

## Новосибирские ученые разработали технологию формирования наноприборов для нейроморфных систем и нанофотоники

Исследователи добились управляемого синтеза высококачественных монокристаллов диоксида ванадия ( $VO_2$ ) на трехмерных наноструктурах кремния, а также селективного роста массивов наноконцев  $VO_2$ . Эти результаты могут использоваться для создания высококачественных логических наноэлементов в нейроморфных компьютерах, «умных» метаматериалов, сенсоров и оптических фотонных устройств. Авторская технология основана на широко используемой кремниевой технологии, что открывает перспективы для быстрого промышленного внедрения. Работа сотрудников Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН) и Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН (ИНХ СО РАН) [поддержана](#) Российским научным фондом, результаты опубликованы в журнале [CrystEngComm](#).

Благодаря кремниевой технологии созданы компьютеры, сотовые телефоны и другие электронные устройства. Однако кремниевые приборы практически достигли своих предельных параметров. Для дальнейшего прогресса и увеличения быстродействия процессоров при одновременном уменьшении энергопотребления нужны новые материалы с большим спектром функциональных свойств, чем у кремния. Такие материалы есть, но их промышленное применение затруднено, так как их качество и уровень технологий производства приборов на их основе — низкие. Специалисты ИФП СО РАН и ИНХ СО РАН предложили решение проблемы, интегрировав синтез диоксида ванадия — материала с новыми свойствами — в существующую кремниевую технологию.

Привлекательность [диоксида ванадия](#) для электроники будущего в том, что его монокристаллы могут очень быстро переходить из полупроводникового состояния в металлическое. Однако при обычном фазовом переходе параметры кристаллической решетки изменяются на один процент, что приводит к разрушению кристалла, если синтезировать его на подложке из кремния. Решение этой проблемы исследователи предложили в своей [предыдущей работе](#), вырастив нанокристаллы на вершинах кремниевых нанопилюров, диаметром около 20 нанометров. В этом случае площадь соприкосновения нанокристалла с такой «подложкой» кремния минимальна, и разрушения не происходит. Нанокристаллы  $VO_2$  служили у авторов резистивными переключателями с рекордной энергоэффективностью и долговечностью — ученые показали, что можно совершить более ста миллиардов обратимых переходов из металлического состояния в полупроводниковое.

*«Мы формируем практически все элементы приборов из кремния, используя кремниевую технологию, и только на финальном этапе, в заданных местах: на кремниевых наноплощадках или иглах синтезируем монокристаллы  $VO_2$ . Такой подход открывает возможность массового формирования высокоточных, дешевых  $VO_2$*

*наноприборов», — объясняет соавтор статьи заведующий лабораторией физики и технологии трехмерных наноструктур ИФП СО РАН член-корреспондент РАН **Виктор Яковлевич Принц.***

Ранее в мире в основном синтезировались и исследовались поликристаллические пленки  $VO_2$ . Низкое качество таких пленок не позволяло использовать их для электронных приложений. Например, в 2015 году рекордное количество переключений, которое выдерживали пленки, не превышало одного миллиона, что означало деградацию прибора после секунды воздействия мегагерцового сигнала. Миллиарды кремниевых транзисторов в сотовых телефонах и компьютерах безотказно работают, прежде всего, потому, что они формируются из практически идеального монокристалла кремния.

*«Несколько лет назад, когда мы только начинали работать с  $VO_2$ , мы поставили перед собой амбициозную цель — создать высококачественный материал и довести технологию до промышленного внедрения», — подчеркивает Виктор Принц.*

*«Изучив различные условия синтеза монокристаллов  $VO_2$  из газовой фазы, мы с помощью комплексных исследований морфологии, атомной структуры кристаллов, их состава и электрических характеристик, показали, что высококачественные монокристаллы диоксида ванадия синтезируются только при соблюдении оптимальной температуры около 460 градусов Цельсия. Отклонение от нее даже на 20 градусов приводит к синтезу дефектных кристаллов, состоящих из нескольких фаз. Мы гарантированно можем выращивать монокристаллы  $VO_2$  M-фазы с практически идеальными характеристиками. Именно кристаллы M-фазы способны переключаться из полупроводникового состояния в металлическое при температурах близких к комнатной. Более того, мы научились управляемо синтезировать не только отдельные нанокристаллы и их массивы, но и более сложные структуры  $VO_2$  в виде трехмерных массивов наноколец. Отметим, что до наших работ такой управляемый синтез отсутствовал» — говорит соавтор статьи научный сотрудник лаборатории физики и технологии трехмерных наноструктур ИФП СО РАН **Сергей Владимирович Мутилин.***

Трехмерные массивы наноколец оксида ванадия могут служить, в частности, оптическими резонаторами в перестраиваемых метаматериалах. Это дает новые возможности для динамического управления светом, в том числе для развития быстродействующих систем передачи и обработки информации

*«Часто, чтобы получить результат, необходимы нестандартные решения. Для формирования уникальных наноколец  $VO_2$ , мы использовали особенности глубокого травления кремния с применением попеременных процессов ионного травления и пассивации, известного под названием “Бош-процесса”. При таком процессе на стенках вертикальных и трехмерных структур формируются «гребешки» обусловленные цикличностью процесса. Именно на этих «гребешках»,*

*опоясывающих вытравленные цилиндрические наноструктуры кремния нам удалось селективно синтезировать  $VO_2$  и тем самым сформировать трехмерные массивы замкнутых колец  $VO_2$ . Важно отметить, что Бош-процесс очень широко применяется в промышленности, что открывает для нашей технологии возможность внедрения в производство. Мы предполагаем, что наш подход можно распространить на другие перспективные материалы», — добавляет Виктор Принц.*

Исследование выполнялось в рамках проекта РНФ № 18-19-00694.

Пресс-служба ИФП СО РАН  
пресс-секретарь ИФП СО РАН,  
Дмитриева Надежда Валерьевна  
pressa@isp.nsc.ru,  
pressemicond@gmail.com  
89133736776