

К. т. н. Г. Г. ГОРОХ<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. И. А. ОБУХОВ<sup>2</sup>, А. А. ЛОЗОВЕНКО<sup>1</sup>

Республика Беларусь, г. Минск, <sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Россия, Московская обл., <sup>2</sup>НПП «Системные ресурсы»

E-mail: gorokh@bsuir.by, i\_obukhov@systemres.ru

## МАССИВЫ НАНОПРОВОДОВ ИЗ АНТИМОНИДА ИНДИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Теоретически обоснована возможность создания перспективных термоэлектрических преобразователей на основе квантовых проводов. Разработаны и апробированы технологические методы изготовления массивов InSb-нанопроводов, имеющих высокое аспектное отношение диаметра к длине, в модифицированных матрицах нанопористого анодного оксида алюминия. Исследована микроструктура и состав сформированных наноструктур. Представлены результаты электрофизических исследований массивов InSb-нанопроводов в порах анодного оксида алюминия и рассмотрены перспективы их практического применения при изготовлении новых типов генерирующих и охлаждающих устройств.*

*Ключевые слова: массивы нанопроводов, квантово-размерные эффекты, анодный оксид алюминия, антимонид индия, термоэлектрический преобразователь.*

Современные нанотехнологии уже сегодня позволяют создавать нанобъекты, размеры которых соизмеримы или даже меньше длины размерного квантования  $L_{dq}$  [1]. В тех случаях когда поперечные размеры одномерных проводников меньше  $L_{dq}$ , происходят изменения в их потенциальных рельефах для электронов, возникают неравновесные квантовые эффекты на границах между квантовыми проводами с различными поперечными сечениями и проявляются другие квантовые эффекты [2]. В [3–5] теоретически показана возможность использования для термоэлектрических преобразований неравновесных явлений, возникающих на границах проводящего канала и контактов квантового провода (КП). При соответствующем выборе конструктивных параметров КП протекание тока через прибор будет приводить к охлаждению эмиттерного контакта и нагреванию коллекторного [3]. При наличии множества таких КП этот эффект многократно усилится и можно добиться охлаждения эмиттерного контакта на десятки градусов. Соответственно, при наличии разности температур между контактами КП будет возникать электрический ток.

В качестве материалов для создания КП наиболее предпочтительным является антимонид индия, имеющий малую ширину запрещенной зоны (0,18 эВ) и высокую подвижность электронов ( $7,8 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ) [6], благодаря чему приборы на основе InSb способны принимать инфракрасное излучение с длиной волны до  $\lambda \approx 7 \text{ мкм}$  и обладают наилучшими частотными свойствами [7]. Еще одна его важная особенность — наноструктуры из InSb имеют максимальную для полупроводников группы  $A^{III}B^V$

длину размерного квантования электронов, составляющую 58 нм при комнатной температуре. Поэтому снижение линейных размеров InSb-наноструктур менее 60–50 нм при температуре  $T=300 \text{ К}$  уже приводит к изменению характера квантовых состояний электронов и проявлению квантово-размерных эффектов [8, 9]. Уменьшение же размеров InSb-наноструктур до десятков и единиц нанометров позволяет изменять ширину их эффективной запрещенной зоны от 0,5 до 3,2 эВ — в максимально широком для полупроводников этой группы диапазоне [10].

Среди физико-химических методов получения InSb-наноструктур наиболее привлекательным является метод электрохимического осаждения на металлические основания и пленки (Au, Ag, Pt, Ni, Cu) в специально приготовленные «темплейты», в частности в нанопористые пленки анодного оксида алюминия (АОА) [11, 12]. Однако специфическая структура АОА не позволяет непосредственно использовать его в качестве шаблона для электрохимического осаждения InSb — для этого необходимо заменить диэлектрический барьерный оксидный слой у основания пор на проводящую пленку. Ранее нами были разработаны методы электрохимического осаждения металлов (Ni, Cu) и полупроводников (InSb) в модифицированные матрицы АОА толщиной 0,5–1 мкм на металлизированных кремниевых подложках [13, 14]. Разработка методов управляемого формирования нанопроводов антимонида индия заданной размерности открывает перспективы для использования широкого спектра квантовых явлений в качестве основы функционирования микроэлектронных приборов, в том числе осуществляющих эффектив-

ное преобразование тепловой энергии в электрическую и наоборот.

Целью настоящей работы было обоснование возможности создания термоэлектрических преобразователей на основе неравновесных эффектов в квантовых проводках, формирование массивов квантовых проводков с большим аспектным отношением их длины к диаметру с помощью нанопористых темплейтов из анодного оксида алюминия, а также исследование их структуры, состава и электрофизических характеристик, что необходимо для создания в перспективе на их основе новых типов генерирующих и охлаждающих устройств.

**Теоретические предпосылки для создания микроэлектронных устройств, основанных на квантовых неравновесных эффектах**

Для объяснения возникновения неравновесных эффектов в нанопроводах представим квантовый провод в виде проводящего канала — прямоугольного параллелепипеда, на концах которого находятся эмиттерный и коллекторный контакты КП (рис. 1). Порогом для квантовых эффектов в твердых телах является длина размерного квантования:  $L_{dq} = \pi \cdot (1,5\hbar\tau_0/m^*)^{1/2}$  (где  $\tau_0 = \hbar/(kT)$  — время релаксации электронного газа к термодинамическому равновесию [5, 8],  $\hbar$  — постоянная Планка), поэтому в тех случаях, когда поперечные размеры проводящего канала меньше  $L_{dq}$ , при протекании тока через КП его эмиттерный контакт будет охлаждаться, а коллекторный — нагреваться.

В основе этих явлений лежит эффект Пельтье, проявляющийся на границах эмиттерного и коллекторного контактов КП. Если поперечные размеры проводящего канала достаточно малы, то в направлении переноса заряда он представляет собой потенциальный барьер для электронов. В результате размерного квантования между энергией Ферми электронов в контактах ( $E_F$ ) и первым разрешенным уровнем их энергии в проводящем канале квантового провода ( $E_1$ ) возникает энергетическая щель:  $\Delta = E_1 - E_F > 0$ . Величина  $\Delta$  представляет собой нижнюю границу энергии, которая может быть поглощена либо испущена электронами при переходе из состояния с энергией не выше энергии Ферми в состояние с энергией, разрешенной в проводящем канале.

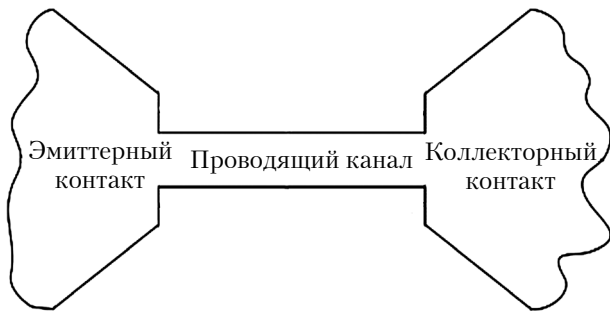


Рис. 1. Иллюстрация к описанию квантового провода

На рис. 2 хорошо видно, что уровни разделены энергетическими щелями, превышающими энергию тепловых флуктуаций  $k_B T$  ( $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура) при комнатной температуре, равную примерно 0,026 эВ. Поскольку высота потенциального барьера, создаваемого проводящим каналом для электронов в КП, является функцией поперечных размеров этого канала, от этих размеров будут зависеть электрофизические свойства провода. Кроме того, инжекция электронов из контакта в канал по своему физическому смыслу эквивалентна испарительной эмиссии [3, 8].

Если порядок величин  $\Delta$  и  $k_B T$  одинаков, то, прикладывая к КП внешнее напряжение, можно добиться охлаждения эмиттерного контакта в результате переноса заряда и охлаждения коллекторного. Таким образом, этот эффект обусловлен «испарением» электронов в узкой области вблизи эмиттерного контакта и последующим их переносом через проводящий канал к другому контакту [3–5, 15]. На рис. 3, где показано распределение отношения  $n/n_{eq}$  вдоль квантового провода ( $n$  — концентрация электронов при напряжении  $V=0,38$  В,  $n_{eq}$  — равновесная концентрация электронов, вычисленная как концентрация при  $V=0$  В), видно, что в области про-

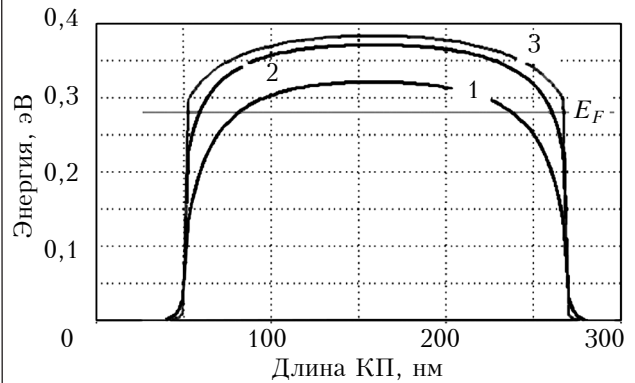


Рис. 2. Потенциальные рельефы для электронов в КП при нулевом напряжении для проводящих каналов различного диаметра:

1 —  $d=L_{dq}/2$ ; 2 —  $d=L_{dq}/3$ ; 3 —  $d=L_{dq}/4$

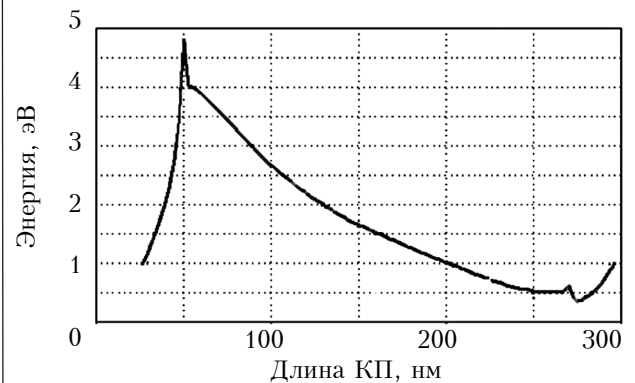


Рис. 3. Распределение электронов в КП диаметром  $d=L_{dq}/4$  при  $V=0,38$  В

водящего канала, примыкающей к эмиттерному контакту, концентрация «испарившихся» из эмиттера электронов в несколько раз превышает равновесную концентрацию. При этом в области коллекторного контакта наблюдается обеднение проводящего канала электронами.

В результате инжекции электронов из контактных областей в проводящем канале происходит поглощение и излучение электронами энергии тепловых флуктуаций. При поглощении электроны переходят из состояний с энергией меньшей высоты потенциального барьера в состояния с большей энергией. Таким же образом происходят и обратные переходы с излучением тепловой энергии. Если между эмиттерным и коллекторным каналами приложено ненулевое смещение, то в КП возникает электрический ток. Электроны, поглотившие тепловую энергию, увлекаются этим током из контакта с меньшим приложенным напряжением в проводящий канал. Здесь электроны не могут излучить тепловую энергию, поскольку в этой области отсутствуют состояния с энергией, меньшей высоты потенциального барьера. Излучение тепловой энергии и уменьшение энергии электронов происходит только в области противоположного контакта. Следует отметить, что описанные явления могут быть использованы для создания нанохолодильников или, что то же самое, «тепловых насосов» на основе массивов из квантовых проводов. Теоретические оценки показывают, что в таких устройствах возможно охлаждение объектов, примыкающих к эмиттерным контактам квантовых проводов, на десятки градусов [3, 5].

Кроме испарительной эмиссии в области перехода между эмиттерным контактом и проводящим каналом наблюдается поглощение фотонов инфракрасного диапазона, что позволяет использовать КП в качестве фотоячейки [16]. При соответствующей мощности внешнего электромагнитного излучения один КП может вырабатывать примерно 10 нВт электроэнергии. Рассчитанные значения максимальной мощности, отбираемой от одного КП, и коэффициента полезного действия такой ячейки пропорциональны отношению  $R_0/R$ , где  $R_0 = \hbar/e^2 \approx 4,1$  кОм,  $e$  — заряд электрона,  $R$  — сопротивление квантового провода. То есть очевидно, что эффективность преобразования тем выше, чем ниже сопротивление КП.

Комбинация «теплого насоса» и фотоячейки на основе квантовых проводов позволяет построить квантовый термоэлектрический преобразователь. Его возможная схема показана на рис. 4, а. Он состоит из матрицы квантовых проводов, примыкающей к охлаждаемой поверхности, и аналогичной матрицы, осуществляющей преобразование инфракрасного излучения в электрический ток, а также из аккумуляторного и управляющего устройств. Базовым элементом для нанохолодильника, фотоячейки

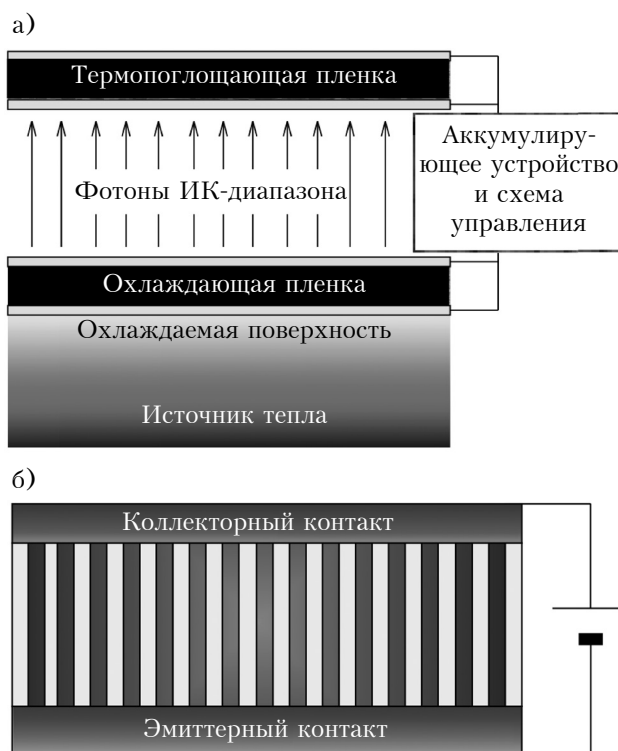


Рис. 4. Схематическое изображение квантового термоэлектрического преобразователя (а) и простейшего «охлаждающего» устройства на основе массивов нанопроводов (б)

и квантового термоэлектрического преобразователя может служить тонкопленочное функциональное устройство, схематически изображенное на рис. 4, б.

Роль квантовых проводов в этом устройстве выполняет массив нанопроводов, сформированных в пористой матрице анодного оксида алюминия, на противоположных сторонах которой находятся эмиттерный и коллекторный контакты. Температуру охлаждения в таком устройстве можно регулировать приложенным напряжением, при этом охлаждение будет тем больше, чем больше напряжение и концентрация электронов в эмиттерном контакте. Расчеты показывают, что при формировании КП из InSb и их поперечных размерах менее 58 нм может быть достигнуто значительное охлаждение эмиттерного контакта квантового провода — на десятки градусов.

#### Изготовление массивов InSb-нанопроводов в матрице АОА

Темплеты для осаждения в них InSb-нанопроводов получали путем двухстадийного электрохимического анодирования фольги из Al (99,99%), которую предварительно подвергали химической и механической обработке. Последовательность операций приготовления InSb-нанопроводов в матрицах АОА показана на рис. 5. Первую стадию анодирования подготовленных полированных заготовок проводили

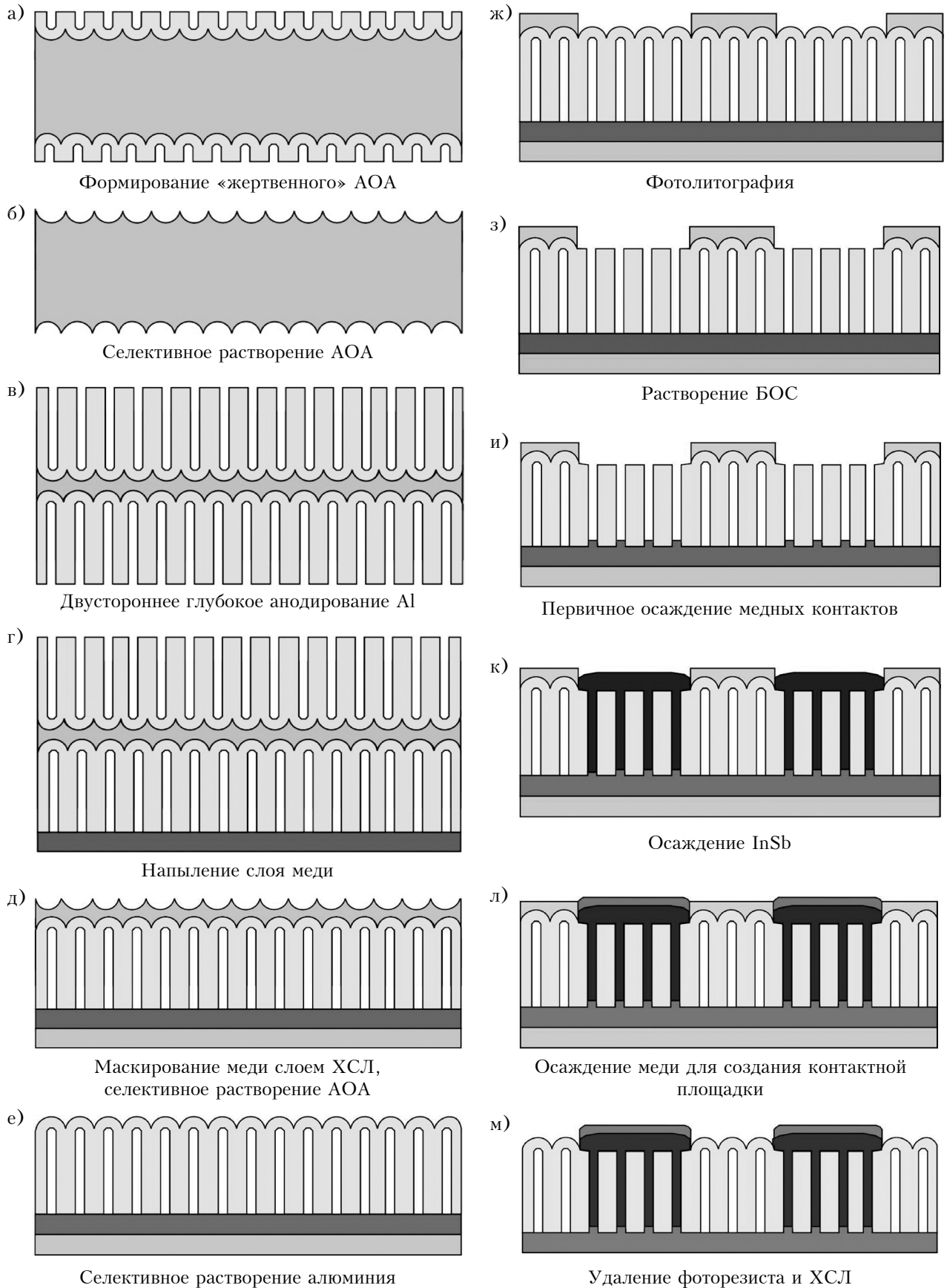


Рис. 5. Последовательность операций приготовления образцов с InSb-нанопроводами в матрицах АОА для измерения ВАХ



на глубину 5 мкм в 0,5 М водном электролите щавелевой кислоты при постоянном напряжении 35 В (рис. 5, а). Электрические параметры электрохимического процесса задавали с помощью стабилизированных источников питания и контролировали высокоточными вольтметрами. Их регистрацию и мониторинг осуществляли с помощью GPIB-контроллера, соединенного с персональным компьютером с установленным программным обеспечением HP Vee 6.01. Сформированный «жертвенный» слой АОА селективно удаляли (рис. 5, б) в растворе из смеси 20 г/л  $\text{CrO}_3$  и 35 мл/л  $\text{H}_3\text{PO}_4$  [17].

