

Поляризованная фотолюминесценция $nc\text{-Si-SiO}_x$ наноструктур

© Е.В. Михайловская, И.З. Индутный, П.Е. Шепелявый, Н.В. Сопинский

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

E-mail: sopinsky@isp.kiev.ua, sopinsky@ua.fm

(Получена 9 февраля 2015 г. Принята к печати 3 апреля 2015 г.)

Впервые проведены исследования эффекта поляризационной памяти фотолюминесценции в $nc\text{-Si-SiO}_x$ светоизлучающих структурах, которые содержат наночастицы кремния ($nc\text{-Si}$) в матрице окисла. Исследовались поляризационные свойства сплошных и пористых наноструктур, пассивированных в парах (или растворе) HF. Установлено, что эффект поляризационной памяти проявляется лишь после обработки этих структур в HF, что сопровождается также коротковолновым сдвигом максимума фотолюминесценции и существенным повышением ее интенсивности. В анизотропных пористых $nc\text{-Si-SiO}_x$ образцах, полученных с помощью наклонного осаждения в вакууме, наблюдается также заметная ориентационная зависимость степени линейной поляризации фотолюминесценции в плоскости образца, которая коррелирует с ориентацией наноколонн SiO_x , формирующих структуру пористого слоя. Эти эффекты связываются с трансформацией наночастиц симметричной формы в асимметричные удлинённые $nc\text{-Si}$ при травлении их в HF. В сплошных слоях $nc\text{-Si}$ ориентированы хаотично, а в пористых структурах их преимущественная ориентация совпадает с ориентацией оксидных наноколонн.

1. Введение

Видимая фотолюминесценция (ФЛ) кремниевых наноструктур исследуется во многих научных лабораториях, в частности, с целью создания дешевых и совместимых с кремниевой технологией излучателей видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Одной из интересных характеристик такого излучения является так называемая поляризационная память (ПП), т.е. зависимость поляризации ФЛ от направления поляризации возбуждающего излучения. Этот эффект наблюдался во многих наноструктурах, например в ZnO [1], InP [2], Si [3], CdSe [4], GaN [5] нанопроволоках и наностержнях. Для кремниевых наноструктур эффект ПП наиболее изучен для пористого кремния [6–8]. Экспериментами на специально сформированных образцах с кремниевыми наночастицами заданной формы [9,10] установлено, что ПП связана со свечением анизотропных наночастиц. Анизотропия наночастиц обусловлена технологией их формирования — анизотропным травлением, методом синтеза, осаждением под углом и др.

Одними из наиболее перспективных кремниевых светоизлучающих структур являются тонкопленочные структуры $nc\text{-Si-SiO}_x$, в которых наночастицы кремния ($nc\text{-Si}$) находятся в окружении матрицы окисла (SiO_x) [11–13]. Такие структуры имеют ряд преимуществ по сравнению с пористым кремнием и широко исследуются на протяжении последнего десятилетия. Методы формирования таких структур включают два этапа: формирование на подложке разными способами пленки нестехиометрического окисла кремния SiO_x , а затем высокотемпературный отжиг в атмосфере инертного газа или вакууме. Во время отжига происходит разложение SiO_x на SiO_2 и Si и формирование наночастиц кремния. В результате изотропности аморфного окисла образованные наночастицы также являются изо-

тропными, поэтому эффект ПП в таких структурах не наблюдался.

В предыдущих работах было показано [13,14], что обработка таких структур в растворах или парах плавиковой кислоты может существенно повысить интенсивность ФЛ и сместить в коротковолновую область положение максимума ФЛ в результате частичного травления $nc\text{-Si}$ и пассивирования их поверхности. Можно допустить, что такое травление может изменить и форму симметричных наночастиц аналогично пористому кремнию и привести к проявлению эффекта ПП. Особенно ярко эффект травления и пассивации проявляется в разработанных нами пористых $nc\text{-Si-SiO}_x$ структурах, формируемых с помощью вакуумного осаждения под углом паров монооксида кремния (SiO) и последующего высокотемпературного отжига полученного SiO_x слоя [15,16]. Такие слои имеют колоннообразную пористую структуру, при этом оксидные наноколонны наклонены под определенным углом к нормали поверхности образца. При высокотемпературном отжиге таких пленок происходит термостимулированное формирование нановключений кремния в ограниченном объеме SiO_x колонн, что приводит к формированию $nc\text{-Si}$ меньшего размера по сравнению со сплошными пленками того же состава (x). Полученные таким образом наноконструктивные светоизлучающие структуры проявляют асимметрию оптических свойств даже до травления, поэтому целесообразно исследовать поляризационные свойства их ФЛ.

