

Матрицы нанопроводов из антимонида индия и их применения

¹ Обухов И. А., ^{2,3} Горох Г. Г., ² Лозовенко А. А., ⁴ Смирнова Е. А.

¹ НПП «Системные Ресурсы»
Московская обл., 142717, Российская Федерация
i_obukhov@systemres.ru

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

gorokh@bsuir.by

³ Университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО)
Кронверкский просп., 49, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁴ Физический факультет,

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Российская Федерация

Статья поступила 29 августа 2016 г.

Аннотация: Описаны методы изготовления матриц нанопроводов из антимонида индия в регулярных порах анодного оксида алюминия с различными металлическими контактами. Показано, что на основе этих матриц могут быть созданы генераторы электромагнитного излучения терагерцевого диапазона частот, охлаждающие покрытия, фотопреобразователи для далекой инфракрасной и субмиллиметровой областей спектра.

Ключевые слова: нанопровод, антимонид индия, анодный оксид алюминия, СВЧ-генератор, терагерц, нанохолодильник, фотопреобразователь.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Матрицы нанопроводов из антимонида индия и их применения / Обухов И. А., Горох Г. Г., Лозовенко А. А., Смирнова Е. А. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 1. С. 78–94.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Матрицы нанопроводов из антимонида индия и их применения / И. А. Обухов, Г. Г. Горох, А. А. Лозовенко, Е. А. Смирнова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2018. — Т. 1, № 1. — С. 78–94.

Matrices of indium antimonide nanowires and their applications

I. A. Obukhov¹, G. G. Gorokh^{2,3}, A. A. Lozovenko², and E. A. Smirnova⁴

¹ Research & Development Company “System Recourses”
Moscow Region, 142717, Russian Federation
i_obukhov@systemres.ru

² Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6, P. Brovka Str., Minsk, 220013, Republic of Belarus
gorokh@bsuir.by

³ ITMO University

49, Kronversky Ave., St. Petersburg, 197101, Russian Federation

⁴ Faculty of Physics,

Lomonosov Moscow State University

1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

Received on August 29, 2016

Abstract: The methods of manufacturing the matrices of the indium antimonide nanowires in regular pores of anodic alumina with various metal contacts on the different substrates have been described. It is shown, that on the basis of such matrices it is possible to create terahertz electromagnetic radiation generators as well as cooling coatings and solar cells for far-infrared and submillimeter regions of the spectrum.

Keywords: nanowire, indium antimonide, anodic alumina matrices, microwave generator, terahertz, nanocooler, photoconverter.

For citation (IEEE): I. A. Obukhov, G. G. Gorokh, A. A. Lozovenko, and E. A. Smirnova, “Matrices of nanowires of indium antimonide and their applications,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 78–94. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.1.06

1. Введение

Уникальные свойства антимонида индия (*InSb*) делают этот материал одним из целевых для электроники сверхвысоких частот, ориентированной на низкое энергопотребление [1, 2]. Благодаря малой эффективной массе электронов проводимости, при комнатной температуре на электрические характеристики структур из *InSb* с размерами 60 нм и меньше существенно влияет размерное квантование [1, 3].

Современные технологии позволяют формировать в регулярных порах матриц анодного оксида алюминия (АОА) нанопровода из *InSb* с диаметром

от 30 нм [4, 5, 6, 7, 8]. Таким образом, имеется возможность использовать на практике размерное квантование энергии электронов в этих объектах.

На рис. 1 схематично изображен нанопровод, а на рис. 2 показаны характерные потенциальные рельефы для электронов в такой структуре при различных поперечных размерах проводящего канала. Границы контактов с проводящим каналом представляют собой гетеропереходы. Проводящий канал при поперечном сечении $L_{\perp} < L_{dq}$ оказывается потенциальным барьером для электронов, высота которого регулируется величиной L_{\perp} . Чем меньше поперечное сечение, тем выше барьер и, соответственно, меньше концентрация электронов в канале [3].

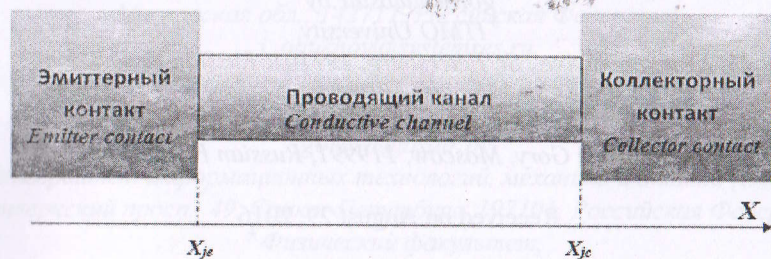


Рис. 1. Нанопровод — структура, состоящая из проводящего канала и двух контактов [3].

Fig. 1. Nanowire is a structure consisting of a conductive channel and two contacts [3].

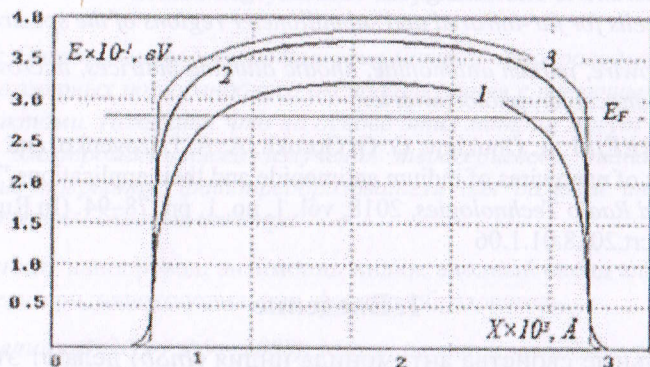


Рис. 2. Потенциальные рельефы для электронов в нанопроводе при нулевом приложенном напряжении, комнатной температуре и различных поперечных размерах проводящего канала L_{\perp} : 1 — $L_{\perp} = L_{dq}/2$; 2 — $L_{\perp} = L_{dq}/3$; 3 — $L_{\perp} = L_{dq}/4$. L_{dq} — длина размерного квантования [3].

