

# Индиевые нанопроволоки на поверхности кремния

© А.С. Кожухов, Д.В. Щеглов, А.В. Латышев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: antonkozuhkhov@yandex.ru

(Получена 29 сентября 2015 г. Принята к печати 21 декабря 2015 г.)

На поверхности кремния прямым локальным перепылением с зонда атомно-силового микроскопа созданы проводящие индиевые нанопроволоки шириной до 50 нм и длиной до 10 мкм. Перенос индия с зонда атомно-силового микроскопа на поверхность кремния инициировался при приложении потенциала между зондом и поверхностью при их сближении до расстояний, когда сила взаимного отталкивания составляет  $\sim 10^{-7}$  Н. Проводимость созданных нанопроволок лежит в диапазоне от  $7 \cdot 10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-2}$  Ом · см, что на несколько порядков меньше, чем в альтернативном методе термального переноса.

## 1. Введение

Метод прямого локального осаждения (DPN) металлов или органических соединений на подложку перепылением с зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) [1,2] актуален как для технологий нанoeлектроники как способ создания проводящих нанопроволок [3,4], так и для исследований в области контролируемого расположения органических молекул и полимеров [5–7]. Использование данной методики позволяет формировать на поверхности полупроводников проводящие структуры разрешением хуже 50 нм [8,9]. При применении методики перепыления с зонда, в основе которой лежит принцип активации переноса металла с АСМ зонда на поверхность за счет нагрева зонда до температур плавления нанесенного на зонд металла [3], используются металлы с низкой температурой плавления, например, такие как индий, олово или свинец. При нагреве до температур плавления нанесенный на зонд металл переносится с зонда на поверхность полупроводника при их взаимодействии на „контактных“ расстояниях [5]. Однако такой процесс протекает, с одной стороны, с окислением наносимого металла, что существенно уменьшает проводимость создаваемых наноструктур [3], а с другой — ограничивается температурой плавления наносимого металла. Данная работа посвящена исследованию осаждения металла с АСМ зонда на поверхность инициируемого приложением электрического потенциала между зондом и поверхностью. Предполагается, что такой способ нанесения металла позволит уменьшить оба фактора, лимитирующих качество создаваемых металлических пленок.

## 2. Эксперимент

В качестве перепыляемого материала был выбран индий чистотой 99.999%. Первичное термическое напыление индия проводилось локально на конец иглы зонда АСМ, что обеспечивалось маской с отверстием диаметром 6 мкм, располагаемой на расстоянии 2 мкм от вершины зонда АСМ. Для повышения адгезии индия к поверхности зонда АСМ перед его напылением на АСМ

зонд наносился подслоем из Ni и Cr толщиной 30 нм. Толщина слоя индия варьировалась от 80 до 200 нм (рис. 1, а).

Перенос индия с АСМ зонда осуществлялся на поверхность кремния (111) [10] в условиях взаимодействия зонда с поверхностью с силой  $10^{-7}$  Н („контактный“ режим работы АСМ). Подобно работе [11] по изучению локального анодного окисления методом АСМ гладкая поверхность кремния (111) была выбрана для того, чтобы определить размеры наносимых структур с вертикальным разрешением, лучше чем 0.2 нм. При движении покрытого индием зонда параллельно поверхности по заданным линиям длиной 1–2 мкм со скоростью 0.1 мкм/с на кантилевер подавался потенциал 10 В относительно заземленной подложки.

## 3. Результаты

На рис. 1, б представлено АСМ изображение участка поверхности Si(111), на котором проводилось осаждение индия. Длина наносимых структур соответствует 0.2–1 мкм, ширина  $\sim 50$  нм и высота около  $\sim 2$  нм.

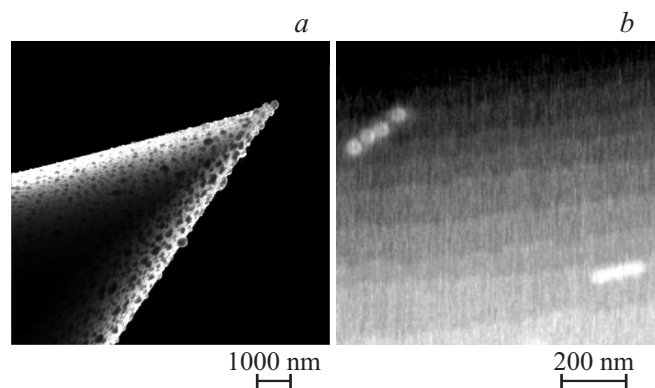


Рис. 1. а — изображение покрытого индием зонда АСМ, полученное в просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения. Общий объем покрытия составил до  $0.1 \text{ мкм}^3$ ; б — АСМ изображение ступенчатого рельефа поверхности кремния (111) с осажденным индием в виде светлых точек-линий.

