

# Исследование структурных свойств и токового транспорта в нанокompозите, сформированном на поверхности кремния посредством окисления пористого слоя

© Л.М. Сорокин, Л.В. Григорьев\*, А.Е. Калмыков, В.И. Соколов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока Санкт-Петербургского государственного университета,  
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Россия

E-mail: aekalm@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 26 августа 2004 г.)

Показана принципиальная возможность создания нанокompозитного слоя Si-SiO<sub>2</sub> путем окисления пористого кремния. Полученный при этом нанокompозит состоит из оксида кремния с включениями кристаллического кремния в виде округлых частиц с размером в интервале 5–30 нм и нитевидной сетчатой структуры с толщиной нитей порядка нескольких нанометров. Измерены ВАХ полученных структур для различных случаев возбуждения образца (фото- и термостимуляция). Оценены величины концентрации ловушек и эффективной подвижности носителей. Выявлено наличие сильного захвата носителей заряда на ловушки, обусловленные развитым интерфейсом в структуре композита.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН „Новые материалы и структуры“.

## 1. Введение

Нанокompозитные материалы, обладающие набором более разнообразных физических свойств, чем составляющие их компоненты, находят широкое применение в различных областях техники [1]. Наблюдавшиеся осцилляции тока в слое термически окисленного пористого кремния [2] позволяли предположить, что он представляет собой нанокompозит. Пористый кремний, являющийся наноструктурированным материалом, уже используется для создания элементов оптоэлектроники [3–5].

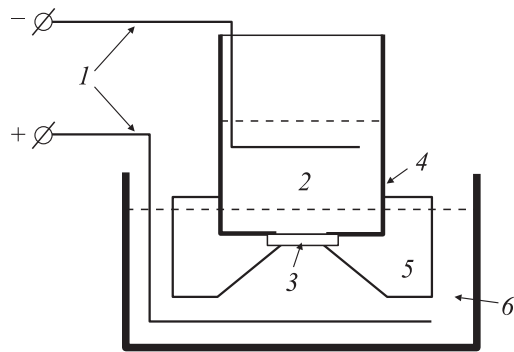
При переходе от объемного полупроводника к системе отдельных нанокристаллитов существенно меняются электрофизические и оптические свойства материала. В частности, факторы, определяющие процессы генерации/рекомбинации носителей, претерпевают качественную трансформацию. Во-первых, увеличивается роль поверхности и связанных с ней электронных состояний дефектов. Во-вторых, носители заряда оказываются локализованными в ограниченной области пространства и не имеют возможности свободно взаимодействовать друг с другом. В связи с этим, например, зависимость интенсивности фотолюминесценции нанокристаллического полупроводника от уровня накачки будет отличаться от имеющей место в случае объемного материала. Так, для нанокристаллического кремния наблюдается линейная и сублинейная зависимость [6], тогда как для монокристаллического кремния зависимость интенсивности межзонной фотолюминесценции от уровня накачки носит степенной характер [7].

В последнее время интенсивно исследуются кремниевые нанокompозиты (кремниевые нанокристаллы, распределенные в диэлектрической матрице — SiO<sub>2</sub>), в которых наблюдается заметная фото- и электролюминесценция в видимой области спектра при комнатной тем-

пературе благодаря проявлению квантово-размерного эффекта [3,7–12]. Однако величина квантового выхода люминесценции в настоящее время составляет менее одного процента. Вместе с тем в упомянутых публикациях не были приведены убедительные структурные данные, которые свидетельствовали бы о том, что авторы действительно имели дело с нанокompозитами. Для определения путей повышения квантового выхода люминесценции необходимо знать закономерности процессов генерации/рекомбинации неравновесных носителей и механизмы токового транспорта в кремниевом нанокompозите с учетом его структуры. Поэтому в задачу настоящей работы входило электронно-микроскопическое исследование нанокompозита Si:SiO<sub>2</sub>, полученного при окислении пористого кремния, а также изучение механизмов токового транспорта в нем.

## 2. Методика приготовления нанокompозита

Для получения пористого слоя исходные пластины монокристаллического кремния КДБ-10 с толщиной 350 мкм и ориентацией [100] подвергались анодному травлению в водном растворе 30 vol.% HF в горизонтальном реакторе, схематическое изображение которого показано на рис. 1. Реактор представляет собой фторопластовый стакан с отверстием в дне. Отверстие закрывается образцом, который прижимается ко дну стакана гайкой из фторопласта. Собранный таким образом стакан устанавливается в кювету, заполненную электролитом, обеспечивающим тыловой контакт с образцом. В стакан наливается раствор плавиковой кислоты, устанавливается электрод и подается постоянное напряжение. Пузырьки, которые образуются в процессе



**Рис. 1.** Схема реактора для формирования пористого слоя. 1 — платиновые электроды, 2 — раствор плавиковой кислоты, 3 — образец, 4 — стакан, 5 — прижимная гайка, 6 — водный раствор поваренной соли.

