вольтамперных характеристиках образцов обнаружена анизотропия тока насыщения при протекании тока вдоль и поперек нанонитей, связанная с формированием квазиодномерного потенциального рельефа в дельта-слое. Изготовлены полевые транзисторы специальной топологии для протекания тока в ортогональных направлениях и измерены их частотные характеристики. Обнаружена сильная анизотропия частотных характеристик в зависимости от направления протекания тока. Для параллельного направления значение коэффициента усиления MSG (*maximum stable gain*) находится на уровне лучших GaAs PHEMT.

**Ключевые слова:** PHEMT, олово, нанонити, анизотропия, вольтамперные характеристики, полевой транзистор.

**GaAs PHEMT PERFORMANCE INCREASE USING DELTA-DOPING  
IN THE FORM OF NANOWIRES OF TIN ATOMS**

**A.E. Yachmenev<sup>1,@</sup>**,  
**V.I. Ryzhii<sup>1</sup>**,  
**P.P. Maltsev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, 117105 Russia*

<sup>2</sup>*Moscow Technological University, Moscow, 119454 Russia*

*@Corresponding author e-mail: alex.svch@yandex.ru*

The PHEMT epitaxial structures with a doping profile in the form of tin nanowires were fabricated using vicinal GaAs substrate disoriented by  $0.3^\circ$  in relation to accurate orientation (100). Investigation of electron transport properties of the structures with nanowires of tin atoms on vicinal GaAs substrates have been presented. It was determined that non-optimal growth temperature of cap layers leads to degradation of electrophysical parameters of the samples and prevent forming of tin one-dimensional channels. Anisotropy of the saturation current on current–voltage characteristics was obtained when current flow along and across nanowires. Field effect transistors with special topology for orthogonal current flow were fabricated and frequency characteristics were measured. The evident anisotropy of the frequency characteristics for PHEMT was shown. Gain coefficient MSG (Maximum Stable Gain) of the fabricated PHEMT for current flow along nanowires correlates to best-achieved values of MSG for GaAs PHEMT.

**Keywords:** PHEMT, tin, nanowires, anisotropy, current-voltage characteristic, field-effect transistor.

### Введение

Увеличение частотных параметров полевых транзисторов является одной из приоритетных задач развития современной полупроводниковой СВЧ-электроники. К настоящему времени достигнуты практически предельные значения параметров, определяющих быстродействие приборов: длина затвора транзистора, составляющая 20 нм [1, 2] и расстояние от затворного электрода до канала для уменьшения короткоканальных эффектов, составляющее всего 2 нм [3]. Дальнейшее повышение частотных параметров возможно с помощью совершенствования технологии изготовления [4], а также квантовой инженерии конструкции структуры, позволяющей получить новые свойства в канале прибора. Таким образом, структуры с пониженной размерностью электронного газа представляют повышенный интерес не только с точки зрения изучения фундаментальных свойств полупроводников с квантово-размерными эффектами. Они важны и с позиции 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). Как было показано в [5, 6], где рассматривалась теория взаимодействия электронного газа с ПОФ для двумерного и одномерного случаев, одномерный электронный газ имеет малые скорости поглощения ПОФ и, следовательно, более высокую дрейфовую скорость электронов по сравнению с двумерным случаем за счет уменьшения междолинного рассеяния. Следовательно, для улучшения частотных характеристик полевого транзистора необходимо изменить конструкцию структуры для формирования одномерных каналов или нанонитей вместо двумерного электронного газа.

Существуют различные методы создания полупроводниковых объектов с квазиодномерным электронным газом: самоорганизация нанонитей при росте напряженных эпитаксиальных слоев [7], рост нанонитей с использованием затравок [8], специальная техника травления полупроводников [9]. Ранее была показана возможность изготовления структур на вицинальных подложках GaAs, содержащих систему нанонитей из атомов

олова, встроенных в кристалл GaAs [10, 11]. Нанонити или квазиодномерные каналы в данном случае образуются за счет декорирования атомами олова краев вицинальных террас. Преимуществом данной технологии является возможность перехода от гомоэпитаксиальных структур к быстродействующим структурам типа PHEMT (*pseudomorphic high electron mobility transistor*) с модулированным легированием, в которых дельта-слой будет иметь профиль легирования в виде нанонитей из атомов олова. В работе [12] расчетным путем показано, что если при модулированном легировании дельта-легированный слой будет представлять собой систему заряженных нанонитей, то в квантовой яме максимум концентрации электронов будет соответствовать центру нанонити, а минимум – располагаться между двумя соседними нанонитями, что означает пространственную модуляцию электронной плотности в квантовой яме.