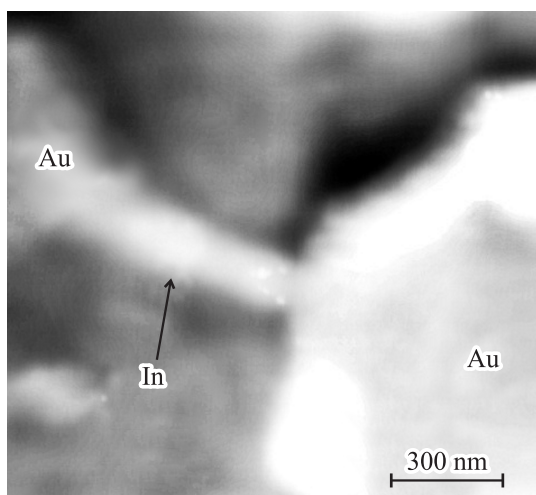


Рис. 2. АСМ изображение поверхности кремния с соединенными индием золотыми контактами.

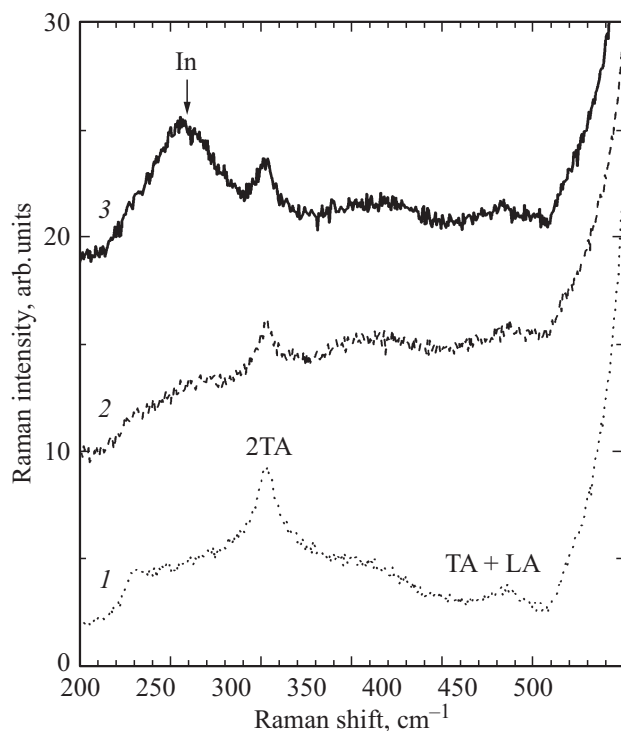


Рис. 3. Рамановская спектроскопия участков поверхности кремния.

Для определения факторов, влияющих на геометрические размеры получаемых индиевых нанопроволок, при переносе индия варьировался потенциал между зондом и поверхностью от 3 до 10 В, а также сила взаимодействия между зондом и поверхностью, от  $10^{-7}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$  Н. Было выявлено, что зависимости высоты получаемых наноструктур от приложенного потенциала между зондом и поверхностью и от силы взаимодействия между зондом и поверхностью являются линейными. В результате высота нанопроволок зависит как от приложенного

потенциала, так и от силы взаимодействия между зондом и поверхностью. Предполагается, что процесс переноса индия осуществляется, с одной стороны, за счет формирования в районе конца иглы электрического поля высокого напряжения (до  $10^8$  В/см), а с другой — в результате течения электрического тока между подложкой и иглой с локальным разогревом и расплавлением индия в токовом канале. При этом если приложение напряжения приводило к воспроизводимому перепылению порядка 1% индия с иглы на поверхность, то в отсутствие приложения потенциала перенос индия на поверхность прекращался сразу после смазывания концевой зоны (0.01%), при этом данный процесс иногда вообще не происходил, т.е. был невозпроизводимым. Количество перенесенного индия ( $\sim 1\%$ ) от общего покрытия может быть объяснено локализацией сильного поля у самого края иглы. 1% материала находится в зоне  $\sim 0.3$  мкм от центра. В предположении инициации перепыления электрическим полем — критическая величина поля на таком расстоянии от иглы составит  $\sim 3 \cdot 10^5$  В/см, что недостаточно для диссоциации молекул, но в случае прижима иглы к подложке достаточно для активации поверхностного дрейфа индия с иглы к поверхности подложки. В целом физическая основа переноса индия с иглы на поверхность в сильном поле при протекании тока требует дальнейших исследований.