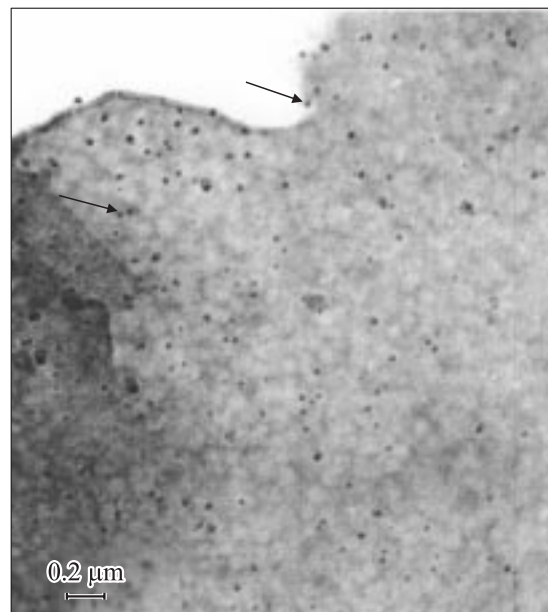
травления, время от времени удаляются с поверхности кремния фторопластовой мешалкой. В данной работе представлены результаты исследования образца, подвергнутого в течение 5 min травлению током с плотностью  $300 \text{ mA/cm}^2$ . После окончания электрохимического травления образец промывался в потоке деионизованной воды и затем подвергался окислению в парах воды при  $1223 \text{ K}$ . Время окисления варьировалось так, чтобы в выросшей пленке окисла  $\text{SiO}_2$  образовались включения наночастиц кремния. Толщина выращенного окисла составляла порядка  $0.15 \mu\text{m}$ . Для исследования электрофизических свойств кремниевого нанокompозита с нерабочей стороны образца удалялся окисел и на нее наносился слой In-Ga-эвтектики. На поверхность нанокompозита напылялись круглые полупрозрачные Al-электроды. Перед измерением вольт-амперных характеристик (ВАХ) для уменьшения поверхностных токов утечки на образец скрайбированием наносились риски до монокристаллической подложки.

### 3. Структура нанокompозита

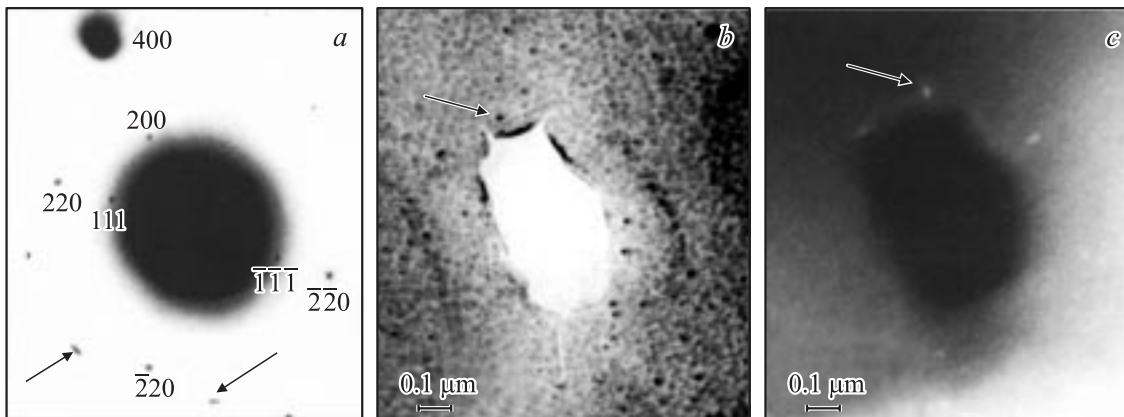
Структура слоя нанокompозита исследовалась с помощью электронного микроскопа ЭМ-200 при ускоряющем напряжении  $100 \text{ kV}$ . Образцы для исследований готовились стандартным способом: вырезались шайбочки диаметром  $3 \text{ mm}$  под размер объектодержателя, которые пористым слоем приклеивались воском к фторопластовой круглой подложке толщиной  $1 \text{ mm}$  и диаметром  $10 \text{ mm}$ . Утоньшение до толщины, прозрачной для электронов с энергией  $E = 100 \text{ keV}$ , осуществлялось по химико-динамической методике в растворе CP-8 со стороны, противоположной пористому слою, до образования окна в кремнии по центру образца с сохранением окисного слоя. Далее шли операции отделения образца от подложки и его промывка. Если слой окисла оказывался толстым и вызывал зарядку образца при просмотре его в электронном микроскопе, образец дополнительно утоньшался ионным пучком ( $I = 4\text{--}6 \mu\text{A}$ ,  $U = 5 \text{ kV}$ ).