Повторное двухстороннее анодирование алюминиевой заготовки со структурированной отпечатками оксидных ячеек поверхности проводили в течение 270 мин в тех же электрохимических условиях, что и первое анодирование (рис. 5, в). За это время формировался слой АОА толщиной  $35 \pm 1$  мкм. Затем полученные образцы АОА обрабатывали в 2 М растворе серной кислоты при температуре  $50^\circ\text{C}$  в течение 3–5 мин, в результате чего поры очищались и увеличивались в диаметре до 35 нм. Далее на одну из сторон анодированной заготовки с пористым слоем АОА в вакууме напыляли слой меди толщиной 2 мкм (рис. 5, г). После этого поверхность меди закрывали слоем химически стойкого лака (ХСЛ) и высушивали сначала на воздухе в течение 40 мин, затем в термокамере при температуре  $90^\circ\text{C}$  в течение 10 мин. На следующем этапе проводили селективное растворение с обратной стороны заготовки: сначала — слоя пористого АОА в растворе на основе ортофосфорной кислоты и хромового ангидрида (рис. 5, д), затем — оставшегося после анодирования слоя алюминия в растворе из 1,25 г/л хлорида меди, 1 л соляной кислоты, 158 мл/л дистиллированной воды в течение 25 мин (рис. 5, е).

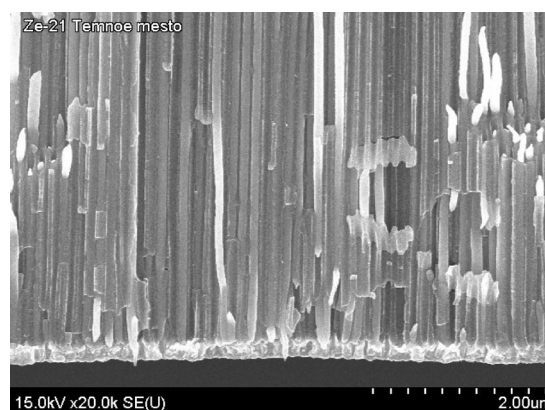
Для проведения электрофизических измерений необходимо было создать области с нанопроводами, локально осажденными на определенной площади. С помощью фотолитографии на стороне барьерного оксидного слоя (БОС) был сформирован рисунок со свободными от фоторезиста окнами размером  $1 \times 1$  мм (рис. 5, ж). Через маску фоторезиста в оставшихся свободными слоях АОА растворяли БОС в 5%-ном растворе ортофосфорной кислоты при  $50^\circ\text{C}$  в течение 10 мин (рис. 5, з). В поры приготовленных темплейтов сначала проводили электрохимическое осаждение тонкого слоя меди в 0,5 М растворе  $\text{CuSO}_4$  при плотности тока  $20 \text{ mA/cm}^2$  и температуре электролита  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  в течение 4,5 мин со скоростью около  $0,3 \text{ мкм/мин}$ . Таким образом были сформированы медные контакты толщиной около  $1,4 \text{ мкм}$  (рис. 5, и).

Электрохимическое осаждение антимонида индия на медные контакты в порах АОА осуществляли в водном растворе  $0,1 \text{ M SbCl}_3$ ,  $0,18 \text{ M InCl}_3$ ,  $0,35 \text{ M C}_6\text{H}_8\text{O}_7$  и  $0,17 \text{ M K}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ , доведенном 20%-ным раствором  $\text{HCl}$  до значения

$\text{pH}=2,0$  [11]. При электрохимическом осаждении использовали трехэлектродную электрохимическую ячейку с хлорсеребряным электродом сравнения. В качестве анода при осаждении использовали угольный электрод. Осаждение  $\text{InSb}$  проводили при постоянном токе плотностью  $20 \text{ mA/cm}^2$  в течение 25 мин при температуре электролита  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  и  $\text{pH}=2,0$ . Катодный потенциал относительно электрода сравнения ( $\text{Ag/AgCl}$ ) составлял 1,6 В. За указанное время  $\text{InSb}$  полностью заполнял поры АОА. После того как  $\text{InSb}$  начинал выходить из пор, уменьшалась плотность тока, а когда напряжение понижалось до 1,53 В, процесс останавливали (рис. 5, к). Для обеспечения хорошего омического контакта дополнительно проводили электролитическое осаждение меди на поверхность  $\text{InSb}$  при плотности тока  $10 \text{ mA/cm}^2$  в течение 20 мин (рис. 5, л). В завершение удаляли маску фоторезиста и слой ХСЛ с обратной стороны темплейта (рис. 5, м), а готовые образцы промывали в дистиллированной воде и высушивали в термостате.

Электронно-микроскопические изображения сечений нанопористых темплейтов из мембран АОА с осажденными нанонитями  $\text{InSb}$ , а также массив нанопроводов после селективного удаления матрицы, показаны на рис. 6. Как видно из снимков, в каждой поре по всей длине обра-

а)



б)

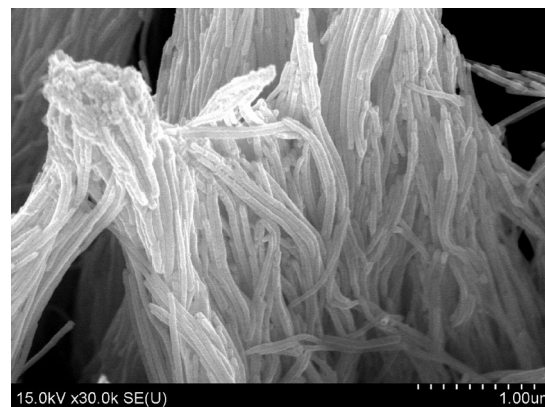


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки сечения АОА с нанопроводами  $\text{InSb}$  (а) и нанопроводов после растворения матриц АОА (б)

зовались нанопровода диаметром около 35 нм, что соответствовало размеру пор исходных темплайтов АОА. В соответствии с плотностью пор матрицы АОА, под каждым контактом находилось около  $2,568 \cdot 10^8$  нанопроводов, соединенных между собой подслоем меди.

На рис. 7 приведены результаты исследования состава InSb-нанопроводов в пористом темплайте из АОА, которые были получены методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа с помощью сканирующего электронного микроскопа, снабженного специальной приставкой AN 10000 фирмы Princeton Gamma-Tech, Inc. Такая приставка регистрировала характеристическое рентгеновское излучение от всех компонентов, которые попадали под действие первичного электронного луча микроскопа при его торможении на поверхности приготовленного образца, вызывая генерацию такого излучения. Характерный размер пятна от первичного луча составлял  $10 \times 10$  мкм, глубина проникновения луча — от 0,1 мкм до нескольких микрометров.