В данной работе представлены результаты первых исследований эффекта ПП в $nc\text{-Si-SiO}_x$ светоизлучающих структурах, в том числе пористых и пассивированных в парах HF.

2. Методика эксперимента

Исследуемые образцы в виде тонких пленок SiO_x получали термическим испарением в вакууме

($1-2 \cdot 10^{-3}$ Па) монооксида кремния SiO фирмы Cerac. Inc. чистотой 99.9% на полированные c -Si подложки (100), которые размещали под углами 0 и 60° между нормалью к поверхности подложки и направлением на испаритель. Скорость испарения контролировали калиброванным кварцевым датчиком. Толщины пленок, измеренные после нанесения с помощью микроинтерферометра МИИ-4, составляли 400–800 нм. Полученные пленки нестехиометрического состава SiO_x отжигали в вакуумной камере при остаточном давлении ($1 \cdot 10^{-3}$ Па) или же в атмосфере гелия, в результате чего SiO_x разлагался на нанокристаллический кремний nc -Si и SiO_2 . Травление отожженных образцов nc -Si– SiO_x проводили в герметичном боксе, где насыщенные пары HF находились при температуре 30°C , или в слабом (1 вес%) водном растворе HF. Спектры ФЛ исследовали при комнатной температуре. Возбуждение ФЛ осуществляли линейно поляризованным светом импульсного азотного лазера ($\lambda = 337$ нм), а также поляризованным стационарным излучением полупроводникового лазера ($\lambda = 415$ нм). Возбуждающий свет падал почти нормально к поверхности образца, а ФЛ регистрировали под малым углом к направлению возбуждения. Для измерений поляризационных характеристик использовали пленочные поляризаторы, один из них ставили на пути возбуждающего света, второй — анализатор — между двумя линзами, которые фокусировали ФЛ от исследуемых структур на входную щель монохроматора ЗМР-2. Спектральный состав излучения регистрировали фотоумножителем ФЭУ-79. В спектрах ФЛ учитывали спектральную чувствительность измерительной установки и поляризационную зависимость чувствительности монохроматора. Структуру пористых пленок SiO_x изучали с помощью высокоразрешающего электронного микроскопа ZEISS EVO 50XVP.

3. Результаты и их обсуждение

Проведенные ранее электронно-микроскопические исследования структуры осажденных под различными углами пленок SiO_x показали, что пленки имеют пористую колоннообразную структуру, где диаметр колонн изменяется в пределах 10–100 нм [14,15]. Размеры колонн, их ориентация, а также пористость структуры зависят от угла осаждения пленки. Пористость образцов, определенная в работе [15], составляла 34% для угла осаждения пленки 60° , при этом наклон сформированных наноколонн окислов по отношению нормали к поверхности образца равнялся $26-29^\circ$ [17]. После высокотемпературного отжига пористость пленок SiO_x , а также размер и ориентация колонн оставались неизменными. В нормально осажденных пленках она составляла меньше 10%, при этом пленки были изотропными и после отжига практически не содержали пор [18].

На рис. 1 (кривые 1, 2) показаны спектры ФЛ образца nc -Si– SiO_x , осажденного в вакууме под углом 0° и ото-