На рис. 2 представлена типичная структура образца после окисления. Ионное травление здесь намеренно не проводилось, чтобы зафиксировать структуру, ответственную за электрофизические свойства, описанные в следующем разделе. Электронограмма от этого образца представляла собой диффузное гало, на фоне которого едва заметны слабые точечные рефлексы, относящиеся к остаточному слою кремния. Следовательно, этот участок образца состоит преимущественно из окисла. На изображении видны отдельные темные частицы (показаны стрелками) с размером в интервале  $5\text{--}30 \text{ nm}$ , имеющие округлую форму. Некоторые из них окружены светлым ореолом. Наклон образца в микроскопе вплоть до  $30^\circ$  не выявил наличия вытянутости этих частиц в каком-либо направлении, чего следовало ожидать, если бы пористый слой представлял собой столбчатую структуру. Частицы с темным контрастом четко выделялись на фоне слегка размытой ячеистой структуры. Их поверхностная концентрация составила более  $10^9 \text{ cm}^{-2}$ .

После ионного травления на электронограмме кроме диффузного гало появились рефлексы кремния (рис. 3, *a*). Вид электронограммы свидетельствует о том, что после электрохимического травления приповерхностный слой в целом сохраняет монокристаллическую структуру. Отдельные дугообразные рефлексы (помечены стрелками) указывают на незначительную разориентацию соседних участков наночастиц. На рис. 3, *b* и *c* представляют собой снимки того же участка, от которого получена электронограмма. Причем рис. 3, *c* — темнопольное изображение в рефлексе (111) от кремния. Темные частицы, аналогичные тем, что видны на рис. 2, присутствуют и на рис. 3, *b*. В режиме темного поля на рис. 3, *c* они видны как светлые пятнышки. Данное обстоятельство доказывает, что это частицы



**Рис. 2.** Электронная микрофотография нанокompозита до ионного травления.

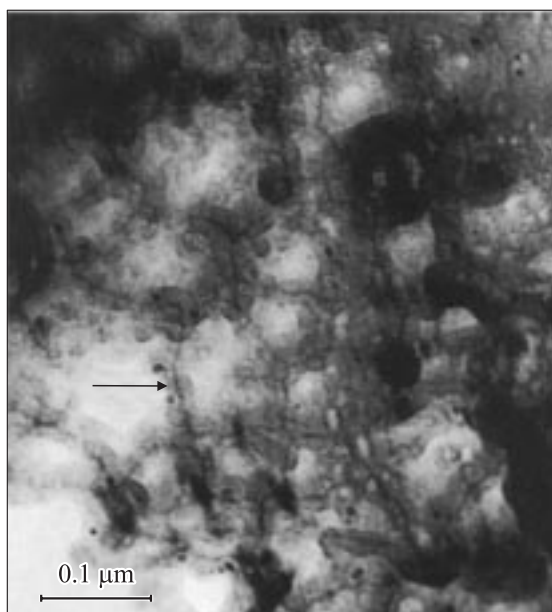


**Рис. 3.** Микроэлектроннограмма образца, подвергнутого ионному травлению (а), светлопольное (b) и темнопольное (с) изображения того же участка. Стрелкой показана частица кремния.

кремния, находящиеся в отражающем положении. Светлый ореол вокруг них на светлопольном изображении можно связать с их окислением.

При больших увеличениях ячеистая структура выглядит как сетка, образованная тонкими ( $\sim 5$  nm) нитями темного контраста (рис. 4). Нити в свою очередь окружены „шубой“. Учитывая, что микрофотография получена в режиме дифракционного контраста, можно сделать вывод, что темные нити представляют собой нановключения кремния, окруженные „шубой“ окисла. Нити неоднородны по толщине. В некоторых местах они представляют собой последовательность близко расположенных отдельно стоящих мелких частиц.

На рис. 5 схематично представлена модель процесса образования нанокompозита. В результате травления образуются поры, стенки которых в ходе окисления



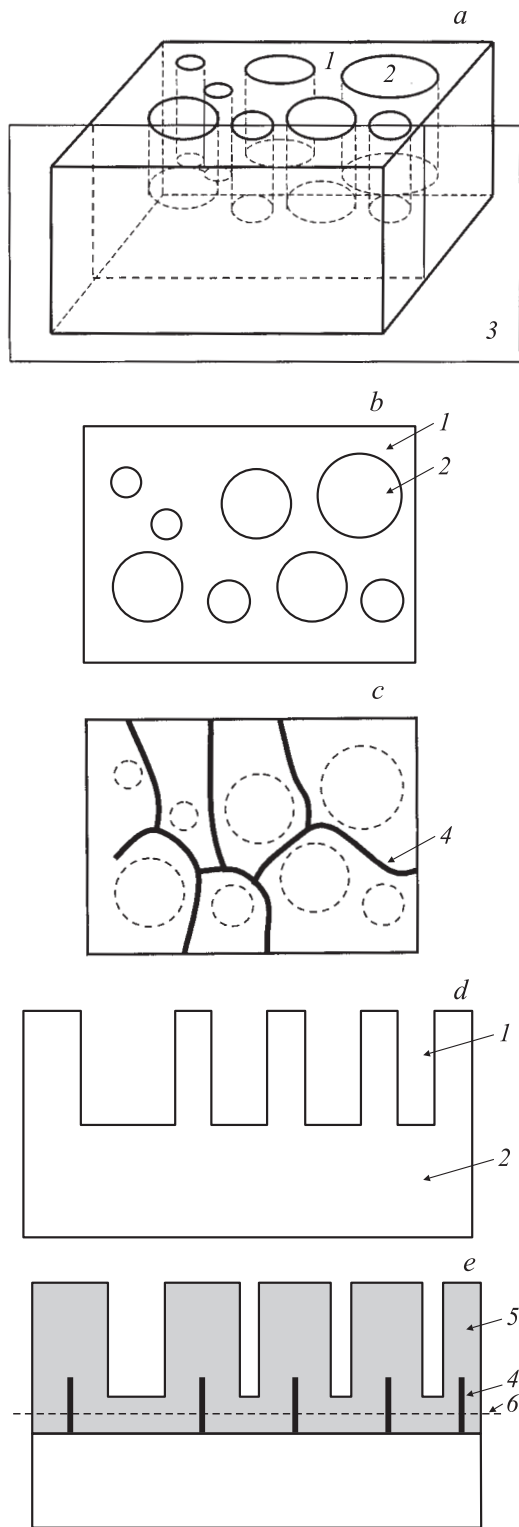
**Рис. 4.** Нитевидная сетчатая структура нанокompозита. Стрелкой показана кремниевая нить.

утоняются до образования тонкой сетчатой структуры из кремниевых нитей. После электрохимического травления стенки между порами имеют различную толщину. Это приводит к разной толщине кремниевых нитей (рис. 2), образовавшихся после окисления пористого слоя. По-видимому, отдельно расположенные крупные частицы ( $\sim 5$ – $30$  nm) являются не до конца окисленными наиболее толстыми участками областей между порами.

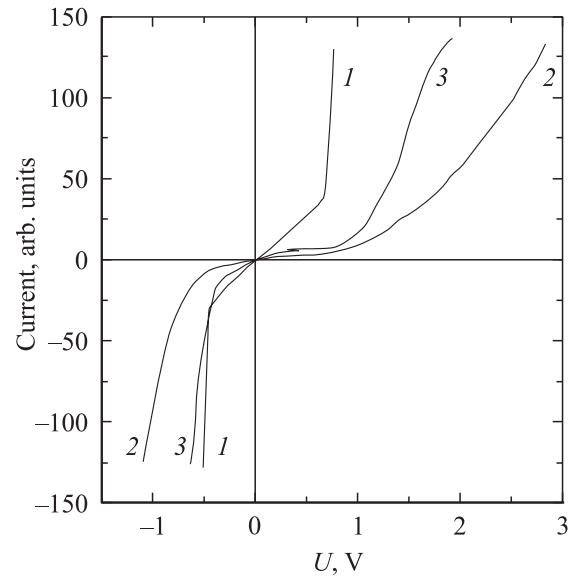
#### 4. Транспортные свойства кремниевое нанокompозита

Для исследования транспортных характеристик нанокompозита проводились измерения ВАХ при его различном возбуждении с последующими оценками величины подвижности носителей и концентрации ловушек. Использовался вольтметр-электронметр типа В7-30 в режиме измерения тока. Скорость изменения напряжения, прикладываемого к образцу, не превышала значения  $0.01$  V/s.

В исследуемой структуре измерялись сквозные токи через образец. Максимальная величина тока составляла  $40$  nA. Источником неравновесных носителей заряда в слое термически окисленного пористого кремния являются как инжектированные из электродов, так и фотостимулированные с ловушек электроны. Чтобы сузить круг возможных механизмов токопереноса, оценим величины напряженности электрического поля в объеме нанокompозита. Поскольку толщина слоя нанокompозита составляет около  $0.15$   $\mu\text{m}$ , максимальное значение средней напряженности ( $E$ ) поля в слое  $\text{SiO}_2$  при амплитуде напряжения развертки величиной  $3$  V не превышает  $200$  kV/cm. Далее оценим величину максимальной напряженности электрического поля  $E_m$  на поверхности кремниевое нанокластера. Данные наших электронно-микроскопических исследований показали, что средний размер нановключений кремния — нанокластеров — составляет  $\sim 10$  nm. Согласно [13], величина  $E_m$  для



**Рис. 5.** Схема образования нанокompозита. *a* — кремниевая пластина после травления в реакторе, *b* — вид пластины сверху, *c* — вид пластины сверху после окисления, *d* — сечение пластины после травления, *e* — сечение пластины после травления и окисления. 1 — кремниевая пластина, 2 — поры, 3 — плоскость сечения, изображенного на частях *d* и *e*, 4 — нить кремния, 5 — окисел, 6 — граница, выше которой расположена часть образца, исследовавшаяся в электронном микроскопе.



**Рис. 6.** ВАХ слоя термически окисленного пористого кремния.

случая неоднородного диэлектрика с проводящими сферическими включениями такого размера может быть описана следующим соотношением:

$$E_m = \langle E \rangle / 0.63. \quad (1)$$

Подставив в (1) среднее значение  $\langle E \rangle$ , получаем, что напряженность электрического поля на поверхности кремниевых нанокластеров, находящегося внутри диэлектрической матрицы, не превышает  $320 \text{ kV/cm}$ . Высота барьера Si-SiO<sub>2</sub> для электронов по данным фотоэмиссионных измерений и инжекционных ВАХ [14,15] составляет более  $2.7 \text{ eV}$ . Указанное обстоятельство позволяет исключить эмиссию по Фаулеру-Нордгейму (из-за малого значения величины  $E_m$ ) и Шоттки (из-за наличия высокого барьера на границе Si-SiO<sub>2</sub> и отсутствия облучения образца коротковолновым излучением) из рассмотрения механизмов токового транспорта в диэлектрическом слое нанокompозита. В связи с тем, что двуокись кремния представляет собой аморфный диэлектрик (как это следует из приведенных структурных исследований), она содержит большое количество электрически активных дефектов (ловушек), локализованных вблизи середины запрещенной зоны диэлектрика. Согласно [16], перенос носителей заряда в области слабых полей может происходить не по разрешенным зонам диэлектрика, а по системе локализованных состояний, расположенных в запрещенной зоне диэлектрика. В связи с этим можно допустить, что перенос носителей заряда в слое нанокompозита происходит посредством прыжкового механизма [17,18].

На рис. 6 представлено семейство ВАХ, измеренных для различных режимов возбуждения нанокompозита. Для оценки величины концентрации мелких термически активированных и фотостимулированных ловушек сначала рассмотрим ВАХ в случае (кривая 1 на рис. 6),

когда исследуемый образец находится при комнатной температуре и освещается светом с максимальной энергией кванта, не превышающей 1.8 eV. В этом случае ВАХ состоит из двух ветвей. При положительном потенциале на слое нанокompозита в диапазоне напряжений от 0 до 0.68 V наблюдается линейная зависимость тока. В этом случае при достаточно небольших значениях поля внутри слоя нанокompозита ( $\sim 45$  kV/cm) соблюдается закон Ома. В нанокompозите имеются термически активированные носители заряда с концентрацией  $n_0$  и неравновесные носители с концентрацией  $n_t$ . Возможным источником носителей заряда с концентрацией  $n_0$  могут быть группы термически опустошенных при комнатной температуре неглубоких ловушек, находящихся в приповерхностной области кремниевых нанокластеров. При комнатной температуре глубокие ловушки заполнены и непосредственно не участвуют в транспорте носителей заряда. В качестве ловушек будем рассматривать однозарядные центры, т.е. ловушка может захватывать или отдавать один электрон. Заметных отклонений от закона Ома не возникает до тех пор, пока концентрация неравновесных носителей  $n_t$  не превышает концентрацию  $n_0$ . При достижении напряжения  $U_0 = 0.68$  V наблюдается почти вертикальное нарастание тока. Такое поведение тока может быть объяснено заполнением ловушек неравновесными носителями, и инжектированный заряд начинает превосходить заряд, захваченный на ловушках. Оценим концентрацию  $n_t$  мелких термически активированных ловушек, используя соотношение [18,19]

$$n_t = n_0 = 2.21 \cdot 10^{20} U_0, \quad (2)$$

где  $U_0$  — напряжение перехода ВАХ от закона Ома к резкому нарастанию тока.