Fig. 2. Potential reliefs for the electrons in a nanowire at zero applied voltage, room temperature and different transverse dimensions of the conductive channel L_{\perp} : 1 — $L_{\perp} = L_{dq}/2$; 2 — $L_{\perp} = L_{dq}/3$; 3 — $L_{\perp} = L_{dq}/4$. L_{dq} is dimensional quantization length [3].

Указанными зависимостями можно воспользоваться для проектирования функциональных электронных устройств на основе нанопроводов. При этом следует учитывать, что протекание тока через гетеропереходы приводит к появлению неравновесных электронов [3]. Их свойства положены в основу функционирования рассмотренных здесь приборов.

2. Формирование нанопроводов в матрице анодного оксида алюминия

Нанопровода из *InSb* в матрицах АОА могут быть сформированы на различных подложках: стеклянных, диэлектрических или полупроводниковых, а также на свободных мембранах и подложках из пористого оксида алюминия [4, 5, 6, 7, 8]. Диаметры пор в матрицах АОА и толщина самого оксида задаются заранее, исходя из технических требований к создаваемому устройству.

Методика приготовления матриц АОА, предназначенных для формирования в них нанопроводов, размер пор, а также технология синтеза проводящих каналов нанопроводов и материал контактов определяют свойства и характеристики матричных структур. На рис. 3 схематично показаны последовательности технологических процессов формирования нанопроводов *InSb* в порах тонких матриц АОА на кремниевых подложках (рис. 3а) и в нанопористых подложках из АОА (рис. 3 б). В последнем случае отношение длины проводящих каналов нанопроводов к их диаметру может достигать тысячи и более.

Электрохимическое осаждение антимонида индия в поры матриц АОА непосредственно на поверхность кремния или на поверхность металлов осуществляется в хлоридном электролите следующего состава: водный раствор 0,1 М *SbCl₃*, 0,15 М *InCl₃*, 0,36 М лимонная кислота и 0,17 М цитрат калия, доведенный до значения *pH* 2,0 20 % раствором *HCl* [9]. Осаждение *InSb* проводится в комбинированном режиме при переменном токе (50 Гц) с плотностью 8 мА/см² в течение 3 минут и постоянном токе с плотностью 4 мА/см² в течение 20—50 минут при постоянном перемешивании раствора магнитной мешалкой. Катодный потенциал относительно электрода сравнения (*Ag/AgCl*) при осаждении на *n-Si*-подложки составляет 1,2—1,7 В, а при осаждении на металл — 0,7—0,9 В. Температуру электролита поддерживают в диапазоне 25±1 °С.

Такая технология позволяет формировать регулярные массивы нанопроводов с диаметрами от 30 до 70 нм и расстояниями между порами 40—100 нм. Высота матриц может варьироваться от 200 нм до 50 мкм.

«Плотность упаковки» нанопроводов составляет 10^{10} – 10^{11} проводов на см^2 , а характерная площадь сечения проводящих каналов — 10^{-11} см^2 .

Электронно-микроскопические снимки матриц АОА на кремниевой подложке для осаждения нанопроводов, а также массив нанопроводов на подложке после селективного растворения матрицы АОА представлены на рис. 4. На рис. 5 показаны электронные микрофотографии подложки из АОА с нанопроводами *InSb* и сами нанопровода после селективного растворения подложки.

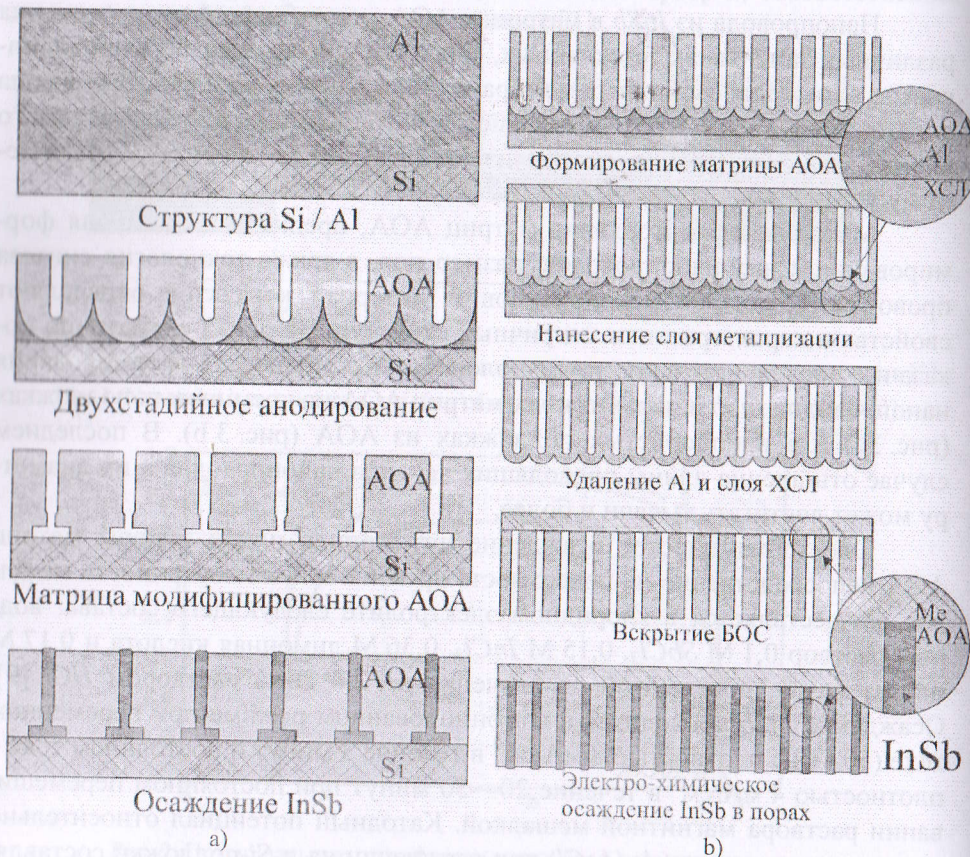


Рис. 3. Схематическое изображение последовательности технологических процессов формирования *InSb* нанопроводов в матрицах АОА на *n-Si*-подложках (а) и в порах нанопористых подложек из АОА (б).