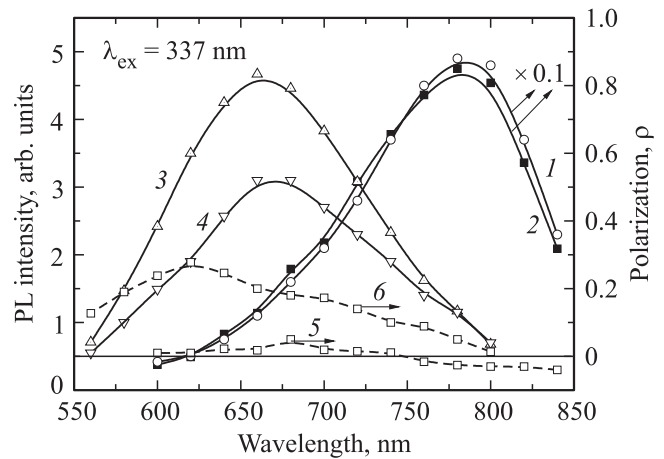


Рис. 1. Спектры ФЛ сплошного nc -Si– SiO_x образца, отожженного в вакууме (1, 2), а затем обработанного в парах HF (3, 4), детектируемые при параллельном (1, 3) и перпендикулярном (2, 4) положении анализатора относительно направления поляризации возбуждающего излучения. Степень линейной поляризации ФЛ этого образца до (5) и после (6) обработки в парах HF.

жденного при 1000°C в вакууме на протяжении 15 мин, а затем протравленного в парах HF в течение 10 мин (кривые 3, 4). Кривые 1 и 3 на этом рисунке отвечают ориентации анализатора, который выделяет поляризацию ФЛ, параллельную поляризации возбуждающего излучения, а кривые 2 и 4 — перпендикулярную к ней. Как видно, в отожженном не травленом образце в пределах погрешности измерений не наблюдается зависимости поляризации ФЛ от направления поляризации возбуждения, т.е. эффекта ПП. Однако после травления такая зависимость появляется, при этом интенсивность ФЛ, поляризованной параллельно поляризации возбуждения (кривая 3), значительно выше, чем поляризованной в перпендикулярном направлении (кривая 4). Эту зависимость можно проиллюстрировать с помощью параметра линейной поляризации ФЛ (ρ), определяемого выражением

$$\rho = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}},$$

где I_{\parallel} — интенсивность ФЛ, поляризованной параллельно поляризации возбуждения; I_{\perp} — интенсивность ФЛ, поляризованной в перпендикулярном направлении. На рис. 1 (кривая 5) показано, что значения ρ для необработанного в HF образца близки к нулю. После травления значения ρ во всем исследованном диапазоне излучения nc -Si– SiO_x структуры возрастают (кривая 6). Так, в области максимума они достигают значения около 0.2 и уменьшаются в длинноволновую область спектра аналогично данным, полученным для пористого кремния [7,8]. После травления наблюдается также сдвиг максимума ФЛ в коротковолновую область (в данном случае на ~ 120 нм) и возрастание интенсивности излучения почти на порядок. Аналогичные результаты были

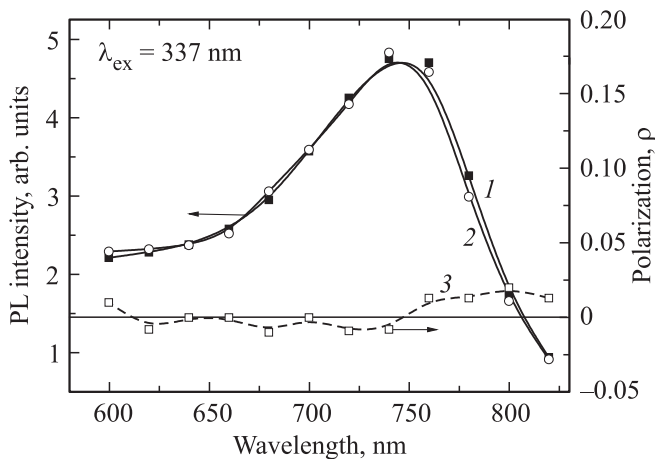


Рис. 2. Спектры ФЛ пористого $nc\text{-Si-SiO}_x$ образца, отожженного в гелии, детектируемые при параллельной (1) и перпендикулярной (2) ориентации анализатора относительно направления поляризации возбуждающего излучения. 3 — спектральная зависимость степени линейной поляризации ФЛ этого образца.

получены и на светоизлучающих структурах, которые обрабатывались в слабых растворах HF.