Подставив в (2) значения  $U_0$ , получим, что концентрация ловушек составляет  $1.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Оценим величину эффективной подвижности носителей заряда в слое нанокompозита при напряжении  $U_0$  по формуле [18,19]

$$\mu_{\text{eff}} = (8IL^3)/(9\epsilon\epsilon_0 U_0), \quad (3)$$

где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ),  $L$  — толщина слоя диэлектрика [m],  $I$  — значение тока при напряжении  $U = U_0$ .

В этом случае эффективная подвижность составила  $0.45 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Оценим величину концентрации мелких термически активированных ловушек для случая отрицательного напряжения, приложенного к изучаемой структуре. На этой ветви ВАХ при малых величинах напряжений также имеется линейный участок тока. Напряжение  $U_0$ , при котором начинается резкое нарастание тока, составляет  $-0.44$  V. В этом случае концентрация ловушек, рассчитанная по формуле (2), составляет  $0.97 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Эффективная подвижность носителей заряда  $\mu_{\text{eff}}$ , найденная с помощью (3), равна  $0.47 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Из анализа поведения ВАХ при противоположных знаках приложенного напряжения следует, что, хотя значения концентрации ловушек

и эффективной подвижности в точке  $U_0$  в этих случаях различаются, они совпадают по порядку величины. Это позволяет считать предполагаемый механизм токового транспорта в обоих случаях одинаковым. По данным [16], концентрация ловушек в слое термической двуокиси кремния находится в диапазоне от  $10^{19}$  до  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , причем величина эффективной подвижности для электронов не превышает значения  $10^{-11} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Такая высокая концентрация ловушек свидетельствует о том, что они могут быть обусловлены дефектами в двуокиси кремния, образующимися вследствие разрывов связей Si-O [16]. Концентрация ловушек для диэлектрического слоя исследуемого композита лежит в том же интервале, что и для слоя термической двуокиси кремния. Данный факт указывает на то, что природа ловушек, возможно, обусловлена разрывом тех же связей. Существенно меньшее значение (различие на несколько порядков величины) эффективной подвижности, как мы считаем, обусловлено процессами более сильного (по сравнению со случаем термической двуокиси кремния) захвата носителей заряда за счет участия ловушек, локализованных в приповерхностном слое диэлектрика около наночастиц кремния.

ВАХ, измеренная при комнатной температуре в отсутствие освещения, представлена кривой 2. Она состоит из нескольких ветвей, описываемых различными функциональными зависимостями. В отсутствие освещения процессами фотоопустошения ловушек можно пренебречь. Как и прежде в слое нанокompозита присутствуют термически опустошенные мелкие ловушки, создающие концентрацию носителей заряда  $n_0$ , и неравновесные носители с концентрацией  $n_t$ . Неравновесные носители заряда инжектируются только из электрода. При положительном потенциале, приложенном к нанокompозиту, в диапазоне напряжений от 0 до 0.52 V наблюдается линейная зависимость тока от напряжения.

При увеличении напряжения на положительном электроде от 0.52 до 2.8 V ток изменяется как  $I \sim U^k$ , где  $k \approx 2.5$ . Отличающаяся от кривой 1 токовая зависимость свидетельствует о наличии распределения ловушек по энергии активации. В связи с этим необходим другой подход к оценке концентрации носителей. Как следует из данных наших электронно-микроскопических исследований, процесс токопереноса происходит в неупорядоченном диэлектрике (нанокристаллиты кремния распределены в аморфном слое двуокиси кремния). Тогда для описания механизма переноса заряда в аморфном диэлектрике следует использовать модель нормально-го распределения (по Гауссу) электрически активных дефектов по энергии активации вблизи середины запрещенной зоны диэлектрика [16,18]. В случае гауссова распределения электрически активных дефектов по энергии активации энергетическая ширина распределения  $\Delta E$  может быть оценена как 1.2 eV. Выбор этой величины обусловлен тем, что максимальная энергия кванта возбуждающего света не превышает энергию  $\sim 1.8$  eV. Поэтому под действием квантов света будут

преимущественно опустошаться ловушки, лежащие в диапазоне энергий активации  $\Delta E$ . Согласно [19], соотношение для расчета концентрации мелких ловушек может быть представлено в следующем виде:

$$n_t = 1.84 \cdot 10^{20} U_1, \quad (4)$$

где  $U_1$  — напряжение перехода ВАХ от линейной зависимости к степенной.

Расчет концентрации ловушек дает величину  $0.94 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Эффективная подвижность, рассчитанная на основании (3) в точке перехода ВАХ от линейной зависимости к степенной, равна  $0.45 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Из сравнительного анализа кривых 1 и 2 следует, что при почти одинаковой концентрации ловушек эффективная подвижность носителей в случае отсутствия освещения уменьшается почти на порядок. Обсуждение этого факта приводится далее.

