

## Исследование электрических свойств одиночных (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов

© А.Д. Буравлев\*<sup>¶</sup>, Н.В. Сибирев\*<sup>♦</sup>, Е.П. Гильштейн\*<sup>+</sup>, П.Н. Брунков\*<sup>+</sup>, И.С. Мухин\*<sup>•</sup>,  
М. Tchernycheva<sup>■</sup>, А.И. Хребтов<sup>+</sup>, Ю.Б. Самсоненко\*<sup>•</sup>, Г.Э. Цырлин\*<sup>♦</sup>

\* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>+</sup> Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр  
нанотехнологий Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>•</sup> Институт аналитического приборостроения Российской академии наук,  
190103 Санкт-Петербург, Россия

<sup>♦</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504 Санкт-Петербург, Россия

<sup>■</sup> Institut d'Electronique Fondamentale UMR CNRS 8622, Université Paris Sud 11,  
91405 Orsay Cedex, France

(Получена 17 июля 2013 г. Принята к печати 19 августа 2013 г.)

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии синтезированы массивы (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов. Использование электронно-лучевой литографии позволило создать электрические контакты к одиночным нитевидным нанокристаллам. Изучено влияние температуры отжига на свойства контактов. Определена оптимальная температура отжига, равная 160°C. Обнаружено, что повышение температуры отжига ведет к деградации структур. На основании исследования вольт-амперных характеристик одиночных нитевидных наноструктур был определен ряд их электрофизических параметров, таких как удельное сопротивление и подвижность носителей заряда.

### 1. Введение

Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК) в последнее время стали объектом пристального внимания с точки зрения их потенциальных приборных применений. На сегодняшний день уже продемонстрированы различные прототипы приборных структур, использующих в качестве активных элементов как массивы, так и одиночные полупроводниковые ННК. Так, например, были созданы прототипы полевых транзисторов различных конфигураций [1–4], солнечных элементов [5–7], наносенсоров [8,9] и т.д., сделанных на основе полупроводниковых ННК.

Очевидно, что для создания большинства подобных приборов необходимо проводить легирование ННК. Однако это является нетривиальной задачей, поскольку в отличие от объемных полупроводниковых материалов при росте ННК часто используют катализаторы, что существенно усложняет процесс контролируемого легирования ННК. Даже в случае так называемого самокаталитического роста ННК, т.е. с использованием в качестве катализатора материала, входящего в состав ННК [10], достаточно сложно предопределить их электрофизические свойства. Пока нет и четкого понимания о распределении примеси в ННК. Неясно, находится ли примесь только в приповерхностном слое или, наоборот, происходит равномерное легирование объема ННК (следует отметить, что вышесказанное относится к процессам легирования при росте ННК, а не к ионной имплантации, например, [11]).

В связи с этим изучение электрических свойств ННК является очень важной задачей. Однако с ее решением также связан целый ряд проблем, которые обусловлены не только необходимостью формирования омических контактов к ННК, имеющим размер поперечного сечения порядка от 20 до 150 нм и длину от сотен нм до нескольких мкм, но и зачастую методиками как измерения, так и обработки полученных результатов. Так, например, традиционное определение концентрации свободных носителей заряда в объемных полупроводниках основано на использовании метода Холла. Применение данного прямого подхода для изучения свойств таких квазиодномерных структур, как ННК, сильно затруднено из-за их геометрической формы. Тем не менее подобные измерения уже были успешно проведены благодаря созданию уникальных контактов с помощью электронно-лучевой литографии [12–14].

Особую ценность могут представлять результаты измерений электрофизических свойств ННК на основе новых материалов, так называемых разбавленных магнитных полупроводников (РМП). Известно, что полупроводники являются немагнитными соединениями, однако при добавлении небольшого числа магнитных атомов, например Mn, они могут проявлять магнитные свойства. Было показано, что магнитными свойствами подобных РМП можно управлять путем приложения внешнего электрического поля [15]. По сути использование данных материалов открывает широкие возможности для создания принципиально новых приборов спинтроники и наноэлектроники.