Спектральная зависимость ФЛ пористого образца $nc\text{-Si-SiO}_x$, полученного осаждением SiO в вакууме под углом 60° и отожженного при 1050°C в атмосфере гелия, показана на рис. 2, где кривой 1 отвечает ориентация анализатора параллельно, а кривой 2 — перпендикулярно направлению поляризации возбуждающего излучения, совпадающего с направлением проекции наноколонн SiO_x на плоскость образца. Как видим, кривые 1 и 2 почти совпадают, а значение степени линейной поляризации близко к нулю (кривая 3). Аналогичная картина наблюдалась и при ориентации поляризации возбуждающего излучения, перпендикулярной проекции наноколонн. Таким образом, и в пористых $nc\text{-Si-SiO}_x$ структурах, получаемых отжигом косонапыленных пленок SiO_x, эффект ПП не проявляется, несмотря на то что эти структуры проявляют двухосную оптическую анизотропию в результате наклона SiO_x колонн [17].

На рис. 3 показаны спектры ФЛ пористого образца $nc\text{-Si-SiO}_x$, полученного осаждением под углом 60° и отожженного при 975°C в вакууме, а затем обработанного в парах HF. Кривой 1 отвечает ориентация анализатора параллельно, а кривой 2 — перпендикулярно направлению поляризации возбуждающего излучения, которое, как показано на вставке, совпадает с проекцией наноколонн SiO_x на плоскость образца. В этом случае по сравнению с необработанным образцом также наблюдается коротковолновый сдвиг максимума излучения (на ~ 70 нм) и возрастание интенсивности ФЛ более чем на порядок (при одинаковом возбуждении). Кроме того, интенсивность ФЛ существенно выше для компоненты, поляризованной параллельно направлению поляризации возбуждающего излучения (спектральная зависимость

степени линейной поляризации ФЛ дана на кривой 3). Как и для сплошного $nc\text{-Si-SiO}_x$ образца после травления (рис. 1, кривая б), ρ в области максимума ФЛ имеет значение ~ 0.2 и уменьшается в длинноволновую область спектра.

Однако в отличие от результатов, показанных на рис. 1, эффект ПП в пористых $nc\text{-Si-SiO}_x$ структурах имеет свои особенности. На рис. 4 показаны спектры ФЛ того же образца, что и на рис. 3, но для поляризации возбуждения, перпендикулярной проекции наноколонн SiO_x на плоскость образца, при сохраненных остальных параметрах измерения. Здесь кривые 1 и 2 также отве-

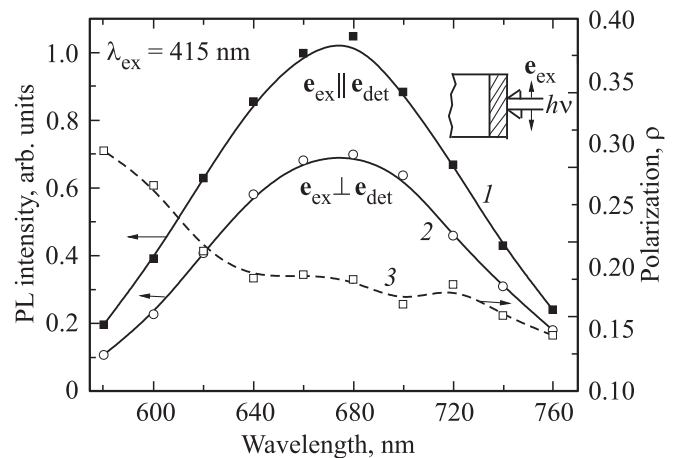


Рис. 3. Спектры ФЛ пористого $nc\text{-Si-SiO}_x$ образца, отожженного в вакууме, а затем обработанного в парах HF, детектируемые при параллельной (1) и перпендикулярной (2) ориентации анализатора относительно направления поляризации возбуждающего излучения. На вставке — взаимная ориентация образца и вектора электрического поля возбуждающего излучения. 3 — спектральная зависимость степени линейной поляризации ФЛ пористого образца.