При приложении отрицательных напряжений от 0 до  $-0.48 \text{ V}$  в слое нанокompозита также соблюдается закон Ома, и механизм переноса заряда сквозь слой нанокompозита остается аналогичным рассмотренному ранее. При увеличении приложенного обратного напряжения свыше  $0.48 \text{ V}$  ветви ВАХ аппроксимируются степенной функцией  $I \sim U^k$ , где  $k = 3.2$ . В этом случае зависимость тока от напряжения может быть описана в рамках той же модели распределения электрически активных дефектов. Концентрация ловушек, оцененная по соотношению (4), составляет не менее  $0.86 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Эффективная подвижность в этом случае равна  $0.8 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Видно, что и концентрация ловушек, и эффективная подвижность носителей для отрицательной ветви близки к полученным в случае положительного смещения.

Транспорт носителей заряда внутри диэлектрического слоя нанокompозита может осуществляться только внутри запрещенной зоны диэлектрика по локализованным состояниям [15–17]. Считая, что ловушки квазинепрерывно (по Гауссу) распределены по энергии активации вблизи середины запрещенной зоны диэлектрика, транспорт носителей заряда можно описать с помощью модели прыжковой проводимости в сильных полях с постоянной длиной прыжка [17]. В рамках модели прыжковой проводимости [16,18] механизм накопления и протекания заряда в нанокompозите можно объяснить следующим образом. Локализованные состояния расположены на различном расстоянии друг от друга и имеют разную энергию активации. Величина расстояния между локализованными центрами входит в экспоненту множителя туннелирования. Небольшое изменение величины расстояния вызывает значительное изменение вероятности перескока и, следовательно, времени освобождения с ловушки. Таким образом, носитель заряда, двигаясь по локализованным состояниям к противоположному электроду, иногда попадает на „тупиковые“ центры, на которых может находиться продолжительное время, что и приводит к уменьшению подвижности и накоплению заряда. Величины подвижности и накопленного заряда зависят от температуры, так как прыжки носителей заряда являются термически активированными.

Рассмотрим теперь ВАХ (кривая 3) для случая, когда исследуемый образец был предварительно охлажден в темноте до температуры  $100 \text{ K}$ , а затем при этой температуре подвергнут освещению с максимальной энергией кванта, не превышающей  $1.8 \text{ eV}$ . Можно считать, что в этом случае все мелкие термически активированные ловушки „заморожены“ и не вносят вклада в процессы токового транспорта. Благодаря освещению мы можем генерировать неравновесные носители с ловушек, энергия активации которых не превышает величины максимальной энергии кванта света. С учетом спектрального диапазона падающего света величина ширины энергетического интервала активации ловушек составляет  $1.2 \text{ eV}$ . Положительная ветвь ВАХ в этом случае оказывается несколько сложнее. Закон Ома выполняется в более узком (от 0 до  $0.16 \text{ V}$ ) диапазоне напряжений, далее (от  $0.16$  до  $0.83 \text{ V}$ ) ветвь ВАХ сублинейна с коэффициентом  $k = 1.6$ . Концентрация свободных носителей заряда в этом случае создается только за счет неравновесных носителей. Сравнение кривых 1 и 3 показывает, что при одном и том же приложенном напряжении величина тока будет значительно больше для освещаемого композита, находящегося при комнатной температуре. Считая, что при  $100 \text{ K}$  мелкие ловушки „заморожены“ и не участвуют в генерационно-рекомбинационных процессах, полагаем, что в слое диэлектрика происходит фотоопустошение ловушек, расположенных вблизи середины запрещенной зоны с шириной энергетического распределения, равной  $1.2 \text{ eV}$ . Концентрация  $n_t$ , рассчитанная в этом случае с помощью (4), составляет не менее  $0.29 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ . Эффективная подвижность носителей заряда  $\mu_{\text{eff}}$ , определенная по формуле (3), равна  $0.96 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ .

Механизм токового транспорта в сублинейной области и в диапазоне напряжений от  $0.83$  до  $1.56 \text{ V}$ , где регистрируемый ток  $I \sim U^k$  с коэффициентом  $k = 2.6$ , может быть обусловлен суммарным действием фотостимулированного выброса носителей заряда с неглубоких ловушек и туннельного транспорта к электроду.

При повышении напряжения от  $1.56$  до  $2.0 \text{ V}$  на ВАХ отмечается перегиб, и зависимость тока от приложенного напряжения становится сублинейной:  $I \approx U^k$ , где  $k = 1.2$ . В этом случае большинство неглубоких ловушек уже заполнено и не участвует непосредственно в транспорте носителей. Перенос заряда происходит вследствие туннелирования по локализованным в запрещенной зоне диэлектрика состояниям.