В полученном спектре присутствуют линии, соответствующие элементному составу исходной матрицы: линия с максимумом 1,62 эВ соответствует алюминию в структуре мембраны АОА; 8,16 эВ — подслою меди, на который осаждали InSb; 1,26 эВ — кислороду; 1,48 эВ — частично окисленной меди в порах. Состав нанопроводов в порах АОА характеризуется наличием в спектре нескольких линий, соответствующих индию в разных формах (2,87; 3,52; 3,72 и 3,9 эВ) с максимальной полосой 3,22 В, а также сурьме (3,2; 3,82; 4,15 и 4,6 эВ) с максимальной полосой 3,52 эВ. Кроме того, в образце обнаружен хлор (2,6 и 2,87 эВ), который, вероятно, вошел в структуру композита из электролита.

В результате машинной обработки полученных данных было рассчитано процентное со-

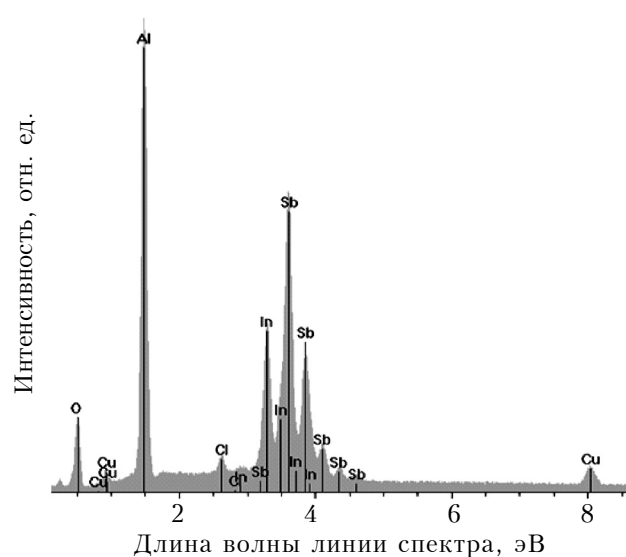


Рис. 7. Результаты электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа нанопроводов InSb в матрицах АОА

отношение индия и сурьмы в составе осажденных InSb-нанопроводов: массовое — 36,89% In и 63,11% Sb; атомное — 38,26% In и 61,74% Sb.

### Измерение ВАХ массивов InSb-нанопроводов

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) массивов нанопроводов InSb в матрице АОА проводили с помощью автоматизированной системы 4061 фирмы Hewlett-Packard, снабженной зондовым устройством с медными микроконтактами, источника токов и напряжений, имеющего цифровой (GPIB, IEEE 488) интерфейс, и мультиметра Agilent 34401A. Управление режимами измерений и регистрацию параметров проводили с помощью персонального компьютера, соединенного с приборами с помощью контроллера USB-GPIB Card фирмы Agilent Technologies, позволяющего записывать и обрабатывать показания с регистрирующих приборов в реальном времени. Образцы исследуемых матриц помещались нижней частью со сплошным медным слоем (см. рис. 5, м) на покрытую медью пластину. К их верхним площадкам, представляющим собой окна размером  $1 \times 1$  мм, прикреплялся рабочий контакт с помощью пружинящего медного зонда. В процессе измерений линейно увеличивали/понижали напряжение на рабочем контакте со скоростью 0,1 В/с и регистрировали на мониторе и мультиметре показания тока, протекающего между нижним и верхним контактами.

В результате исследований было обнаружено, что при первом включении в системе Cu—InSb—Cu ток увеличивался нелинейно, и при напряжении около 1 В наблюдались резкие скачки тока в виде осцилляций (рис. 8, а, кривая 1), при уменьшении напряжения ток линейно спадал до нуля (рис. 8, а, кривая 2). После смены полярности на контактах образца картина повторилась, только в отрицательных ординатах (рис. 8, а, кривые 3 и 4). Такое поведение тока, вероятно, связано с контактными явлениями на границе нанопроводов InSb и контактов из Cu. В анодированной матрице с электрохимически осажденными нанопроводами присутствует некоторое количество гидроксидов и некомпенсированного кислорода, которые могут взаимодействовать с медными контактами [18], в результате чего при анодном включении на контактах образуются тонкие плоские коррозионные зоны  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}$  и  $\text{CuO}/\text{Cu}$  [19]. Анодно-сформированные на Cu тонкие слои  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$  обладают *p*-типом проводимости [20], поэтому на границе нанопроводов InSb, представляющих собой полупроводник *n*-типа, и медного контакта, покрытого акцепторным оксидом меди, образуется запирающий контакт, который начинает пробиваться при напряжении, близком к 1 В. После повторных включений при больших напряжениях осцилляции тока исчезли и ВАХ приобрели вид, показанный на рис. 8, б: ток практически линейно