Цель настоящей работы – установление особенностей электронного транспорта в эпитаксиальных PHEMT-структурах с профилем дельта-легирования в виде нанонитей из атомов олова на вицинальных подложках GaAs и выявление влияния модуляции двумерного электронного газа в канале на СВЧ-характеристики полевого транзистора. Ожидается, что формирование квазиодномерных каналов проводимости в исследуемых структурах приведет к анизотропии транспортных свойств в зависимости от направления протекания тока и увеличению СВЧ-характеристик при протекании тока параллельно нанонитям.

### **Экспериментальная часть**

Все образцы выращивали на установке Riber 32P методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Использовали вицинальные подложки GaAs, разориентированные на  $0.3^\circ$  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 террасы  $d = 2.8/\text{tg}0.3^\circ = 534.8 \text{ \AA}$ . Путем подбора условий легирования можно добиться такого режима поверхностной сегрегации, при котором атомы олова будут преимущественно располагаться вдоль краев террас вицинальной поверхности. Таким образом, нанонити представляют собой систему цепочек из атомов олова, ориентированных вдоль краев террас вицинальной грани GaAs. Подробно методика формирования нанонитей описана в [10, 11]. Конструкция эпитаксиальных слоев изготовленных PHEMT-структур представлена на рис. 1. Основной трудностью при изготовлении PHEMT с использованием олова являются неизученная эффективность легирования оловом слоев AlGaAs и необходимость получения максимально гладкой поверхности перед осаждением атомов олова. Эффективным решением является использование прослоек из нескольких монослоев GaAs перед дельта-слоем и после него. Были изготовлены 3 образца, отличающиеся концентрацией легирования и температурой роста закрывающих слоев после дельта-слоя, различия приведены в таблице.

### **Результаты и их обсуждение**

В работе выполнены электрофизические измерения в слабых и сильных электрических полях при ориентации контактов для протекания тока вдоль (ориентация  $\parallel$ ) и поперек (ориентация  $\perp$ ) нанонитей, а также измерены частотные характеристики изготовленных PHEMT с профилем дельта-легирования в виде нанонитей.

n+ GaAs : Si	15 нм	контактный слой
Al <sub>0,24</sub> Ga <sub>0,76</sub> As	33 нм	барьерный слой
GaAs	1 нм	вставка
δ-Sn	<i>см. таблицу</i>	дельта-легированный слой
GaAs	3 нм	вставка
Al <sub>0,24</sub> Ga <sub>0,76</sub> As	4 нм	спейсерный слой
In <sub>0,2</sub> Ga <sub>0,8</sub> As	12 нм	канальный слой
GaAs	600 нм	буферный слой

Видиальная подложка GaAs

**Рис. 1.** Конструкция образцов РНЕМТ-структур с профилем дельта-легирования в виде нанонитей.

Результаты измерения эффекта Холла показали (таблица), что при повышенной температуре роста закрывающих слоев происходит реиспарение и сегрегация атомов олова в растущие слои, что хорошо видно по резко упавшей концентрации носителей в образце В. Образец С с повышенной концентрацией легирования и оптимальной температурой роста закрывающего слоя имеет электрофизические параметры, сравнимые с классическими РНЕМТ-структурами с легированием кремнием.

Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проводили на образце А с омическими контактами специальной топологии для протекания тока в ортогональных направлениях. Коэффициент анизотропии тока насыщения, определяемый из кривых ВАХ как  $k_a = I_{||}/I_{\perp} \approx 2.5$ , почти в два раза превышает  $k_a$  в гомоэпитаксиальных структурах. По всей видимости, это обусловлено тем, что в РНЕМТ-структурах с квантовой ямой двумерный электронный газ распадается на систему квазиодномерных каналов проводимости [12] из-за ионизированных атомов олова в дельта-слое, располагающихся в виде характерных нанонитей.

Измерение эффекта Холла в изготовленных образцах

Образец	$T$ роста закрывающих слоев, °С	$n$ легирования, $\cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$	$\mu_n$ при 300 К, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$n_H$ при 300 К, $\text{см}^{-2}$
А	500	1.48	5600	$9.4 \cdot 10^{11}$
В	580	1.48	4900	$6.5 \cdot 10^{10}$
С	500	2.96	5540	$2 \cdot 10^{12}$

За основу для изготовления РНЕМТ взят образец С с наилучшими электрофизическими параметрами. Использовали специальную топологию полевых транзисторов двух ориентаций для протекания тока в ортогональных направлениях. Длина затворов была равна 150 нм. Удельное сопротивление омических контактов составляло  $\sim 0.2 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$ . Измерения S-параметров транзисторов проводили на векторном анализаторе Agilent в диапазоне частот 0.1–67 ГГц. Напряжение смещения на затворе для всех транзисторов было равно  $-0.4 \text{ В}$ , напряжение на стоке составляло 2 и 4 В.

Измеренные СВЧ-характеристики транзисторов представлены на рис. 2. Они показывают явную анизотропию значений для ортогональных направлений протекания тока

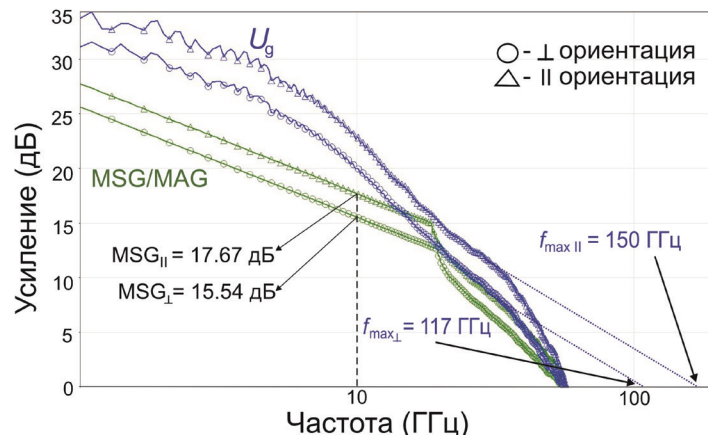


Рис. 2. Измеренные зависимости  $f_{max}$  и MSG для ортогональных направлений протекания тока.

вдоль и поперек нанонитей из атомов олова, что еще раз подтверждает ранее сделанный вывод о наличии потенциального рельефа в виде квазиодномерных каналов. Значения предельной частоты усиления по мощности  $f_{max}$  составили 117 и 150 ГГц для транзисторов с ориентацией для протекания тока  $\perp$  и  $\parallel$  нанонитям, соответственно. Значения коэффициента усиления MSG (*maximum stable gain*) на частоте 10 ГГц равнялись 15.5 и 17.7 дБ для  $\perp$  и  $\parallel$  направления. Улучшение частотных характеристик РНЕМТ при  $\parallel$  ориентации может быть связано с уменьшением рассеяния электронов на ПОФ при движении в направлении вдоль нанонитей и, как следствие, с большей дрейфовой скоростью электронов вдоль квазиодномерных каналов проводимости. При этом стоит отметить, что полученные значения MSG для параллельного направления находятся на уровне лучших классических РНЕМТ на GaAs с планарным легированием кремнием [13]. Они уступают лишь приборам, изготовленным на GaAs с использованием технологии метаморфного буфера, позволяющей повысить содержание индия в канальном слое InGaAs до 53% [14]. Это говорит о перспективности предлагаемого метода увеличения быстродействия приборов с помощью создания потенциального рельефа в виде квазиодномерных каналов из атомов олова в дельта-слое.

Одним из возможных направлений его дальнейшего развития является формирование нанонитей из атомов олова в РНЕМТ-структурах с метаморфным буфером на базе GaAs, что, по нашему мнению, позволит довести частотные характеристики GaAs РНЕМТ до уровня приборов, изготовленных на основе InP.