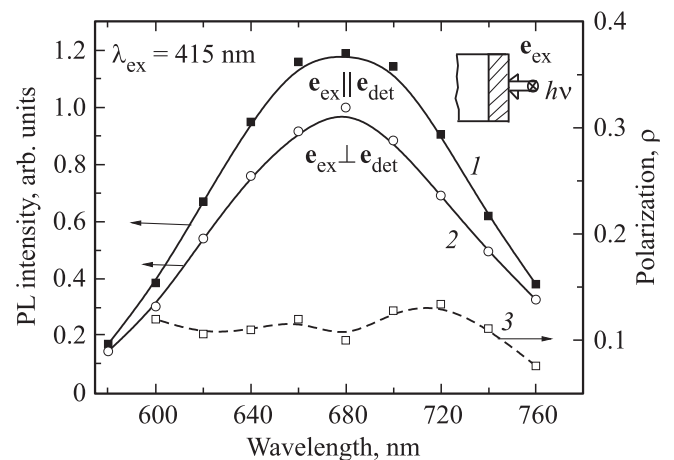


Рис. 4. Спектры ФЛ того же образца, что и на рис. 3, но измеренные при повернутой на 90° поляризации возбуждающего излучения. Направление электрического поля возбуждающего излучения показано на вставке в виде \otimes .

чают ориентации анализатора параллельно и перпендикулярно поляризации возбуждающего излучения, а кривая 3 — значениям ρ . Видно, что разница между I_{\parallel} и I_{\perp} заметно меньше по сравнению с измерением, при котором поляризация возбуждающего излучения совпадала с направлением проекции наноконн. Так, в области максимума ФЛ значения ρ составляют около 0.1, что вдвое меньше по сравнению со случаем, представленным на рис. 3 кривой 3, а в коротковолновой области спектра ФЛ наблюдается почти трехкратное уменьшение ρ . Этот результат подобен зависимостям, наблюдавшимся для пористого кремния, сформированного электрохимическим травлением Si ориентации [100] в присутствии линейно поляризованной подсветки [7], что свидетельствовало о наличии анизотропии ПП в плоскости образца. Следует подчеркнуть, что в пористом кремнии, получаемом традиционным способом, а также в исследованных нами сплошных образцах nc -Si—SiO_x, травленных в парах (или растворах) HF, такая анизотропия ПП не наблюдается.

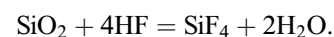
Предложено несколько механизмов природы эффекта ПП. В работе [19] анизотропию поляризации ФЛ частицы удлиненной формы связывают со структурой валентной зоны, которая предопределена квантовым конфайнментом в двух направлениях — параллельно и перпендикулярно более длинной оси частицы. Другое, более распространенное объяснение, дается в рамках диэлектрической модели, в которой пористый кремний рассматривается как композит, который содержит вытянутые и сплюснутые нанокристаллы кремния с преимущественной ориентацией вытянутых вдоль [100] направления. Несферические наночастицы поглощают и излучают свет, поляризованный преимущественно в направлении их более длинной оси. В этом случае ПП является результатом селективного возбуждения той части несферических кремниевых наночастиц, большая ось которых параллельна поляризации возбуждающего излучения. Эти частицы излучают свет, преимущественно поляризованный в том же направлении, что и обуславливает проявление эффекта поляризационной памяти [1,5,8]. Другим необходимым условием наблюдения эффекта ПП является наличие значительного диэлектрического контраста между наночастицами и окружающей средой. Таким образом, интерпретации как на основе квантово-размерных эффектов [19–23], так и в рамках диэлектрической модели связывают проявление эффекта ПП с асимметричной удлиненной формой наночастиц, которые излучают ФЛ.

Исследованию формы излучающих наночастиц в пористом кремнии посвящено ряд экспериментальных работ [24–27]. В работах [24,25] с помощью просвечивающей электронной микроскопии в пористом кремнии обнаружены удлиненные nc -Si структуры с размерами от 2 нм, которые интерпретировались в качестве источника видимой фотолюминесценции исследованных образцов. Комплексные исследования пористого кремния

и окисленных nc -Si с использованием рентгено-абсорбционных методов, ИК и ФЛ-спектроскопии были выполнены также в работах [26,27]. Авторы этих исследований определяли, в частности, среднее координационное число атомов кремния в пористой структуре, которое зависит от соотношения числа атомов на поверхности и в объеме частиц кристаллической фазы кремния, а также от размеров и в некоторой степени от формы частиц. В результате они пришли к выводу, что форма маленьких nc -Si (характерный размер меньше 2 нм) скорее близка к частице, чем к волоконно-подобной (wires) структуре. При этом определить форму этих частиц лишь по среднему координационному числу невозможно. Например, для nc -Si в форме куба или сферы это число очень близкое и с учетом точности эксперимента они неотличимы, так же как и небольшая асимметрия частиц. В более поздних работах были проведены исследования поляризации излучения единичных удлиненных nc -Si, изготовленных с использованием электронной литографии и последующих обработок [9,10]. В результате была надежно подтверждена связь поляризации ФЛ наночастиц кремния с их асимметричной формой.