В свою очередь ННК на основе РМП типа (Ga,Mn)As уже были выращены с помощью молекулярно-пучковой

<sup>¶</sup> E-mail: bour@mail.ioffe.ru

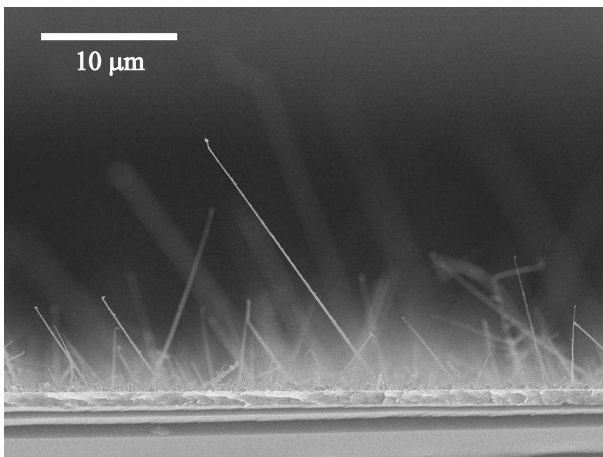


Рис. 1. РЭМ изображение скола образца с ННК (GaMn)As.

эпитаксии (МПЭ) с использованием разных технологических подходов [16–20].

Данная работа посвящена изучению электрофизических свойств одиночных (Ga,Mn)As ННК, синтезированных с помощью МПЭ.

## 2. Экспериментальные методы

### 2.1. МПЭ рост (Ga,Mn)As ННК

Рост (Ga,Mn)As ННК выполнялся на установке молекулярно-пучковой эпитаксии ЭП1203 по оригинальной методике, подробно описанной в [19,20], на подложках GaAs с кристаллографической ориентацией (001) и (111)В. В качестве катализатора роста был использован Mn. Температуры эффузионных ячеек, используемых в экспериментах, были постоянными и составляли для ячейки галлия 1000°C, мышьяка — 373°C и марганца — 700°C. Рост осуществлялся в течение 1 ч при температуре 450°C.

Исследование морфологических свойств образцов, проведенное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Zeiss Supra 25, показало, что выращенные (Ga,Mn)As ННК имеют характерную длину порядка 3 мкм и диаметр от 50 до 100 нм (см. рис. 1). При этом длина некоторых ННК достигала порядка 20 мкм. Поверхностная плотность ННК составляет примерно  $10^8 \text{ см}^{-2}$ . Ранее было показано, что подобные ННК имеют преимущественное направление роста вдоль эквивалентных направлений типа  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 300 \rangle$  [20].

### 2.2. Формирование контактов

Нанесение металлических контактов к одиночным ННК осуществлялось в несколько этапов. На первом этапе производилась подготовка подложки, на которую планировалось переносить одиночные ННК. Для этого на подложку Si(001) *n*-типа с осажденным термическим слоем диоксида кремния толщиной 300 нм с помощью

фотолитографии наносились большие контактные площадки  $300 \times 300 \text{ мкм}$  с протяженными контактами и упорядоченный массив маркеров — крестов  $5 \times 5 \text{ мкм}$  (задающих систему координат на подложке) титана–золота толщиной 5 и 100 нм соответственно.

Далее (Ga,Mn)As ННК переносились с подложки, на которой были выращены, на подготовленную вышеописанным способом подложку Si. Для этого образец с выращенными ННК помещался в пробирку с этанолом и подвергался ультразвуковому воздействию. В результате ННК отламывались у поверхности подложки и диспергировались в этаноле. Затем подложка уже без ННК удалялась, а капля раствора переносилась в область с маркерными метками подготовленной на первом этапе подложки Si. После испарения этанола положение одиночных ННК относительно меток определялось с помощью РЭМ.

На последнем этапе производилось нанесение контактов, соединяющих ННК и контактные площадки, с помощью метода электронно-лучевой литографии на установке Raith 150. Для формирования профиля контактов использовался стандартный электронный резист полиметилметакрилат (PMMA) А6. Оптимальная доза была подобрана экспериментально на тестовых образцах и составила  $300 \text{ мкКл/мкм}^2$ . Для проявления экспонированного резиста использовался стандартный проявитель — смесь метилизобутилкетона (MIBK) и IPA в соотношении 1 : 3 (время проявления 1.5 мин). Выбранные параметры обеспечивали вертикальность стенок проявленного резиста. Последующее нанесение слоя 25 нм Ni, 25 нм Pd и 200 нм Au осуществлялось с помощью электронного распыления в вакууме. Для пространственной равномерности нанесения слоев металлов осуществлялось вращение стола с образцами. Суммарная толщина осажденных металлов в 3 раза превосходила диаметр ННК и при этом составляла половину толщины электронного резиста. Для предотвращения разрыва металла в области контакта с ННК напыление никеля, палладия и первых 50 нм золота проходило при наклоне образца относительно источника металла под углом  $30^\circ$ .