Fig. 3. Schematic representation of the technological processes sequence of *InSb* nanowires formation on *n-Si* substrates with anodic alumina matrices (a) and in the pores of the anodic alumina substrates (b)

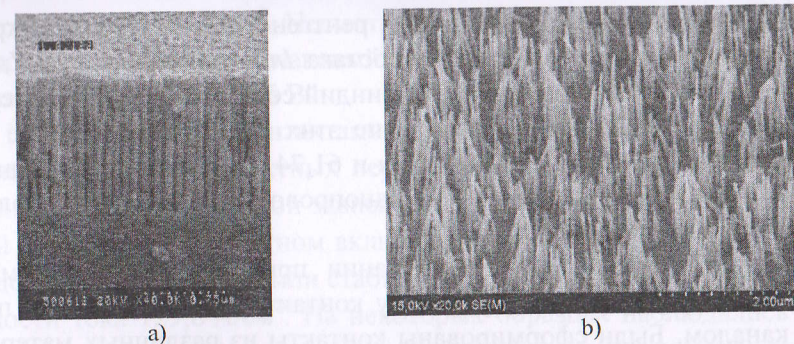


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки матриц АОА на кремниевой подложке для формирования матрицы нанопроводов (а) и массива нанопроводов *InSb* на подложке после селективного удаления матрицы АОА (б).

Fig. 4. SEM images of anodic alumina matrix cross-section on a silicon substrate (a) and *InSb* nanowire array on *Si* substrate after a selective removal of an anodic alumina matrix (b)

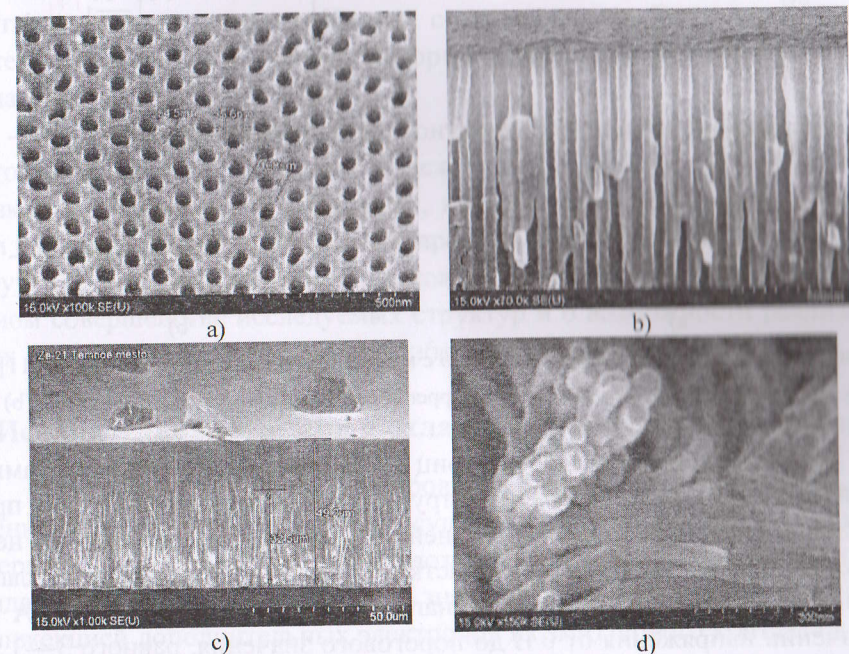


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки поверхности (а) и поперечного сечения матриц АОА (б), сечения подложки с осажденными *InSb* нанопроводами (с) и нанопроводов *InSb* после селективного удаления подложки АОА (д).

Fig. 5. SEM images of the surface (a) and the cross-section of AOA substrate (b), the cross section AOA substrate with deposited *InSb* nanowires (c), and the *InSb* nanowires after a selective removal of AOA substrate (d)

Методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа были проведены исследования состава *InSb* нанопроводов. Удалось определить, что в весовом выражении индий составляет 36,89 %, а сурьма — 63,11 %. Атомарное же соотношение этих элементов в составе наноструктур несколько иное — 38,26 % *In* и 61,74 % *Sb*. Полученные данные свидетельствуют о том, что *InSb* в нанопроводах находится в поликристаллическом состоянии [10, 11].

Важную роль в функционировании приборов на основе матриц нанопроводов играют переходы между контактными областями и проводящим каналом. Были сформированы контакты из различных материалов (никеля, меди и алюминия) и проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) матриц нанопроводов *InSb* в АОА. Методика измерений описана в работе [11].