В исследованных нами образцах, осажденных под углом 0°, термостимулированное разложение SiO_x и формирование наночастиц кремния происходит в изотропной сплошной пленке, поэтому наночастицы также имеют изотропную (близкую к сферической) форму и эффект поляризационной памяти в них не наблюдается.

После обработки в парах (или растворе) HF люминесцентные свойства nc -Si—SiO_x структур изменяются, в частности наблюдаются значительный сдвиг ФЛ в видимую часть спектра и повышение интенсивности ФЛ. Эти изменения объясняются уменьшением размеров nc -Si и пассивацией их поверхности [16]. Во время травления происходит селективное растворение SiO₂ согласно реакции



Четырехфтористый кремний (SiF₄) как газообразное вещество может удаляться, а оборванные связи кремния на поверхности nc -Si пассивируются кислородом и водородом. Окислирование кремния начинается в первую очередь с внешних монослоев nc -Si, что уменьшает исходный размер кристаллического ядра наночастицы и, согласно с квантово-размерным эффектом (КРЭ), проявляется в коротковолновом сдвиге спектров ФЛ образцов после их обработки. Уменьшение размеров nc -Si и пассивация поверхности nc -Si при образовании новых химических связей типа Si—O, Si—H (возможно и F—Si—O или F—Si—H) происходят одновременно, что соответствует росту интенсивности излучения при уменьшении размеров nc -Si. Полученные в данной работе результаты показывают, что такой процесс травления приводит не только к уменьшению размеров наночастиц кремния, о чем уже сообщалось ранее [16], но и к изменению их формы с изотропной на анизотропную,

удлиненную. При этом установлено, что в сплошных травленных $nc\text{-Si-SiO}_x$ структурах в плоскости образца преимущественная ориентация анизотропных наночастиц кремния отсутствует (рис. 1).

Образцы, осажденные под углом 60°C , являются оптически анизотропными даже до травления в результате колончатой структуры SiO_x [17]. Однако эффект ПП ФЛ в этих образцах не наблюдается (рис. 2). Это означает, что наночастицы кремния, которые формируются в колоннах SiO_x во время высокотемпературного отжига, являются также сферически симметричными и поляризация ФЛ в основном определяется именно формой частиц, излучающих свет. Анизотропия самой диэлектрической матрицы через зависимость поляризации ФЛ от поляризации возбуждения не проявляется. Отметим, что диаметры SiO_x колонн (10–100 нм) значительно больше размеров $nc\text{-Si}$ (2–4 нм) и пористость исследованных образцов сравнительно небольшая. Этим, по-видимому, и обусловлена сферическая форма $nc\text{-Si}$, сформированных в такой матрице. После травления форма и размеры $nc\text{-Si}$ в пористой матрице изменяются: наночастицы $nc\text{-Si}$ становятся анизотропными и начинают проявлять эффект ПП (рис. 3 и 4). Кроме того, наблюдается анизотропия ПП в плоскости образца: разница между I_{\parallel} и I_{\perp} заметно больше для поляризации возбуждения, параллельной проекции колонн на плоскость образца, чем для перпендикулярной. Это означает, что анизотропные удлиненные наночастицы кремния имеют в пористой травленной пленке преимущественную ориентацию, причем ее проекция на плоскость образца совпадает с направлением проекции нанокolonн. Скорее всего, и ориентация более длинных осей $nc\text{-Si}$ совпадает с ориентацией нанокolonн SiO_x . Этот вывод согласуется с условиями травления в пористой матрице: процесс травления начинается с поверхностей нанокolonн, поэтому сначала травятся боковые поверхности $nc\text{-Si}$, более близкие к поверхностям колонн, что приводит к удлиненной форме наночастиц вдоль оси колонны.