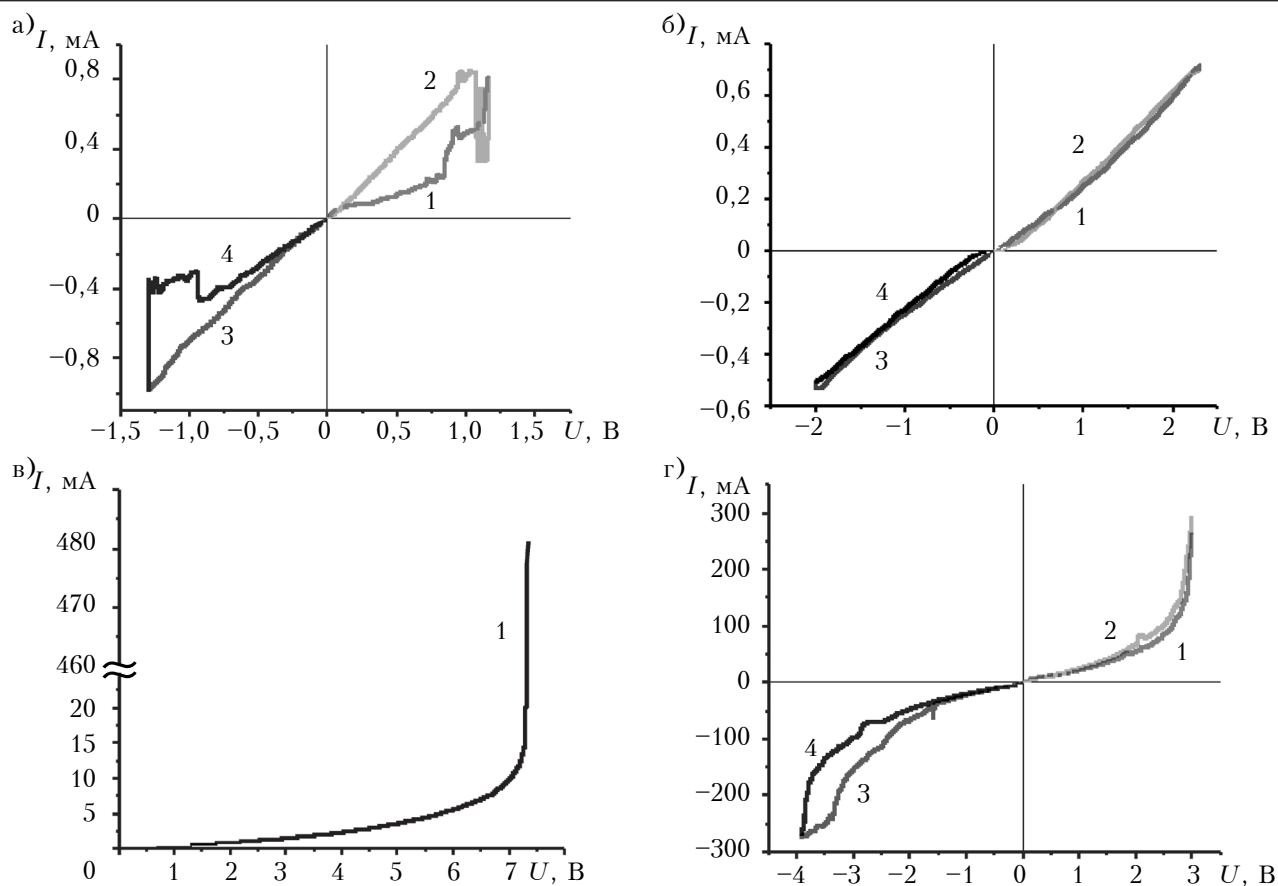


Рис. 8. ВАХ матриц нанопроводов InSb в матрицах АОА на различных этапах измерений

увеличивался и уменьшался, соответственно, с ростом и снижением напряжения на контактах в диапазоне  $\pm 2$  В. При этом значения тока увеличилось незначительно.

Дальнейшее увеличение напряжения привело к близкому к экспоненциальному росту тока, а при  $U \approx 7$  В произошел резкий его скачок (рис. 8, в). Здесь, вероятно, произошла «приработка» контактных переходов InSb/Cu, т. к. при последующих включениях ВАХ исследуемых структур были стабильны и носили экспоненциальный характер при прямом и обратном включениях (рис. 8, г). При этом характерное управляющее напряжение значительно снизилось, а значения тока были стабильны во времени и достигали 320 мА, что соответствовало плотности тока  $129,8 \text{ А/см}^2$  через сечения всех нанопроводов.

В процессе токовых измерений с помощью инфракрасного измерителя температуры DT-8380 регистрировали значения температуры верхнего (коллекторного) контакта при положительном включении массива нанопроводов и нижнего (эмиттерного) контакта при его отрицательном включении. При кратковременном положительном включении образца при напряжении 3 В через него протекал ток около 250 мА, и коллекторный контакт за 150 с разогрелся до  $73^\circ\text{C}$ , а при обратном включении температура эмиттерного контакта достигала  $55^\circ\text{C}$ . Предположительно,

это явление обусловлено двумя неравновесными эффектами: инжекцией электронов из эмиттерного контакта в проводящий канал и нарушением локального химического равновесия между фазами «эмиттерных» и «коллекторных» электронов. Оба обнаруженных эффекта являются следствием протекания тока через области с высоким градиентом концентрации электронов. Источники неравновесности локализованы в  $n^+ - n$ -переходах между контактами и массивом нанопроводов. Значения указанного градиента определяются концентрацией электронов в материалах контактов. При этом необходимо отметить, что температурный эффект был бы намного выше в случае большего структурного совершенства нанопроводов, а также при создании контакта из другого материала, например из золота.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности изготовления массивов нанопроводов InSb с неплохими электрическими характеристиками. Они подтверждают сделанные ранее теоретические и экспериментальные выводы о сильном влиянии контактных явлений на эти характеристики [1–3, 8]. Для эффективного использования матриц нанопроводов в качестве термоэлектрических преобразователей необходимо отработать технологию устойчивого формирования контактов с максимальной туннельной прозрачностью и за счет это-



го повысить плотность тока в нанопроводах до 104–105 А/см<sup>2</sup>.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что в структурах с массивами квантовых проводов, поперечные размеры которых меньше величины размерного квантования, из материала с высокой концентрацией и подвижностью электронов при комнатной температуре может быть достигнуто значительное охлаждение одного из контактов на десятки градусов. Используемый в работе темплетный метод электрохимического осаждения антимида индия в нанопористые матрицы анодного оксида алюминия показал перспективность такого способа формирования квантовых проводов InSb с большим аспектным соотношением их диаметра и длины.

Проведенные электронно-микроскопические исследования, а также электронно-зондовый рентгеноспектральный микроанализ сформированных низкоразмерных систем показали, что нитевидные наноструктуры образуются в каждой поре на медном подслое, их диаметры соответствуют размерам пор, а длина определяется длительностью осаждения. Установлено, что бинарное полупроводниковое соединение InSb присутствует в разных формах, а атомарное содержание индия и сурьмы в составе наноструктур составляет 38,26 и 61,74% соответственно.

Проведенные вольт-амперные исследования изготовленных структур с нанопроводами InSb диаметром 35 нм в матрице АОА толщиной 35 мкм показали, что через них может протекать ток до 129,8 А/см<sup>2</sup> при напряжении 3 В. При этом коллекторный контакт при кратковременных включениях разогревается до 60–70°С. Таким образом, экспериментальные результаты подтвердили теоретические выводы о сильном влиянии контактных явлений на электрические характеристики массивов квантовых проводов, которые могут быть использованы при создании термоэлектрических устройств. Охлаждающие устройства на основе подобных систем квантовых проводов позволяют управлять тепловым режимом электрических схем приложенным напряжением и могут найти широкое применение в технике, в частности, для охлаждения интегральных схем (процессоров).

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Landis S. Nano-lithography. — London: ISTE, Hoboken NJ: Wiley. — 2011. — 345 p.
2. Демиковский В. Я., Вугальтер Г. А. Физика квантовых низкоразмерных структур. — Москва: Логос, 2000.
3. Обухов И. А. Самоохлаждение эмиттерного контакта квантового провода // Нано- и микросистемная техника. — 2007. — № 5. — С. 21–23.
4. Обухов И. А. Влияние внешнего электромагнитного излучения на ВАХ квантового провода // 20-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). Т. 2. — Украина, г. Севастополь. — 2010. — С. 833–835.

5. Obukhov I. A. Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices. — Lambert Academic Publishing, 2014.
6. Khan M. I., Penchev M., Jing X. et al. Electrochemical growth of InSb nanowires and report of a single nanowire field effect transistor // Journal of nanoelectronics and optoelectronics. — 2008. — Vol. 3, N 2. — P. 199–202. — DOI: 10.1166/jno.2008.203
7. Chen H., Sun X., Lai K. W. C. et al. Infrared detection using an InSb nanowire // Proceed. of IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC'09). — USA, Traverse City. — 2009. — P. 212–216.
8. Обухов И. А. Неравновесные эффекты в электронных приборах. — Севастополь: Вебер, 2010.
9. Yang X., Wang G., Slattery P. et al. Ultrasmall single-crystal indium antimonide nanowires // Crystal Growth and Design. — 2010. — Vol. 10, iss.10. — P. 2479–2482. — DOI: 10.1021/cg100376u
10. Васильев Р. Б., Дириш Д. Н. Квантовые точки: синтез, свойства, применение. — Москва: ФНМ, 2007.
11. Khan M. I., Wang X., Bozhilov K. N., Ozkan C. S. Templated fabrication of InSb nanowires for nanoelectronics // Journal of Nanomaterials. — 2008. — Vol. 2008. — P. 1–5. — DOI: 10.1155/2008/698759
12. Горох Г. Г., Обухов И. А., Лозовенко А. А. и др. Темплетный метод формирования квантовых нанопроводов InSb с большим аспектным отношением // 23-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). — Украина, Севастополь. — 2013. — С. 820–823.
13. Горох Г. Г., Обухов И. А., Позняк А. А. и др. Синтез нанопроводов InSb в модифицированных матрицах анодного оксида алюминия // 22-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012). Т.2. — Украина, Севастополь. — 2012. — С. 655–658.
14. Горох Г. Г., Обухов И. А., Лозовенко А. А. и др. Формирование нанонитей InSb в пористых матрицах анодного оксида алюминия // Труды VII Междунар. науч. конф. «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах». — Белоруссия, Минск. — 2013. — С. 377–387.
15. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. — Севастополь: «Вебер», 2005.
16. Обухов И. А., Горох Г. Г. Электронные приборы на основе антимида индия // 22-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012). Т.2. — Украина, Севастополь. — 2012. — С. 653–654.
17. Wood G. C. Oxides and oxide films. — USA, New York: Marcell Dekker, 1987.
18. Ганжа С. В., Кухарева Н. В., Грушевская С. Н., Введенский А. В. Кинетика формирования оксидов Cu(I) и Cu(II) на меди в щелочном растворе и особенности их фотоэлектрохимического поведения. Часть II. Фотопотенциал // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2010. — Том 12, № 1. — С. 42–52.
19. Ганжа С. В., Максимова С. Н., Грушевская С. Н. Формирование оксидов на меди в щелочном растворе и их фотоэлектрохимические свойства // Физикохимия поверхности и защита материалов. — 2011. — Том 47, № 2. — С. 146–175.
20. Грушевская С. Н., Елисеев Д. С., Ганжа С. В., Введенский А. В. Свойства полупроводниковых оксидов меди, сформированных на сплавах Cu–Au // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2013. — Том 15, № 3. — С. 253–265.
21. Обухов И. А. Особенности функционирования квантовых приборов // Нано- и микросистемная техника. — 2009. — № 7. — С. 38–45.

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.11 2014 г.*



Г. Г. ГОРОХ<sup>1</sup>, І. А. ОБУХОВ<sup>2</sup>, А. А. ЛОЗОВЕНКО<sup>1</sup>

Республика Беларусь, м. Минск, <sup>1</sup>Білоруський державний університет інформатики і радіоелектроніки; Росія, Московська обл., <sup>2</sup>НПП «Системні ресурси»  
E-mail: gorokh@bsuir.by, i\_obukhov@systemres.ru

## МАСИВИ НАНОПРОВОДІВ З АНТИМОНІДА ІНДІЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИСТРОЇВ

*Теоретично обґрунтовано можливість створення перспективних термоелектричних перетворювачів на основі квантових провідів. Розроблено та апробовано технологічні методи виготовлення масивів InSb-нанопроводів, що мають високе аспектне відношення діаметра до довжини, в модифікованих матрицях нанопористого анодного оксиду алюмінію. Досліджено мікроструктуру та склад сформованих наноструктур. Представлено результати електрофізичних досліджень масивів InSb-нанопроводів в порах анодного оксиду алюмінію та розглянуто перспективи їх практичного застосування при виготовленні нових типів генеруючих і охолоджувальних пристроїв.*

*Ключові слова: масиви нанопроводів, квантово-розмірні ефекти, анодний оксид алюмінію, антимонід індію, термоелектричний перетворювач.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2015.1.03  
UDC 621.396.6.029.64+621.36

G. G. GOROKH<sup>1</sup>, I. A. OBUKHOV<sup>2</sup>, A. A. LOZOVENKO<sup>1</sup>

Republic of Belarus, Minsk, <sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; Russia, Moscow region, <sup>2</sup>System Resources Ltd  
E-mail: gorokh@bsuir.by, i\_obukhov@systemres.ru

## INDIUM ANTIMONIDE NANOWIRES ARRAYS FOR PROMISING THERMOELECTRIC CONVERTERS

*The authors have theoretically substantiated the possibility to create promising thermoelectric converters based on quantum wires. The calculations have shown that the use of quantum wires with lateral dimensions smaller than quantum confinement values and high concentration and mobility of electrons, can lead to a substantial cooling of one of the contacts up to tens of degrees and to the heating of the other. The technological methods of manufacturing of indium antimonide nanowires arrays with high aspect ratio of the nanowire diameters to their length in the modified nanoporous anodic alumina matrixes were developed and tested. The microstructure and composition of the formed nanostructures were investigated. The electron microscopy allowed establishing that within each pore nanowires are formed with diameters of 35 nm and a length of 35 microns (equal to the matrix thickness). The electron probe x-ray microanalysis has shown that the atomic ratio of indium and antimony in the semiconductor nanostructures amounted to 38,26% and 61,74%, respectively. The current-voltage measurement between the upper and lower contacts of Cu/InSb/Cu structure (1 mm<sup>2</sup>) has shown that at 2.82 V negative voltage at the emitter contact, current density is 129,8 A/cm<sup>2</sup>, and the collector contact is heated up to 75 degrees during 150 sec. Thus, the experimental results confirmed the theoretical findings that the quantum wire systems can be used to create thermoelectric devices, which can be widely applied in electronics, in particular, for cooling integrated circuits (processors), thermal controlling of the electrical circuits by changing voltage value.*

*Keywords: nanowire array, quantum size effects, anodic alumina, indium antimonide, thermoelectric converter.*

### REFERENCES

1. Landis S. *Nano-lithography*, London UK: ISTE, Hoboken NJ: Wiley, 2011, 345 p.
2. Demikhovskii V. Ya., Vugal'ter G. A. *Fizika kvantovoykh nizkorazmernykh struktur* [Physics of the quantum low-dimensional structures]. Moscow, Logos, 2000, 248 p. (in Russian)
3. Obukhov I. A. Selfcooling of the quantum wire's emitter contact. *Journal of nano and Microsystem Technique*, 2007, vol. 5, pp. 21-23. (in Russian)
4. Obukhov I. A. Influence of external electromagnetic radiation on current voltage characteristics of quantum wire. *20<sup>th</sup> Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Ukraine, Sevastopol, 2010, pp. 833-835. (in Russian)
5. Obukhov I. A. *Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices*, Lambert Academic Publishing, 2014, 132 p.
6. Khan M. I., Penchev M., Jing X., Wang X., Ozkan M., C Ozkan. S., Bozhilov K. N. Electrochemical growth of InSb nanowires and report of a single nanowire field effect transistor. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2008, vol. 3, no 2, pp. 199-202. DOI: 10.1166/jno.2008.203
7. Chen H., Sun X., Lai K. W. C., Meyyappan M., Xi N. Infrared detection using an InSb nanowire. *Proceed. of IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC'09)*, USA, Traverse City, 2009, pp. 212-216.
8. Obukhov I. A. *Neravnovesnye efekty v elektronnykh priborakh* [Non-equilibrium effects in electronic devices]. Sevastopol', Veber, 2010, 303 p. (in Russian)
9. Yang X., Wang G., Slattery P., Zhang J. Z., Li Y. Ultrasmall single-crystal indium antimonide nanowires. *Crystal Growth and Design*, 2010, vol. 10, iss. 10, pp. 2479-2482. — DOI: 10.1021/cg100376u

10. Vasil'ev R. B., Dirin D. N. *Kvantovye tochki: sintez, svoystva, primeneniye* [Quantum dots: synthesis, properties and applications]. Moscow, FNM, 2007, 34 p. (in Russian)
11. Khan M. I., Wang X., Bozhilov K. N., Ozkan C. S. Templated fabrication of InSb nanowires for nanoelectronics. *Journal of Nanomaterials*, 2008, vol. 2008, pp. 1-5. — DOI: 10.1155/2008/698759
12. Gorokh G. G., Obukhov I. A., Lozovenko A. A., Zakhlebaeva A. I., Sochneva E. A. Template method of forming InSb large aspect ratio quantum nanowires. *23<sup>rd</sup> Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Ukraine, Sevastopol, 2013, pp. 820-823. (in Russian)
13. Gorokh G. G., Obukhov I. A., Poznyak A. A., Lozovenko A. A., Zakhlebaeva A. I., Sochneva E. A. Synthesis of InSb nanowires in anodic alumina modified matrixes // *22<sup>nd</sup> Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Ukraine, Sevastopol, 2012, pp. 655-658. (in Russian)
14. Gorokh G., Obukhov I., Lozovenko A., Zakhlebaeva A., Sochneva E. [Formation of InSb nanowires in porous anodic alumina]. *Proceed. VII International Conference "Fullerenes and nanostructures in condensed matter"*, 2013, pp. 377-387. (in Russian)
15. Обухов И. А. *Modelirovaniye perenosa zaryada v mezoskopicheskikh strukturakh* [Simulation of charge transport in mesoscopic structures]. Sevastopol, Veber, 2005, 226 p. (in Russian)
16. Obukhov I. A., Gorokh G. G. [InSb-based electron devices]. *22<sup>nd</sup> Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Ukraine, Sevastopol, 2012, pp. 653-654. (in Russian)
17. Wood G. C. *Oxides and oxide films*. USA, New York, Marcell Dekker, 1987, 537 p.
18. Ganzha S.V., Kukhareva N.V., Grushevskaya S.N., Vvedenskii A.V. [The kinetics of the formation of Cu(I) and Cu(II) oxides on copper in alkaline solutions and the features of their photoelectrochemical behavior. Part II. Photopotential]. *Condensed matter and interphase boundaries*, 2010, pp. 42-52. (in Russian)
19. Ganzha S.V., Maksimova S.N., Grushevskaya S.N., Vvedenskii A.V. Formation of oxides on copper in alkaline solution and their photoelectrochemical properties. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2011, vol. 47, no 2, pp. 191-202.
20. Grushevskaya S.N., Eliseev D. S., Ganzha S.V., Vvedenskii A.V. [The Properties of Semiconducting Copper Oxides Formed on Cu-Au Alloys]. *Condensed matter and interphase boundaries*, 2013, vol/ 15, no 3, pp. 253-265. (in Russian)
21. Obuhov I. A. [Features of functioning of quantum devices]. *Journal of nano and Microsystem Technique*, 2009, no 7, pp. 38-45. (in Russian)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук  $A_3B_5$ .— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.**

Проаналізовано фізичні основи створення напівпровідникових тензорезистивних датчиків механічних величин. Наведено характеристики тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук  $A_3B_5$  та результати досліджень впливу електронного опромінення на властивості ниткоподібних кристалів кремнію. Розглянуто технологічні основи виготовлення датчиків механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію для різних температурних діапазонів, а також їх конструктивні особливості. Описано датчики тиску різного призначення та їхні характеристики, а також датчики зусилля і прискорення. Розглянуто можливості створення багатofункційних датчиків для вимірювання механічних і теплових величин.

Для наукових, інженерно-технічних працівників і студентів, які навчаються за напрямом "Мікро- та нанoeлектроніка", а також широкого загалу спеціалістів у галузі сенсорної електроніки та мікроелектроніки.



НОВЫЕ КНИГИ

**Баришніков Г. В., Волинюк Д. Ю., Гельжинський І. І., Готра З. Ю., Мінаєв Б. П., Стахіра П. Й., Черпак В. В. Органічна електроніка.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.**

Наведено основні постулати квантової механіки для органічної електроніки. Описано базові структури та особливості функціонування нанорозмірних елементів, пристроїв електронної техніки: сонячних фотоелементів, світловипромінювальних структур, транзисторних структур, сенсорів тощо. Розглянуто фізико-хімічні основи технології створення електронних структур органічної електроніки.

Призначено для студентів та аспірантів, які навчаються за напрямом електроніки.