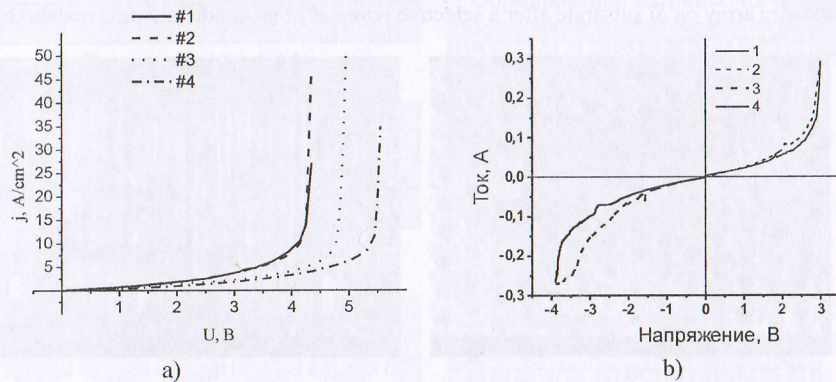


Рис. 6. ВАХ матрицы нанопроводов *InSb* с контактами из никеля (а) и меди (б) [11].

Fig. 6. CVC of *InSb* nanowires matrix with copper contacts (a) and with nickels contacts (b) [11]

На рис. 6 показаны ВАХ матриц нанопроводов *InSb* с контактами из никеля и меди. Измеренные ВАХ структур с контактами из никеля, представленные на рис. 6а, имели нелинейный вид, на них по степени нелинейности можно выделить три участка. Первый характеризуется слабой нелинейной зависимостью тока от напряжения: ток от 0 мА до 5 мА при увеличении напряжения от 0 В до порогового значения, равного 3—3,5 В. На втором участке при дальнейшем росте напряжения до 4—4,5 В коэффициент нелинейности становится максимальным, ток ускоренно возрастает до 15—20 мА. На третьем участке при незначительном приращении напряжения ток возрастает до своего максимального значения, при этом плотность тока через контакт, соединяющий около $1,025 \cdot 10^8$ нанопрово-

дов, составила $27,18 \text{ A/cm}^2$. Несмотря на то, что ВАХ, измеренные на разных контактах, имели одинаковый вид, границы обозначенных участков изменялись в пределах $\pm 0,5 \text{ В}$.

На ВАХ матриц с контактами из меди после первых включений произошла приработка контактных переходов *InSb/Cu*. ВАХ имели стабильный вид с экспоненциальной зависимостью тока от изменяющихся напряжений при прямом и обратном включениях (рис. 6б). Токи через нанопровода достигали 320 мА и были стабильны во времени, что соответствовало плотности тока $129,8 \text{ A/cm}^2$. На некоторых образцах наблюдались ВАХ с гистерезисом, который пропадал после проведения нескольких серий измерений. Это явление связано, по-видимому, с наличием окиси и закиси меди и миграцией кислорода в приконтактном слое матрицы [11].

ВАХ структуры с алюминиевыми контактами имели вид, похожий на ВАХ структуры с медными контактами, представленной на рис. 6б. Плотность тока в таких структурах составляла около 100 A/cm^2 . На характеристике имелись изломы, которые можно объяснить нагревом образца.

Эксперименты на образцах с контактами из золота продолжают до настоящего времени. Они дают надежду на получение плотностей тока, близких к значениям 10^4 — 10^5 A/cm^2 , которые были рассчитаны в работе [1] и измерены для единичного нанопровода из *InSb* авторами работы [12]. Получение высоких плотностей токов будет свидетельствовать о достаточном совершенстве исследуемых структур и о возможности реализации на их основе предлагаемых ниже приборных конструкций.

3. Испарительная эмиссия и охлаждение эмиттерного контакта

В проводящих каналах нанопроводов с сечением, меньшим L_{dq} , собственная концентрация электронов существенно меньше, чем в объемном материале. При этом измеряемая плотность тока значительно превышает ожидаемые для таких концентраций значения. Эта особенность объясняется инжекцией дополнительных электронов из эмиттерного контакта в проводящий канал нанопровода [3].

Как показано в работе [13], такая инжекция эквивалентна испарительной эмиссии. Она должна приводить к охлаждению эмиттерного контакта и нагреванию коллекторного. На гетеропереходе между эмиттерным контактом и проводящим каналом нанопровода реализуется эффект Пельтье.

Результаты расчета температуры эмиттерного контакта единичного нанопровода как функции приложенного напряжения представлены на рис. 7. Предполагается, что объем охлаждаемого контакта в 100 раз больше, чем объем проводящего канала. Как видно на рис. 7, температура охлаждения является функцией напряжения и она при одинаковом напряжении тем ниже, чем выше концентрация электронов в контакте.

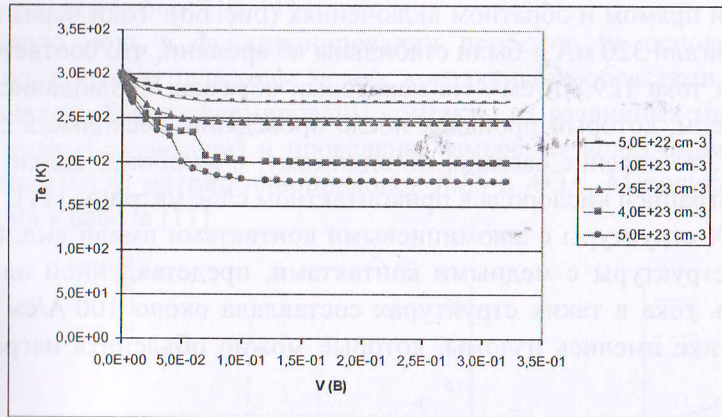


Рис. 7. Зависимость температуры эмиттерного контакта от напряжения при температуре окружающей среды $T = 300^\circ\text{K}$ и различных концентрациях электронов в контакте [13].

Fig. 7. Dependence of emitter's contact temperature from voltage under condition of external temperature of 300°K and different electron densities in a contact [13]

В случае матрицы нанопроводов можно ожидать высокой эффективности охлаждения проводящей поверхности при помощи такого теплового насоса. Это обусловлено тем, что в структуре отсутствуют латеральные тепловые потоки.

В работах [11, 14, 15] представлены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность такого применения массивов нанопроводов. Согласно [11] на матрице толщиной $35\ \mu\text{m}$ с диаметром проводов $35\ \text{nm}$ и медными контактами при напряжении в $3\ \text{V}$ зафиксировано охлаждение эмиттерного контакта на 22°C . Потребляемая мощность составила $0,75\ \text{Вт}$.

4. Поглощение фотонов и фотообразование энергии

Разность между энергией первого разрешенного для электронов в проводящем канале уровня E_I и их энергией Ферми E_F в контакте (см. рис. 2)

$$\Delta = E_I - E_F$$

определяет минимальную частоту ν_{min}

$$\nu_{min} = \Delta/h$$

электромагнитного излучения, поглощаемого гетеропереходом между контактом и проводящим каналом нанопровода. Здесь h — постоянная Планка. Для нанопровода с поперечным размером проводящего канала L_L меньшим, чем длина размерного квантования, величины Δ и ν_{min} тем больше, чем меньше L_L . Если ориентироваться на результаты расчетов, представленные на рис. 2, то ν_{min} находится в диапазоне от единиц до десятков ТГц, что соответствует субмиллиметровому и далекому инфракрасному диапазонам длин волн.

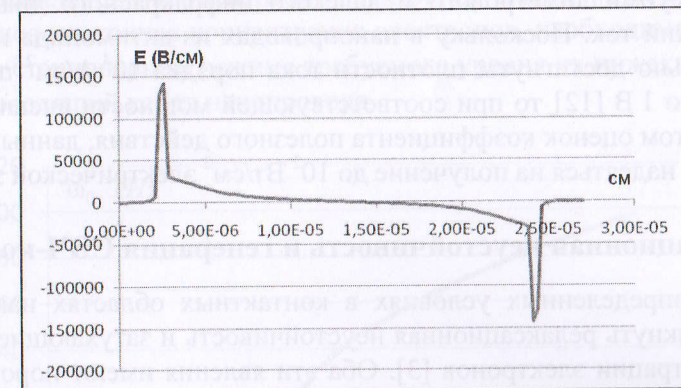


Рис. 8. Распределение электрического поля в нанопровode при нулевом приложенном напряжении [16].

Fig. 8. Distribution of the electric field in the nanowire at applied zero nominal voltage [16]

При поглощении электромагнитного излучения гетеропереходом происходит переход электронов из состояний с энергией, меньшей или равной E_F , в состояния с энергией, большей или равной E_I . Электрическое поле в структуре распределено таким образом (см. рис. 8), что избыточные электроны выталкиваются им из проводящего канала в контакты. В результате в нанопровode возникает разность потенциалов между контактами, индуцированная внешним электромагнитным излучением [16]

$$V_{ind} = Wh/(2\pi kT_{ph}e),$$

где W — мощность внешнего электромагнитного излучения; k — постоянная Больцмана, T_{ph} — температура поглощаемых фотонов, в предположе-

нии, что они распределены в соответствии с формулой Бозе — Эйнштейна; e — заряд электрона.

Таким образом, нанопровод может быть фотоприемником. Его вольт-ваттная чувствительность дается выражением

$$S_V = V_{ind}/W = h/(2\pi k T_{ph} e),$$

Если $T_{ph} = 300^\circ\text{K}$, то S_V порядка 10^4 В/Вт.

Как показано в работе [16], вольт-амперная характеристика нанопровода при воздействии внешнего электромагнитного излучения смещается в левый верхний квадрант. То есть возможно выделение энергии на внешней нагрузке. Нанопровод может преобразовывать энергию электромагнитного излучения субмиллиметрового и далекого инфракрасного диапазонов в электрический ток. Поскольку в нанопроводах из антимонида индия экспериментально достигнуты плотности тока порядка 10^4 А/см² при напряжении около 1 В [12], то при соответствующей мощности внешнего излучения с учетом оценок коэффициента полезного действия, данных в работе [16], можно надеяться на получение до 10^2 Вт/см² электрической энергии.

5. Релаксационная неустойчивость и генерация СВЧ-колебаний

При определенных условиях в контактных областях нанопровода могут возникнуть релаксационная неустойчивость и затухающие осцилляции концентрации электронов [3]. Оба эти явления имеют пороговый характер и возможны, только если подвижности электронов в контактах и проводящем канале нанопровода различны.

Будем для определенности считать, что подвижность электронов в проводящем канале нанопровода больше их подвижностей в эмиттерном и коллекторном контактах. Такое допущение оправдано для нанопроводов из *InSb* с контактами из других полупроводниковых материалов или из металлов. Тогда при положительном смещении между коллектором и эмиттером релаксационная неустойчивость может наблюдаться в коллекторном контакте, а осцилляции концентрации электронов — в эмиттерном контакте.

Релаксационная неустойчивость развивается, если плотность тока в нанопроводе j превышает пороговое значение j_{ins} . Причиной возникновения неустойчивости является слишком большая при $j > j_{ins}$ скорость неравновесных электронов, попадающих из проводящего канала нанопровода в коллекторный контакт. Они не успевают перейти в состояние термодинамического равновесия за время пролета длины релаксации и накапливаются в контактной области.

Согласно расчетам [3] концентрация электронов в коллекторном контакте экспоненциально нарастает с инкрементом порядка 40 ТГц при комнатной температуре. При достижении некоторого предельного значения концентрации [17, 18] ее нарастание сменяется экспоненциально быстрым затуханием с декрементом того же порядка, либо происходит тепловой пробой. Для нанопроводов с коротким каналом [3] и невысокой собственной концентрацией электронов в коллекторном контакте релаксационная неустойчивость должна приводить к заметным изменениям в проводимости структуры.

Если плотность тока в нанопроводе превышает другое пороговое значение j_{osc} , в эмиттерном контакте возникают затухающие высокочастотные осцилляции концентрации электронов [3]. Причиной осцилляций является недостаточная концентрация электронов, необходимых для обеспечения в стационарном режиме требуемого уровня их инжекции из эмиттера в проводящий канал нанопровода.

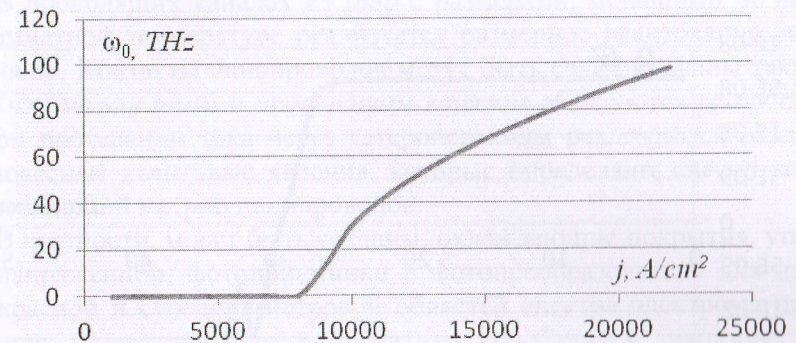


Рис. 9. Частота осцилляций концентрации электронов в эмиттере ω_0 как функция плотности тока j [18].

Fig. 9. The oscillation frequency of the electron concentration in the emitter ω_0 as a function of current density j [18]

В общем случае пороговые плотности токов j_{ins} и j_{osc} — различные величины. Однако, варьируя параметры нанопровода, можно добиться того, что оба рассматриваемых явления начнут развиваться при одном и том же значении плотности тока [18]. При этом, как видно на рис. 9, в эмиттере появляется встроенная индуктивность, а в коллекторе, как показано на рис. 10, формируется область с отрицательным дифференциальным сопротивлением. То есть возникают условия, необходимые для генерации СВЧ-мощности.

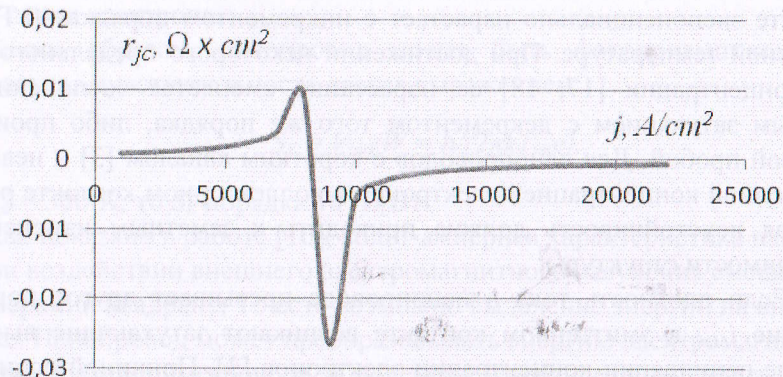


Рис. 10. Дифференциальное сопротивление перехода между проводящим каналом и коллектором r_{jc} как функция плотности тока j [18].

Fig. 10. Differential resistance of the junction between the conductive channel and collector r_{jc} as a function of current density j [18]

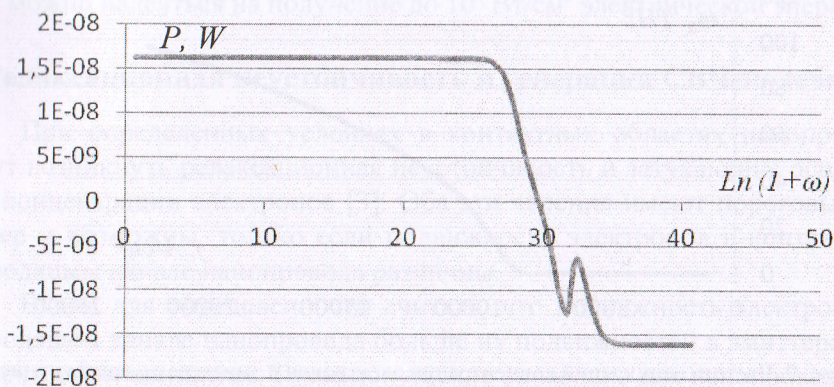


Рис. 11. Максимальная СВЧ-мощность, генерируемая одним нанопроводом [18].

Fig. 11. Maximum microwave power generated by a nanowire [18]

Анализ соотношений, полученных в работах [3, 17, 18], показывает, что генерация СВЧ-колебаний в квантовом проводе возможна только при определенных соотношениях между его геометрическими и электрофизическими параметрами. Представленные на рис. 9, 10 и 11 результаты были рассчитаны для нанопровода с проводящим каналом из *InSb* длиной 100 нм и кремниевыми контактами *n*-типа. Длина эмиттерного контакта равнялась также 100 нм, а концентрация электронов — 10^{14} см^{-3} . Длина коллекторного контакта составляла 500 нм, а концентрация электронов — $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Результаты расчета максимальной мощности, отдаваемой таким нанопроводом во внешнюю цепь, представлены на рис. 11. При частотах, меньших 1,4 ТГц, он может генерировать порядка 10 нВт СВЧ-мощности. При этом его расчетный КПД оказывается около 13 %. При частотах, превышающих 7,2 ТГц, генерация прекращается и квантовый провод поглощает внешнюю энергию [17, 18].

5. Заключение

Современная технология позволяет создавать матрицы нанопроводов из антимонида индия в регулярных порах анодного оксида алюминия. Геометрические характеристики проводящих каналов управляемо варьируются: поперечные сечения — в пределах от 30 нм до 70 нм, а длины — от 200 нм до 50 мкм. Планарные размеры матриц, в принципе, ничем не ограничены. Контакты нанопроводов могут быть созданы из различных металлов, полуметаллов и полупроводников.

В проводящих каналах из *InSb* с размерами, меньшими 60 нм, уже при комнатной температуре реализуется размерное квантование энергии электронов. Контакты нанопроводов могут быть сформированы таким образом, что между ними и проводящим каналом образуются гетеропереходы. При протекании тока через гетеропереходы реализуются различные неравновесные квантовые явления, которые определяют спектр возможных применений матриц нанопроводов.

В частности, могут быть созданы: охлаждающие покрытия, управляемые напряжением; фотоприемники и фотопреобразователи для далекой инфракрасной и субмиллиметровой областей спектра электромагнитного излучения; генераторы электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 300 ГГц до 3 ТГц. Теоретические оценки указывают на уникальные характеристики этих перспективных устройств. Первые экспериментальные результаты подтверждают теоретические предсказания.

Список литературы

1. Obukhov I. A. Some aspects of nanoelectronics development in Russia // WTEC Workshop Proceedings: Russian Research and Development Activities on Nanoparticles and Nanostructured Materials. St. Petersburg. 1997. С. 116—125.
2. Datta S. The 21-st Century Energy Efficient Logic Transistor // Sematech-2007 [Electronic resource]. Oregon, USA. October 9th. 2007. Mode of access: <http://www.semtech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/Key Note Suman Datta.pdf>. (дата обращения: 27.12.2016).
3. Obukhov I. A. Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices. LAMBERT Academic Publishing, 2014. 132 с.

4. Горох Г. Г. Высокоупорядоченные анодные оксидные пленки алюминия для формирования наноструктур // Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия. Петрозаводск : КГПУ, 2007. С. 62—68.
5. Синтез нанопроводов *InSb* в модифицированных матрицах анодного оксида алюминия / Горох Г. Г., Обухов И. А., Позняк А. А., Лозовенко А. А., Захлебаева А. И., Сочнева Е. А. // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2012 (Севастополь, 10—14 сент. 2012 г.). 2012. С. 655—658.
6. Темплейтный метод формирования квантовых нанопроводов *InSb* с большим аспектным отношением / Горох Г. Г., Обухов И. А., Лозовенко А. А., Сочнева Е. А. // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2013 (Севастополь, 8—13 сент. 2013 г.). 2013. С. 820—823.
7. Обухов И. А., Горох Г. Г. Электронные приборы на основе антимонида индия // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2012 (Севастополь, 10—14 сент. 2012 г.). 2012. С. 653—654.
8. Direct observation of anodic film growth and dissolution on superimposed aluminum and nickel metallic layers / Mozalev A., Gorokh G., Solovei D., Poznyak A. ; ed. Gustaaf Van Tendeloo // Proceedings of the 13-th European Microscopy Congress (EMC 2004), Belgium, 22—24 Aug. 2004. Antwerp, 2004. С. 533—534.
9. Electrochemical Growth of *InSb* Nanowires and Report of a Single Nanowire Field Effect Transistor / Khan M. I., Penchev M., Jing X., Wang X., Ozkan M., Ozkan C. S., Bozhilov K. N. // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. 2008. Т. 3, № 2. С. 199—202.
10. Электрофизические свойства массивов квантовых нанопроводов из *InSb* / Горох Г. Г., Обухов И. А., Лозовенко А. А., Захлебаева А. И., Сочнева Е. В. // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2014 (Севастополь, 7—13 сент. 2014 г.). 2014. С. 791—792.
11. Горох Г. Г., Обухов И. А., Лозовенко А. А. Массивы нанопроводов из антимонида индия для перспективных термоэлектрических устройств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2015. № 1. С. 3—11.
12. Room Temperature Device Performance of Electrodeposited *InSb* Nanowire Field Effect Transistors / Das S. R., Delker C. J., Zakharov D., Chen Y. P., Sands T. D., Janes D. B. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 243504.
13. Обухов И. А. Самоохлаждение эмиттерного контакта квантового провода // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 5. С. 21—23.
14. Новые материалы для термоэлектрических преобразователей на основе массивов нанопроводов / Обухов И. А., Горох Г. Г., Лозовенко А. А., Сочнева Е. А. // Термоэлектрики и их применения (доклады Межгосударственной конференции 2014 г.). СПб., 2015. С. 29—34.
15. *InSb* and *GaInSb* nanowires for thermoelectric applications / Ye Q. L., Scheffler R., Kumari J., Leverenz R. // Nanotech. 2007. Vol. 1. P. 237—240.
16. Обухов И. А. Влияние внешнего электромагнитного излучения на ВАХ квантового провода // 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2010 (Севастополь, 13—17 сент. 2010 г.). 2010. С. 833—835.
17. Обухов И. А. Генерация шума квантовым проводом // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2014 (Севастополь, 7—13 сент. 2014 г.). 2014. С. 798—799.
18. Обухов И. А., Смирнова Е. А. Нанопровод как активный элемент генератора СВЧ-излучения // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 8. С. 509—514.