При приложении к слою нанокompозита отрицательного потенциала ВАХ состоит из двух частей: линейной области и степенной зависимости  $I \approx U^{3.4}$ . Напряжение  $U_1$  составляет  $0.32 \text{ V}$ . Концентрация  $n_t$ , рассчитанная в этом случае по формуле (4), составляет  $0.58 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Эффективная подвижность носителей заряда  $\mu_{\text{eff}}$ , полученная с помощью (3), равна  $1.6 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Механизмы токопереноса аналогичны рассмотренным ранее для отрицательных ветвей ВАХ (кривые 1 и 2 на рис. 6).

## 5. Выводы

1) Показано, что наноккомпозит Si-SiO<sub>2</sub> может быть сформирован путем окисления пористого кремния. Наноккомпозит состоит из окисла кремния с включениями кристаллического кремния двух видов: а) округлых частиц с размером в интервале 5–30 nm; б) нитевидной сетчатой структуры с толщиной нитей порядка нескольких нанометров.

2) Концентрация термически активированных ловушек в объеме наноккомпозита составляет  $0.94 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Эффективная подвижность носителей заряда  $\mu_{\text{eff}}$  равна  $0.45 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Существенно меньшее значение эффективной подвижности носителей по сравнению с литературными данными может быть обусловлено сильным захватом носителей заряда на ловушки и длительным временем удержания на центрах захвата, локализованных в развитом интерфейсе Si:SiO<sub>2</sub>. Концентрация оптически опустошаемых ловушек составляет не менее  $0.58 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Эффективная подвижность носителей заряда в этом случае равна  $1.6 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ .

3) Наличие в наноккомпозите сильного захвата на ловушки и эффекта фоточувствительности в видимом спектральном диапазоне, выявленное в настоящей работе, позволяет рассматривать данный наноккомпозит как перспективный материал для применения в функциональных устройствах микроэлектроники.

- [15] A.M. Goodman. Phys. Rev. **114**, 2, 588 (1966).
- [16] А.П. Барабан, П.П. Коноров, А.А. Кручинин. Оптоэлектроника и полупроводниковая техника **7**, 31 (1985).
- [17] R.M. Hill. Phys. Mag. **24**, 192, 1307 (1971).
- [18] В.Ф. Корзо, В.Н. Черняев. Диэлектрические пленки в микроэлектронике. Энергия, М. (1977). 367 с.
- [19] М. Ламперт, П. Марк. Инжекционные токи в твердых телах. Мир, М. (1973). 413 с.

## Список литературы

- [1] А.И. Гусев, А.А. Ремпель. Нанокристаллические материалы. Физматлит, М. (2001). 224 с.
- [2] М.С. Аблова, М.В. Заморянская, В.И. Соколов, Р.И. Хасанов. Письма в ЖТФ **29**, 11, 41 (2003).
- [3] B. Das, S.P. McGinnis. Semicond. Sci. Technol. **14**, 998 (1999).
- [4] L.A. Balagurov, S.C. Bauliss, A.F. Orlov, B. Unal, D.G. Yarkin. Abstracts. Int. Conf. „Porous Semiconductors: Science and Technology“. Madrid (2000). P. 53.
- [5] A.G. Gullis, L.T. Ganam, P.D.J. Calcott. J. Appl. Phys. **82**, 909 (1997).
- [6] D. Kovalev, H. Heckler, G. Polisski, F. Koch. Phys. Stat. Sol. (b) **215**, 871 (1999).
- [7] T. Schmidt, K. Lischka, W. Zulehner. Phys. Rev. B **45**, 8989 (1992).
- [8] O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi. Surf. Sci. Rep. **38**, 1 (2000).
- [9] X.L. Wu, S.J. Xiong, D.L. Fan, Y. Gu, X.M. Bao, B.B. Sui, M.J. Stokes. Phys. Rev. B **62**, 12, R 7759 (2000).
- [10] M. Ballucani, V. Bondarenko, G. Lamedica, V.A. Yakovleva, A. Ferrari. Appl. Phys. Lett. **74**, 1960 (1999).
- [11] M. Stewart, E.G. Robins, T.W. Geders, M.J. Allen, H.Ch Choi, J.M. Buriak. Abstracts. Int. Conf. „Porous Semiconductors: Science and Technology“. Madrid (2000). P. 31.
- [12] D. Dimova-Malinovska. J. Lumin. **80**, 207 (1999).
- [13] Г.И. Сканава. Физика диэлектриков. Физматлит, М. (1958). Т. 2. 907 с.
- [14] B.E. Deal, E.H. Snow, C.A. Mead. J. Phys. Chem. Sol. **27**, 11/12, 1873 (1966).