### Заключение

Измерены вольтамперные характеристики образцов РНЕМТ-структур, изготовленных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с профилем дельта-легирования в виде нанонитей из атомов олова и обнаружена анизотропия тока насыщения с коэффициентом  $k_a = I_{\parallel}/I_{\perp} \sim 2.5$ . Он в два раза превышает  $k_a$  в гомоэпитаксиальных структурах и свидетельствует об образовании квазиодномерных каналов проводимости. Измерения динамических характеристик полевых транзисторов специальной топологии также показали сильную анизотропию параметров: величина предельной частоты усиления по мощно-

сти  $f_{\max}$  составила 150 ГГц, а коэффициент усиления MSG на 10 ГГц составил 17.7 дБ для направления протекания тока параллельно нанонитям;  $f_{\max} = 117$  ГГц и  $MSG = 15.5$  дБ для перпендикулярного направления. Высокие значения характеристик для параллельного направления протекания тока позволяют ожидать дальнейшее увеличение быстродействия при переносе технологии формирования квазиодномерного потенциального рельефа в дельта-легированном слое на метаморфные структуры с повышенным содержанием индия на подложках GaAs.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).*

### Литература:

1. Lee D., Liu Z., Palacios T. GaN high electron mobility transistors for sub-millimeter wave applications // *Jap. J. Appl. Phys.* 2014. V. 53. № 10. P. 100212.
2. Huang T., Liu Z., Zhu X. DC and RF performance of gate-last AlN/GaN MOSHEMTs on Si with regrown source/drain // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2013. V. 60. № 10. P. 3019–3024.
3. Dae-Hyun K., Brar B., del Alamo J.  $f_T=688$  GHz and  $f_{\max}=800$  GHz in  $L_G=40$  nm  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  MHEMTs with  $g_{m,\max} > 2.7$  mS/ $\mu\text{m}$  // *IEEE Int. Electron Devices Meeting. USA. Washington, DC. 5–7 Dec. 2011.* P. 13.6.1–13.6.4 (<http://www.ieee-iedm.org>).
4. Федоров Ю.В., Михайлович С.В. Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // *Нано- и микросистемная техника.* 2016. Т. 18. № 4. P. 217–223.
5. Leburton J. Size effects on polar optical phonon scattering of 1-D and 2-D electron gas in synthetic semiconductors // *J. Appl. Phys.* 1984. V. 56. P. 2850–2855.
6. Bockelmann U., Bastard G. Phonon scattering and energy relaxation in two-, one-, and zero-dimensional electron gases // *Phys. Rev. B.* 1990. V. 42(14). P. 8947–8951.
7. Lin Z.C., Hsieh W.H., Lee C.P., Suen Y.W. Mobility asymmetry in InGaAs/InAlAs heterostructures with InAs quantum wires // *Nanotechnology.* 2007. № 18. P. 075403-1–075403-3.
8. Thelander C., Froberg L., Rehnstedt C., Samuelson L., Wernersson L. Vertical enhancement-mode InAs nanowire field-effect transistor with 50-nm wrap gate // *IEEE Electron. Dev. Lett.* 2008. № 29 (3). P. 206–208.
9. Zhao X., Alamo J. Nanometer-scale vertical-sidewall reactive ion etching of InGaAs for 3-D III-V MOSFETs // *IEEE Electron. Dev. Lett.* 2014. № 35 (5). P. 521–523.
10. Сенечкин А.П., Бугаев А.С., Ячменев А.Э., Клочков А.Н. Наноразмерная структура с квазиодномерными проводящими нитями олова в решетке GaAs: пат. 2520538 Рос. Федерация. № 2012146629/28; заявл. 02.11.2012; опубл. 27.06.2014. Бюл. № 18.
11. Сенечкин А.П., Бугаев А.С., Ячменев А.Э. Особенности вольт-амперных характеристик системы нанонитей из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия // *Нано- и микросистемная техника.* 2012. № 11. P. 52–54.
12. Осадчий В.М. Моделирование распределения электронов в структурах AlGaAs/GaAs ( $\delta$ -Si), выращенных на vicинальных поверхностях // *ФТП.* 1999. № 33 (10). P. 1229–1231.
13. Hsi-Tsung L., Chao-Hong C., Shih-Chun L., I-Te C., Wen-Kai W., Shinichiro T. 6 Inch

0.1  $\mu\text{m}$  GaAs pHEMT technology for E/V band application // CS MANTECH Conference. 2011. May 16–19. Palm Springs, California. USA (<http://www.csmantech.org/>).

14. High-performance 150 nm mHEMT on GaAs grown using MOCVD // Semiconductor TODAY. 2011. № 6 (6). P. 80–81.