References

- [1] I. A. Obukhov, “Some aspects of nanoelectronics development in Russia,” in *WTEC Workshop Proceedings: Russian Research and Development Activities on Nanoparticles and Nanostructured Materials*, 1997, pp. 116—125.
- [2] S. Datta, “The 21st Century Energy Efficient Logic Transistor,” *4th International Symposium on Immersion Lithography*, 2007. [Online]. Available: <http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/Key Note Suman Datta.pdf>. [Accessed: 27-Dec-2016].
- [3] I. A. Obukhov, *Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices*. LAMBERT Academic Publishing, 2014.
- [4] G. G. Gorokh, “Vysokouporядochennye anodnye oksidnye plenki alyuminiya dlya formirovaniya nanostruktur [The highly ordered anodic alumina films for the formation of nanostructures],” in *Nanostrukturirovannyye oksidnye plenki i pokrytiya* [Nanostructured oxide films and coatings], Petrozavodsk: KGPU, 2007, pp. 62—68. (In Russ.).
- [5] G. Gorokh, I. Obukhov, A. Poznyak, A. Lozovenko, A. Zakhlebaeva, and E. Sochneva, “Synthesis of *InSb* nanowires in anodic alumina modified matrixes,” in *CriMiCo 2012 - 2012 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*, 2012, pp. 655—658. (In Russ.).
- [6] G. G. Gorokh, I. A. Obukhov, A. A. Lozovenko, A. I. Zakhlebaeva, and E. A. Sochneva, “Template method of forming *InSb* large aspect ratio quantum nanowires,” in *CriMiCo 2013 - 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*, 2013, pp. 820—823. (In Russ.).
- [7] I. A. Obukhov and G. G. Gorokh, “*InSb*-based electron devices,” in *CriMiCo 2012 - 2012 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*, 2012, pp. 653—654. (In Russ.).
- [8] A. Mozalev, G. Gorokh, D. Solovei, and A. Poznyak, “Direct observation of anodic film growth and dissolution on superimposed aluminium and nickel metallic layers,” in *Proceedings of the 13th European Microscopy Congress, (EMC 2004)*, 2004, pp. 533—534.
- [9] M. I. Khan, M. Penchev, X. Jing, X. Wang, K. N. Bozhilov, M. Ozkan, and C. S. Ozkan, “Electrochemical Growth of *InSb* Nanowires and Report of a Single Nanowire Field Effect Transistor,” *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, vol. 3, no. 2, pp. 199—202, 2008. doi: 10.1166/jno.2008.203
- [10] G. G. Gorokh, I. A. Obukhov, A. A. Lozovenko, A. I. Zakhlebaeva, and E. V. Sochneva, “Electrophysical properties of *InSb* quantum nanowires arrays,” in *CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*, 2014, pp. 791—792. (In Russ.). doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959634
- [11] G. G. Gorokh, I. A. Obukhov, and A. A. Lozovenko, “Indium antimonide nanowires arrays for promising thermoelectric converters,” *Technol. Des. Electron. Equip.*, no. 1, pp. 3—11, 2015. (In Russ.).
- [12] S. R. Das, C. J. Delker, D. Zakharov, Y. P. Chen, T. D. Sands, and D. B. Janes, “Room temperature device performance of electrodeposited *InSb* nanowire field effect transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 24, 2011. doi: 10.1063/1.3587638
- [13] I. A. Obukhov, “Selfcooling of the Quantum Wire’s Emitter Contact,” *J. Nano Microsyst. Tech.*, no. 5, pp. 21—23, 2007. (In Russ.).
- [14] I. A. Obukhov, G. G. Gorokh, A. A. Lozovenko, and E. V. Sochneva, “New materials for thermoelectric converters based on arrays of nanowires,” in *Proceedings of Int. Conference “Thermoelectrics and their applications,”* 2015, pp. 29—34. (In Russ.).

- [15] Q. L. Ye, R. Scheffler, J. Kumari, and R. Leverenz, "InSb and GaInSb nanowires for thermoelectric applications," *Nanotech*, vol. 1, pp. 237–240, 2007.
- [16] I. A. Obukhov, "Influence of external electromagnetic radiation to the current voltage characteristics of quantum wire," in *KpbiMuKo 2010 CriMiCo - 2010 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*, 2010, pp. 833–835. (In Russ.).
- [17] I. A. Obukhov, "Generation of noise by a quantum wire," in *CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*, 2014, pp. 798–799. (In Russ.).
- [18] I. A. Obukhov and E. A. Smirnova, "Nanowire as an Active Element of the Microwave Radiation Generators," *J. Nano Microsyst. Tech.*, vol. 18, no. 8, pp. 514–517, 2016. (In Russ.).

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 1, no. 1, pp. 95–102, 2018.
Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1, № 1. С. 95—102.
ISSN: 2587-9936 print / 0000-0000 online
DOI: 10.15826/icrt.2018.01.1.07

Расчетно-экспериментальное определение радиационной стойкости КМОП интегральных микросхем при воздействии гамма-излучения¹

¹ Богатырев Ю. В., ¹ Ластовский С. Б., ² Шведов С. В., ² Лозицкий Е. Г.

¹ Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению
ул. П. Бровки, 19, Минск, 220072, Беларусь
bogat@iftt.bas-net.by

² ОАО «Интеграл»
ул. Казинца, 121А, Минск, 220108, Беларусь
office@bms.by

Статья поступила 23 ноября 2016 г.

Аннотация: Представлены результаты расчетно-экспериментального определения (прогнозирования) радиационной стойкости двух типов КМОП интегральных микросхем (интерфейсных приемопередатчиков, схем памяти) при воздействии гамма-излучения Co^{60} . Получены аналитические дозовые зависимости параметров тестовых МОП-транзисторов и КМОП больших интегральных схем.

Ключевые слова: радиационная стойкость, интегральная микросхема, транзистор, гамма-излучение, прогнозирование.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Расчетно-экспериментальное определение радиационной стойкости КМОП интегральных микросхем при воздействии гамма-излучения / Богатырев Ю. В., Ластовский С. Б., Шведов С. В., Лозицкий Е. Г. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018. Т. 1, № 1. С. 95—102.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Расчетно-экспериментальное определение радиационной стойкости КМОП интегральных микросхем при воздействии гамма-излучения / Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский, С. В. Шведов, Е. Г. Лозицкий // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2018. — Т. 1, № 1. — С. 95—102.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 26-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2016 (Севастополь, 4—10 сент. 2016 г.).