Чтобы определить электрофизические свойства полученных индиевых пленок, на диэлектрической подложке созданы два изолированных золотых контакта толщиной 10 нм, расстояние между которыми не превышало 1–2 мкм. Далее в области между полученными золотыми контактами (рис. 2) осуществлялось осаждение индия методом, описанным выше. В итоге контакты соединялись индиевой полосой шириной 0.3–1.3 мкм и высотой 10–260 нм. Измерения показали, что удельное сопротивление нанесенного индия соответствует  $5.7 \cdot 10^{-3}$ – $4 \cdot 10^{-2}$  Ом·см.

Рамановская спектроскопия [12–14] участков поверхности кремния (рис. 3) показывает преимущественное наличие пиков аморфного индия, при этом пики оксида индия подавлены.

#### 4. Заключение

Предложен новый метод создания тонких, до 50 нм, проводящих нанопроволок на поверхности полупроводников. Исследованы процессы переноса индия с зонда АСМ на поверхность кремния при приложении потенциала между зондом и поверхностью. Показано, что геометрические размеры получаемых структур зависят и от потенциала, и от силы взаимодействия между зондом и поверхностью. Процесс переноса инициируется локальным нагревом нанесенного на зонд индия. В отличие от термического перепыления нанесенный таким образом индий не окисляется, и его удельное сопротивление лежит в диапазоне от  $5.7 \cdot 10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-2}$  Ом·см, что примерно в  $10^6$  раз меньше удельного сопротивления индия в случае термальной DPN [3].

Эксперименты по напылению золота на поверхность SiO<sub>2</sub> выполнены при финансовой поддержке РФФИ (№ 14-02-31032 мол\_а) и гранта научной школы НШ-2138.2014.8. Все остальные работы выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00143).

Авторы выражают благодарность А.В. Володину за анализ исследуемой поверхности методом рамановской спектроскопии, А.К. Гутаковскому за анализ зондов АСМ методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения.

## Список литературы

- [1] R.D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S.H. Hong, C.A. Mirkin. Dip-pen nanolithography. *Science*, **283**, 661 (1999).
- [2] D.S. Ginger, H. Zhang, C.A. Mirkin. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **43**, 30 (2004).
- [3] B.A. Nelson, W.P. King, A.R. Laracuate, P.E. Sheehan, L.J. Whitman. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 033 104 (2006).
- [4] W.M. Wang, M.C. LeMieux, S. Selvarasah, M.R. Dokmeci, Z. Bao. *ACS Nano*, **3** (11), 3543 (2009).
- [5] W.K. Lee, M.Yang, A.R. Laracuate, W.P. King, L.J. Whitman, P.E. Sheehan. *Beilstein J. Nanotechnol*, **3**, 52 (2012).
- [6] H.Z. Yiang, S.I. Stupp. *Langmuir*, **21**, 5242 (2005).
- [7] J.H.Lim, D.S. Ginger. K.B. Lee, J. Heo, J.M. Nam, C.A. Mirkin. *Angew Chem. Int. Ed.*, **42**, 2309 (2003).
- [8] B.L. Weeks, A. Noy, A.E. Miller, J.J. De Yoreo. *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 255 505 (2002).
- [9] D. Bullen, C. Liu. *Sensors Actuators A*, **125**, 504 (2006).
- [10] A.V. Latyshev, L.V. Litvin, A.L. Aseev. *Appl. Surf. Sci.*, **130**, 139 (1998).
- [11] D.V. Sheglov, A.V. Latyshev, A.L. Aseev. *Appl. Surf. Sci.*, **243**, 138 (2005).
- [12] A.V. Kolobov. *J. Appl. Phys.*, **87**, 2926 (2000).
- [13] V.A. Volodin, T.T. Korchagina, J. Koch, B.N. Chichkov. *Physica E*, **42**, 1820 (2010).
- [14] V.A. Volodin, D.V. Marin, H. Rinnert, M. Vergnat. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **46**, 275 305 (2013).

*Редактор Г.А. Оганесян*

## Indium nanowires on silicon

*A.S. Kozhukhov, D.V. Sheglov, A.V. Latyshev*

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,  
Suberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** Conductive nanowires of 30–50 nm width have been fabricated on silicon oxide surface using atomic force microscope (AFM) tip covered by indium. Indium transfer from AFM tip to the surface has been implemented by potential difference between the tip and the substrate being in contact. The length of fabricated indium nanowires have reached several microns. Unlike thermal dip-pen nanolithography in our experiments indium has hardly oxidized leading the conductivity of created nanowires to be varied from  $5.7 \cdot 10^{-3}$  to  $4 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ .