1041

Electrical characteristics of indium antimonide nanowires in porous anodic aluminum oxide

 ¹Bozhev I.V., ²Gorokh G.G., ³Karushkin N.F, ²Lozovenko A.A.,
 ⁵Novoselov A.S., ⁴Obukhov I.A, ⁵Rumyancev S.V., ^{1,4}Smirnova E.A.
 ¹Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov, Moscow, 119991, Russian Federation el_smirnova@systemres.ru
 ²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 220013, Republic of Belarus ³State Research Institute «Orion» Kiev,03680, Ukraine
 ⁴Research & Development Organization «Sinergetika», Moscow, 115419, Russian Federation
 ⁵Federal Research Center Research Institute for System Studies of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117218, Russian Federation

Abstract: The current-voltage characteristics of samples of nanowires made in matrices of porous anodic aluminum oxide deposited by magnetron sputtering by gold contact groups are measured.

Keywords: indium antimonide, current-voltage characteristics, nanowire matrix, matrix, gold contact.

Электрические характеристики нанопроводов антимонида индия в пористых матрицах анодного оксида алюминия

¹Божьев И.В., ²Горох Г.Г., ³Карушкин Н.Ф., ²Лозовенко А.А., ⁵Новоселов А.С., ⁴Обухов И.А., ⁵Румянцев С.В.,^{1,4}Смирнова Е.А.

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация el_smirnova@systemres.ru

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь, ³НИИ «Орион», Киев,030557, Украина ⁴НПО «Синергетика», Москва, 115419, Российская Федерация

⁵ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, 117218, Российская Федерация

Аннотация: Измерены вольтамперные характеристики образцов нанопроводов, изготовленных в матрицах пористого анодного оксида алюминия с нанесенными методом магнетронного напыления золотыми контактными группами

Ключевые слова: антимонид индия, вольтамперные характеристики, матица нанопроводов, золотой контакт.

1. Введение

Антимонид индия, являясь узкозонным прямозонным полупроводником группы $A^{III}B^{V}$, выделяется уникальными свойствами: имеет малую ширину запрещённой зоны E_g (0,2355 эВ при 0 K, 0,180 эВ при 298 K), характеризуется самой высокой среди полупроводников подвижностью электронов (около 78000 см²/(B·c)), а также имеет самую большую длину свободного пробега электронов (до 0,7 мкм при 300 K) при слабой зависимости основных характеристик от температуры [1].

Наноструктуры из InSb имеют максимальную длину размерного квантования [2]. Они находят широкое применение при изготовлении высокочувствительных фотодиодов, фоторезисторов, датчиков Холла, оптических фильтров. СВЧ элементы из InSb обладают уникальными частотными свойствам (300 ГГц и выше) и способны работать при напряжениях менее 0,5 В [3].

Применение антимонида индия в качестве проводящего канала полевого транзистора на нанопроводе позволяет решить характерную для этого типа приборов проблему низкой крутизны BAX [2]. Транзистор, созданный в 2011 г. в Purdue University (West Lafayette, Indiana, USA) при поддержке DARPA [4] имел вполне приемлемую крутизну характеристики (g ~ 10⁻⁵ A/B) и высокую плотность тока (J ~ 10⁴ A/cm²). Аналогичные показатели продемонстрировал и р-канальный полевой транзистор с каналом из нанопровода InSb, легированного углеродом [5].

Несмотря полученные на многочисленные положительные результаты, экспериментальные прогнозы скором широком 0 промышленном применении квантовых приборов на основе нанопроводов из InSb [6] пока не оправдываются. Это связано с отсутствием промышленной технологии нанопроводов создания с заланными геометрическими и электрофизическими характеристиками. Измеренная подвижность в InSb нанопроводах оказалась не столь большой, как ожидалось. В разных экспериментах она изменяется в широких пределах от 120 см²/В·с до 25 000 см²/В·с и существенно зависит от технологии

Copyright © 2018 for this paper by its authors. Copying permitted for private and academic purposes. Proceedings of the 28th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2018) Sevastopol, Russian Federation, September 9–15, 2018

изготовления нанопровода и свойств подложки, на которую он помещен [7].

В данной работе приведены результаты измерений электрических характеристик единичных нанопроводов и матриц нанопроводов из антимонида индия в порах анодного оксида алюминия на золотой пленке.

2. Экспериментальные образцы

Объектами исследований InSb, являются нанопровода сформированные анодного в порах оксида алюминия методом электрохимического осаждения из растворов хлоридов. Высота проводов 30 мкм, диаметр 40 нм (Рис. 1а). Золотые контактные группы нанесены методом магнетронного напыления. Нижний контакт имеет соединение со всеми проводами в матрице, верхний – выделяет круглые области диаметром 100 мкм (Рис.1b)





Рис. 1. а – Матрица ОАО с осажденными проводами из антимонида индия, b – схема расположения контактных групп
Fig. 1. a – Matrix AAO with precipitated wires from indium antimonide, b – layout of contact groups

3. Измерения ВАХ одиночного провода в матрице

Прежде всего для оценки допустимого диапазона напряжений были измерены ВАХ одиночных проводов в составе матрицы. При проведении I(V) СЗМ спектроскопии (Current Imaging Tunneling Spectroscopy, CITS) в каждой точке изображения обратная связь разрывается, и напряжение смещения проходит ряд значений V_i (от -1B до +1B и обратно) при этом записываются соответствующие значения тока I_i. Таким образом в зоне, где не был нанесен верхний золотой контакт были исследованы 400

рабочих точек, 20 % которых составляли области с осажденными проводами. Типичная форма ВАХ одиночного провода показана на Рис. 2а. При напряжении 1 В через провод проходит ток порядка 0,098 мкА, площадь сечения единичного провода – 1,26*10⁻¹¹ см², таким образом плотность тока составляет 7,8*10³ А/см². Для сравнения, плотность тока через канал транзистора, полученная в США в 2011 г. составляла порядка 10⁴ А/см² [4].

Используя расчетную концентрацию носителей в нанопроводе порядка 10¹⁷ см⁻³, легко оценить электронную подвижность. Она составляет примерно 10⁴ см²/В*с, то есть в восемь раз ниже, чем в объемном кристаллическом материале. Мы считаем, что это обусловлено поликристаллической структурой нанопроводов антимонида индия.



Рис. 2. а – ВАХ одиночного провода с контактом к подложке, b – ВАХ одиночного провода без контакта с подложкой Fig. 2. а – The CVC of the single-wire with contact to substrate, b – CVC of the single-

wire without contact to substrate

На Рис. 2b показана типичная ВАХ нанопровода, у которого контакт с золотой подложкой осуществляется через туннельный зазор. Количество таких проводов приблизительно составляет 30% от общего количества нанопроводов в матрице. Это свидетельствует о недостаточном уровне технологии создания нанопроводов.

4. Измерения характеристик матрицы

Измерения проводились на 10 контактных площадках. На контактную площадку № 1 подавалось напряжение V_i=-200мВ...200мВ

(шаг 5мВ). На Рис. 3 представлены все полученные вольтамперные характеристики. Если пересчитать полученные результаты, учитывая, что измерялись BAX ДВУХ соединенных последовательно площадок, содержащая миллион проводов каждая, то при напряжении 1 В получается 0.678 мA. Используя характеристики олиночных ток порядка нанопроводов, можно заключить, что примерно 69% проводов под контактной площадкой имеют непосредственный контакт с подложкой.



Рис. 3. Контактные площадки 100 мкм в диаметре (слева) и BAX матриц (справа) Fig. 3. Contact pads 100 µm in diameter (left) and the current-voltage characteristics of the matrix (right)

Также проводились измерения емкости матрицы нанопроводов под золотыми контактными площадками диаметром 100 мкм. Они показали значительный разброс значений при разных способах измерения: от единиц $h\Phi/cm^2$ до десятков $h\Phi/cm^2$. Это свидетельствует о недостаточно отработанной пока методике измерения этого параметра.

5. Заключение

Проведенные измерения позволяют заключить, что структура, представляющая собой параллельно соединенные InSb нанопровода в матрице пористого AOA с золотыми контактами может быть использована для высокочастотных устройств. Грубая оценка предельной частоты по RC дает значения в сотни гигагерц. Относительно высокая емкость структуры открывает перспективу ее применения в антеннах терагерцового диапазона.

Дальнейшее улучшение электрических характеристик матриц нанопроводов возможно за счет доработки технологии равномерного заполнения проводами пор матрицы и использования более толстых верхних золотых контактов.

Список литературы

[1] Khan M.I., Penchev M., Jing X., Wang X., Ozkan M., Ozkan C.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.

[2] Obukhov I.A. Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices. LAM-BERT Academic Publishing, 2014. 132 p.

[3] Chen H., Sun X., Lai K.W.C., Meyyappan M., Xi N. Infrared detection using an InSb nanowire. IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference

[4] Suprem R. Das, Collin J. Delker, Dmitri Zakharov, Yong P. Chen, Timothy D. Sands and David B. Janes Room Temperature Device Performance of Electrodeposited InSb Nanowire Field Effect Transistors, Appl. Phys. Lett. 2011. -V. 98, P. 243504-1 - 243504-3.

[5] Zai-Xing Yang, Ning Han, Fengyun Wang et al. Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors. Nanoscale, 2013.-V. 5 - P. 9671 –9676

[6] Datta S. The 21st Century Energy Efficient Logic Transistor // Sematech-2007. Oregon. USA. October 9th. 2007. http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/ Key% 20Note% 20Suman% 20Datta.pdf.

[7] Önder Gül1, David J. van Woerkom, Ilse van Weperen, Diana Car, Sébastien R Plissard, Erik P. A. M. Bakkers and Leo P. Kouwenhoven Towards high mobility InSb nanowire devices, Nanotechnology, 2015.- V. 26. - P. 215202-1 - 215202-7.

References

[1] Khan M.I., Penchev M., Jing X., Wang X., Ozkan M., Ozkan C.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.

[2] Obukhov I.A. Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices. LAM-BERT Academic Publishing, 2014. 132 p.

[3] Chen H., Sun X., Lai K.W.C., Meyyappan M., Xi N. [Infrared detection using an InSb nanowire]. *IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference*

[4] Suprem R. Das, Collin J. Delker, Dmitri Zakharov, Yong P. Chen, Timothy D. Sands and David B. Janes [Room Temperature Device Performance of Electrodeposited InSb Nanowire Field Effect Transistors], *Appl. Phys. Lett.* 2011. -V. 98, P. 243504-1 - 243504-3.

[5] Zai-Xing Yang, Ning Han, Fengyun Wang et al. [Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors]. *Nanoscale*, 2013.-V. 5 - pp. 9671 –9676

[6] Datta S. [The 21st Century Energy Efficient Logic Transistor]. *Sematech-2007*. Oregon. USA. October 9th. 2007. http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/ Key%20Note% 20Suman% 20Datta.pdf.

[7]] Önder Güll, David J. van Woerkom, Ilse van Weperen, Diana Car, Sébastien R Plissard, Erik P. A. M. Bakkers and Leo P. Kouwenhoven [Towards high mobility InSb nanowire devices], *Nanotechnology*, 2015.- V. 26. - pp. 215202-1 - 215202-7.