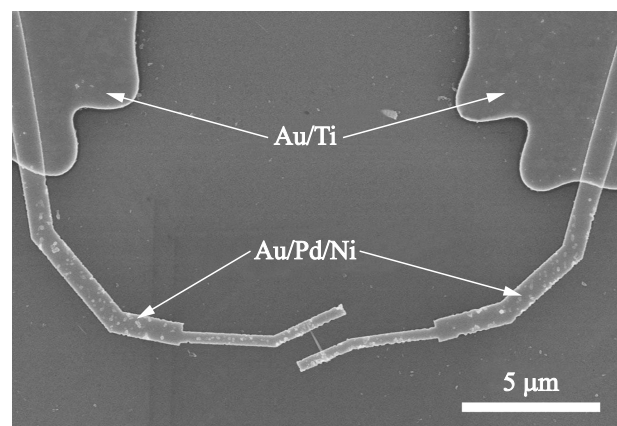


Рис. 2. РЭМ изображение одиночного ННК с контактами (GaMn)As.

Процесс удаления резиста для формирования контактов проводился в ацетоне с последующей промывкой в деионизованной воде и IPA, без какого-либо механического воздействия на структуру.

На рис. 2 представлено изображение, полученное с помощью РЭМ (Ga,Mn)As ННК с нанесенными контактами.

Автоматизированные измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) одиночных ННК (Ga,Mn)As осуществлялось двухконтактным способом с помощью зондовой установки на основе пикоампертера Keithley при комнатной температуре.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены ВАХ одиночного ННК, которые были получены как при комнатной температуре, так и после отжига в атмосфере азота при разных температурах. ВАХ при комнатной температуре проявляет пороговый характер, что может быть обусловлено формированием на границе металл–ННК барьера Шоттки. Хорошо известно, что при термической обработке обычно происходит уменьшение высоты барьера Шоттки и улучшение однородности контактов. Поэтому было решено произвести процедуру термического отжига образца в атмосфере азота. Время отжига составляло 20 мин. После завершения процесса отжига измерялась ВАХ, и процесс повторялся снова. В результате было обнаружено, что с увеличением температуры отжига сначала наблюдался рост проводимости образца, а затем ее уменьшение (см. рис. 3).

Известно, что температура ферромагнитного упорядочения соединения (Ga,Mn)As зависит от процедуры постростового отжига. При наиболее часто используемом низкотемпературном режиме МПЭ роста тонких пленок подобных соединений могут образовываться дефекты типа „Mn в междоузлии“, концентрация которых

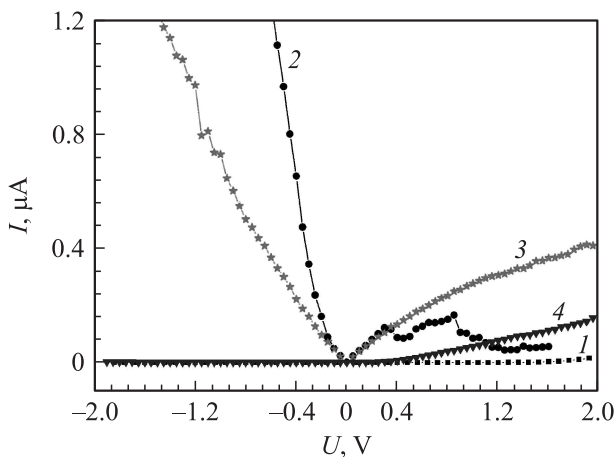


Рис. 3. ВАХ одиночного ННК, полученные при комнатной температуре (кривая 1) и после отжига при 175 (кривая 2), 200 (кривая 3), 300°С (кривая 4).

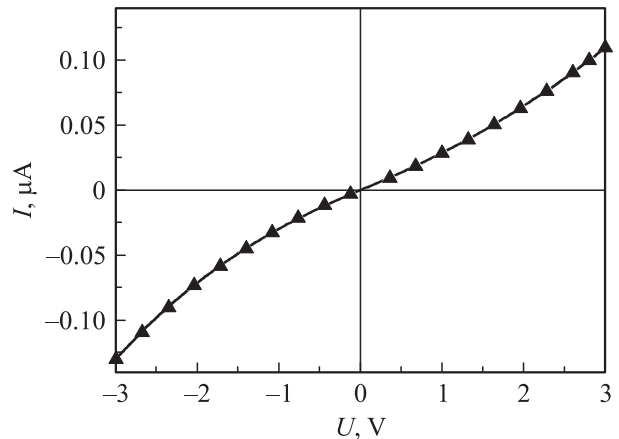


Рис. 4. ВАХ одиночного ННК (Ga,Mn)As: сплошная линия — эксперимент, символы — теоретическая кривая.

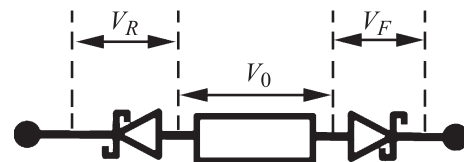


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема ННК с нанесенными металлическими контактами.

может быть уменьшена при термическом отжиге [21]. Температура отжига обычно варьируется в диапазоне 150–200°С. При увеличении температуры может наблюдаться деградация свойств пленок на основе данных соединений РМП. При температурах порядка 400°С возрастает потенциальная возможность полного распада подобных соединений [22]. Следовательно, изменение транспортных свойств ННК с ростом температуры также, вероятнее всего, взаимосвязано с деградацией или образованием дефектов внутри ННК.

Основываясь на полученных результатах, был сделан вывод о том, что наиболее оптимальным является низкотемпературный отжиг.

На рис. 4 показана ВАХ одиночного ННК (Ga,Mn)As, полученная после термического отжига в азотной атмосфере при температуре 160°С. Видно, что ВАХ имеет достаточно линейный и симметричный характер.

Для теоретического описания полученной вольт-амперной характеристики мы воспользовались моделью, ранее предложенной в работах [23,24]. По сути ННК с двумя нанесенными металлическими контактами можно рассматривать в виде эквивалентной схемы с двумя включенными навстречу диодами, между которыми находится сопротивление, определяемое свойствами ННК (см. рис. 5). Характеристики диодов напрямую зависят от контактов металл–ННК, т.е. в первую очередь от высоты и формы барьеров Шоттки, образовавшихся на границе металл–полупроводник. В зависимости от приложенного напряжения диод Шоттки может работать в режиме либо термополевой эмиссии, либо термо-

электронной полевой эмиссии [23–25]. В [26] была предложена модель, включающая в себя оба этих случая.

В свою очередь в работе [27] на основании проведенных расчетов было показано, что при выполнении условия (1) доминирует термоэлектронная полевая эмиссия, если же данное условие не соблюдается, то тогда главную роль играет термоэлектронная эмиссия:

$$\frac{\cosh^2(qE_{00}/kT)}{\sinh^3(qE_{00}/kT)} < \frac{2V_d}{3E_{00}}, \quad (1)$$

$$E_{00} = \frac{\hbar}{2} = \left( \frac{N_d}{m^* \varepsilon_s \varepsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$V_d = \frac{\phi_b}{q} - \xi - V. \quad (3)$$

Здесь  $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона;  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана;  $\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка;  $m^*$  — эффективная масса (в нашем случае была взята величина тяжелой дырки в направлении [111] GaAs, равная 0.60 [28]);  $N_d$  — концентрация дырок;  $\varepsilon_s$  — относительная диэлектрическая проницаемость (для GaAs ее значение равно 13 [28]);  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  $\phi_b$  — эффективная высота барьера (в наших расчетах мы использовали значение 0.9 эВ);  $V$  — напряжение на контакте, которое может быть как отрицательным, так и положительным;  $\xi$  — расстояние от уровня Ферми до валентной зоны.

Очевидно, что при приложенном обратном напряжении условие (1) будет выполнено, а при приложенном прямом — условие (1) будет нарушено. Таким образом, для тока, протекающего через диод, включенный в прямом направлении, можно воспользоваться формулой для термоэлектронной эмиссии (4), а в обратном — формулой для термоэлектронной полевой эмиссии (5) [24,29]:

$$J = J_F \left( \exp \left[ V_F \frac{q}{kT} \right] - 1 \right) = J_F \left( \exp[V_F \beta] - 1 \right), \quad (4)$$

$$J = J_F \left( \exp \left[ V_R \frac{q}{kT} - \frac{1}{E_0} \right] - 1 \right) = J_R \left( \exp[V_R \tilde{\beta}] - 1 \right), \quad (5)$$

$$E_0 = E_{00} \coth(qE_{00}/kT), \quad (6)$$

$$\frac{J_R}{J_F} \simeq \frac{\sqrt{\pi q E_{00} \left( qV_R + \frac{\Phi_b}{\cosh^2(qE_{00}/kT)} \right)}}{kT} \times \exp \left( \Phi_b \left[ \frac{1}{kT} - \frac{1}{E_0} \right] \right), \quad (7)$$

где  $J$  — ток,  $V_R$  и  $V_F$  — падение напряжения на диоде, включенном в прямом и обратном направлении соответственно.

Для описания падения напряжения на ННК можно воспользоваться законом Ома (8):

$$V_0 = JR. \quad (8)$$

Здесь  $R$  — сопротивление ННК.

Тогда с учетом последовательного соединения элементов в цепи,

$$V = V_F + V_0 + V_R, \quad (9)$$

можно рассчитывать вольт-амперную характеристику нашей системы. Однако в ней имеется четыре плохо определенных параметра: два тока насыщения диодов  $J_F$  и  $J_R$ , а также сопротивление ННК  $R$  и параметр  $\tilde{\beta} = \beta - 1/E_0$ , который зависит от степени легирования. Следует отметить, что отсутствие симметрии контактов отношение (7) выполняется только приближенно и может рассматриваться только как оценка. В выбранном нами диапазоне параметров это отношение может меняться от 1.5 до 43 000.

В отличие от работы [24] мы сделаем упрощение и будем считать ток насыщения обратного диода постоянным  $J_R$  (несмотря на то, что точный расчет допускает его увеличение примерно в 2 раза).

Согласно эквивалентной схеме (см. рис. 5), основное падение напряжения происходит на диоде, включенном навстречу. Принимая во внимание, что при последовательном соединении токи, протекающие в цепи, равны, для аппроксимации экспериментальных данных можно воспользоваться (4), (5), (8), (9). На рис. 4 видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами аппроксимации. Определенные значения  $\beta$  и  $J_R$  оказались равны для прямой ветви ВАХ 0.25 и  $1.15 \cdot 10^{-7}$  А, а для обратной 0.41 и  $6.8 \cdot 10^{-8}$  А соответственно. Зная эти значения по начальному участку кривых, при малых значениях напряжения, мы можем найти величину тока  $J_F$ . Ток насыщения  $J_F = 9 \cdot 10^{-9}$  А оказался одинаковым в пределах погрешности в обоих случаях. При этом значение сопротивления самого ННК, определенное из поведения кривых при больших значениях напряжения, оказалось равным  $R = 2.5 \cdot 10^6$  Ом.

Значение  $\tilde{\beta}$  позволяет нам с хорошей точностью определить степень легирования ННК в области контакта металл–ННК:  $N_d = 2.7 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> и  $4.4 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Видно, что эти значения не сильно отличаются друг от друга. Небольшой разброс может быть связан как неэквидистантностью самих контактов, так и неравномерностью распределения примеси в ННК. Кроме того, распределение легирующей примеси внутри ННК может отличаться более чем на 3 порядка вблизи поверхности и в центре ННК [11]. Неоднородность в распределении легирующей добавки может объясняться небольшим рассогласованием решеток [30] или встраиванием легирующей добавки не через [11,31]. Тем не менее полученное среднее значение концентрации носителей заряда  $3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> находится в хорошем соответствии со значением концентрации, приведенной в работе [20], которое было получено на основании анализа данных фотолюминесценции ННК (Ga,Mn)As и равнялось  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Поскольку используемые в данной работе ННК были синтезированы при более высокой температуре ячейки Mn [20], такое различие не является неожиданным.

Принимая во внимание, что расстояние между контактами для данного ННК было равно 950 нм, и исходя

из полученного значения сопротивления, можно оценить удельное сопротивление ННК  $\rho = 1.15 \cdot 10^{-2}$  Ом/м и проводимость  $\sigma = 87$  (Ом/м) $^{-1}$ . Тогда на основании полученных данных при учете среднего уровня легирования ННК, составляющего  $3.5 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ , можно получить приближенную оценку подвижности носителей заряда в ННК:  $160 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, с помощью метода электронной литографии были созданы электрические контакты к одиночным нитевидным нанокристаллам на основе полупроводниковых соединений (Ga,Mn)As, синтезированных путем молекулярно-пучковой эпитаксии. Проведенные исследования ВАХ показали, что наиболее оптимальным с точки зрения омичности свойств контактов является отжиг при относительно низких температурах, тогда как повышение температур отжига ведет к деградации свойств структур. Аппроксимация экспериментальных данных, проведенная на основе предложенных теоретических моделей, позволила приближенно оценить как степень легирования полученных ННК, которая составила порядка  $3 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ , так и значение подвижности носителей заряда  $\sim 160 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке различными государственными контрактами с Министерством образования и науки, грантами РФФИ, научными программами РАН, программами FP7 SOBONA и FUNPROB, грантом СПбГУ (11.37.646.2013) с использованием оборудования регионального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“. Один из авторов статьи (Н.В.С.) выражает благодарность совету по грантам президента РФ за финансовую поддержку.

#### Список литературы

- [1] G. Ling, J. Xiang, N. Kharche, G. Klimeck, C.M. Lieberand, M. Lundstrom. *Nano Lett.*, **7**, 642 (2007).
- [2] S. Chuang, Q. Gao, R. Kapadia, A.C. Ford, J. Guo, A. Javey. *Nano Lett.*, **13**, 555 (2013).
- [3] G. Larrieu, X.-L. Han. *Nanoscale*, **5**, 2437 (2013).
- [4] T. Brykkert, L. Wernersson, T. Lowgren, L. Samuelson. *Nanotechnology*, **17** (11), S227 (2006).
- [5] А.Д. Буравлев, Д.В. Безнасюк, Е.П. Гильштейн, М. Tchernycheva, A. De Luna Bugallo, L. Rigutti, L. Yu, Yu. Proskuryakov, И.В. Штром, М.А. Тимофеева, Ю.Б. Самсоненко, А.И. Хребтов, Г.Э. Цырлин. *ФТП*, **47** (6) 797 (2013).
- [6] M. Tchernycheva, L. Rigutti, G. Jacopin, A. de Luna Bugallo, P. Lavenus, F.H. Julien, M. Timofeeva, A.D. Bouravleuv, G.E. Cirlin, V. Dhaka, H. Lipsanen, L. Largeau. *Nanotechnology*, **23**, 265 402 (2012).
- [7] R.R. LaPierre, A.C.E. Chia, S.J. Gibson, C.M. Haaramaki, J. Boulanger, R. Yee, P. Kuyanov, J. Zhang, N. Tajik, N. Jewell, K.M.A. Rahman. *Phys. Status Solidi RRL*, DOI: 10.1002/pssr.2013071091.
- [8] B. Tian, T. Cohen-Karni, Q. Qing, X. Duan, P. Xie, C.M. Lieber. *Science*, **329**, 830 (2010).
- [9] M.S. Vitiello, D. Coquillat, L. Viti, D. Ercolani, F. Teppe, A. Pitanti, F. Beltram, L. Sorba, W. Кнап, A. Tredicucci. *Nano Lett.*, **12**, 96 (2011).
- [10] Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин, А.И. Хребтов, А.Д. Буравлев, Н.К. Поляков, В.П. Улин, В.Г. Дубровский, P. Werner. *ФТП*, **45** (4), 441 (2011).
- [11] A. Casadei, P. Krogstrup, M. Heiss, J.A. Röhr, C. Colombo, T. Ruelle, S. Upadhyay, C.B. Sørensen, J. Nygård, A. Fontcubertai Morral. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 013 117 (2013).
- [12] Ch. Bloemers, T. Grap, M.I. Lepsa, J. Moers, St. Trellenkamp, D. Gruetzmacher, H. Lueth, Th. Schapers. *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 152 106 (2012).
- [13] J.P. Grave, D. Liang, S. Jin. *Nano Lett.*, **13**, (6), 2704 (2013).
- [14] K. Storm, F. Halvardsson, M. Heurlin, D. Lindgren, A. Gustafsson, P.M. Wu, B. Monemar, L. Samuelson. *Nature Nanotechn.*, **7**, 718 (2012).
- [15] H. Ohno, D. Cheba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, K. Ohtani. *Nature*, **408**, 21 (2000).
- [16] J. Sadowski, P. Dluzewski, S. Kret, E. Janik, E. Lusakowska, J. Kanski, A. Presz, F. Terki, S. Charar, D. Tang. *Nano Lett.*, **7**, 2724 (2007).
- [17] A. Rudolph, M. Soda, M. Kiessling, T. Wojtowicz, D. Schuh, W. Wegscheider, J. Zweck, C. Back, E. Reiger. *Nano Lett.*, **9**, 3860 (2009).
- [18] А.Д. Буравлев, Г.Э. Цырлин, В.В. Романов, Н.Т. Барраев, Е.С. Брилинская, Н.А. Лебедева, С.В. Новиков, H. Lipsanen, В.Г. Дубровский. *ФТП*, **46** (2), 188 (2012).
- [19] А.Д. Буравлев, Г.О. Абдрашитов, Г.Э. Цырлин. *ПЖТФ*, **38** (17), 78 (2012).
- [20] A. Bouravleuv, G. Cirlin, V. Sapega, P. Werner, A. Savin, H. Lipsanen. *J. Appl. Phys.*, **113**, 144 303 (2013).
- [21] P. Nemeec, V. Novak, N. Tesarova, E. Rozkotova, H. Reichlova, D. Butkovicova, F. Trojanek, K. Olejnik, P. Maly, R.P. Champion, B.L. Gallagher, J. Sinova, T. Jungwirth. *Nature Commun.*, **4**, 1422 (2013).
- [22] A. Kovacs, J. Sadowski, T. Kasama, M. Duchamp, R.E. Dunin-Borkowski. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **46**, 145 309 (2013).
- [23] Z. Zhang, K. Yao, Y. Liu, C. Jin, X. Liang, Q. Chen, L.-M. Peng. *Adv. Funct. Mater.*, **17**, 2478 (2007).
- [24] S.H. Lee, Y.S. Yu, H.J. Kim, S.W. Hwang, D. Ahn. *J. Korean Phys. Soc.*, **51**, S298 (2007).
- [25] S.N. Mohammad. *J. Appl. Phys.*, **108**, 034 311 (2010).
- [26] X. He, J. Scharer, J. Booske, S. Sengele. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **26** (2), 770 (2008).
- [27] F.A. Padovani, R. Stratton. *Sol. St. Electron.*, **9**, 695 (1966).
- [28] Landolt-Börnstein, New Series, Group IV elements, IV–IV and III–V compounds, Group III/17A-22A-41A1b, Pt. b *Electronic, Transport, Optical and Other Properties*, ed. by O. Madelung (Springer Materials, Berlin, 2002).
- [29] Y. Umamoto, W.J. Schaff, H. Park, L.F. Eastman. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1964 (1993).
- [30] F. Glas, B. Daudin. *Phys. Rev. B*, **86**, 174 112 (2012).
- [31] W. Chen, V.G. Dubrovskii, X. Liu, T. Xu, R. Lardé, J.P. Nys, B. Grandidier, D. Stiévenard, G. Patriarche, P. Pareige. *J. Appl. Phys.*, **111**, 094 909 (2012).

Редактор Т.А. Полянская

## Electrical properties of single (Ga,Mn)As nanowires

A.D. Bouravleuv\*<sup>♦</sup>, N.V. Sibirev\*<sup>+♦</sup>, E.P. Gilstein\*<sup>+</sup>,  
P.N. Brunkov\*<sup>+</sup>, I.S. Mukhin<sup>+•</sup>, M. Tchernycheva<sup>■</sup>,  
A.I. Khrebtov<sup>+</sup>, Yu.B. Samsonenko,<sup>\*•</sup> G.E. Cirlin\*<sup>♦</sup>

\* Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

+ St. Petersburg Academic University —  
Nanotechnology Research and Education Centre,  
Russian Academy of Science,  
194021 St. Petersburg, Russia

• Institute for Analytical Instrumentation,  
Russian Academy of Sciences,  
190103 St. Petersburg, Russia

♦ St. Petersburg State University,  
198504 St. Petersburg, Russia

■ Institut d'Electronique Fondamentale UMR CNRS  
8622,  
Université Paris Sud 11,  
91405 Orsay Cedex, France

**Abstract** Arrays of (Ga,Mn)As nanowires were synthesized by molecular beam epitaxy. The electrical contacts to single nanowire were obtained by electron-beam lithography. The influence of the annealing temperature on the contact properties is studied. The optimal annealing temperature is found to be equal to 160°C. It was shown, that the increasing of the annealing temperature results in degradation of the structures. The electrical parameters of the single nanowires were obtained based on the investigation of the current-voltage characteristics of the single nanowires, such as the resistivity and the mobility of the charge carriers.