4. Заключение

В нанокomпозитных $nc\text{-Si-SiO}_x$ структурах, которые формируются путем термического осаждения SiO_x в вакууме и последующего высокотемпературного отжига, зависимость поляризации ФЛ от поляризации возбуждения не проявляется даже в оптически анизотропных пористых образцах. Это свидетельствует о том, что термостимулированное разложение SiO_x и коагуляция кремния приводят к формированию наночастиц $nc\text{-Si}$ почти симметричной формы. В результате обработки в парах (или растворе) HF форма и размеры наночастиц изменяются, в результате чего, кроме описанного нами ранее коротковолнового сдвига и повышения интенсивности ФЛ, в пористых нанокomпозитных $nc\text{-Si-SiO}_x$ структурах наблюдается эффект ПП и ориентационная анизотропия степени поляризации ФЛ в плоскости образца.

Список литературы

- [1] C.Y. Chen, J.H. Huang, K.Y. Lai, Y.J. Jen, C.P. Liu, J.H. He. *Opt. Express*, **20** (3), 2015 (2012).
- [2] J. Wang, M.S. Gudiksen, X. Duan, Y. Cui, C.M. Lieber. *Science*, **293** (5534), 1455 (2001).
- [3] J. Qi, A.M. Belcher, J.M. White. *Appl. Phys. Lett.*, **82** (16), 2616 (2003).
- [4] C.X. Shan, Z. Liu, S.K. Hark. *Phys. Rev. B*, **74** (15), 153 402 (2006).
- [5] H.Y. Chen, Y.C. Yang, H.W. Lin, S.C. Chang, S. Gwo. *Opt. Express*, **16** (17), 13 465 (2008).
- [6] D. Kovalev, M. Ben Chorin, J. Diener, F. Koch, A.L. Efron, M. Rosen, N.A. Gippius, S.G. Tikhodeev. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (11), 1585 (1995).
- [7] G. Polisski, A.V. Andrianov, D. Kovalev, F. Koch. *Brazilian J. Phys.*, **26** (1) 189, (1996).
- [8] J. Diener, D. Kovalev, G. Polisski, N. Kufnzner, F. Koch. *Phys. Status Solidi B*, **224** (1), 297 (2001).
- [9] B. Bruhn, J. Valenta, J. Linnros. *Nanotechnology*, **20**, 505 301 (5pp) (2009).
- [10] J. Valenta, R. Juhasz, J. Linnros. *J. Luminesc.*, **98**, 15 (2002).
- [11] M. Molinary, H. Rinnert, H. Vergnat. *Appl. Phys. Lett.*, **82** (22), 3877 (2003).
- [12] J. Heitmann, F. Muller, M. Zacharias, U. Gesele. *Adv. Mater.*, **17**, 795 (2005).
- [13] И.З. Индутный, Е.В. Михайловская, П.Е. Шепелявый, В.А. Данько. *ФТП*, **44** (2), 218 (2010).
- [14] K. Sato, K. Hirakuri. *J. Appl. Phys.*, **97** (10), 104 326 (2005).
- [15] В.А. Данько, И.З. Индутный, И.Ю. Майданчук, В.И. Минько, П.С. Шепелявый, В.О. Юхимчик. *Оптоэлектрон. и полупроводн. техн.*, **39**, 65 (2004).
- [16] V.A. Dan'ko, V.Ya. Bratus', I.Z. Indutnyi, I.P. Lisovsky, S.O. Zlobin, K.V. Michailovska, P.E. Shepeliavi. *Semicond. Phys., Quant. Electron. Optoelectron.*, **13** (4), 413 (2010).
- [17] M.V. Sopinsky, I.Z. Indutnyi, K.V. Michailovska, P.E. Shepeliavi, V.M. Tkach. *Semicond. Phys., Quant. Electron. Optoelectron.*, **14** (3), 273 (2011).
- [18] И.П. Лисовский, И.З. Индутный, Б.Н. Гненный, П.М. Литвин, Д.О. Мазунов, А.С. Оберемок, Н.В. Сопинский, П.Е. Шепелявый. *ФТП*, **37** (1), 98 (2003).
- [19] W.H. Zheng, J.B. Xia, K.W. Cheah. *J. Phys.: Condens. Matter*, **9** (24), 5105 (1997).
- [20] H.E. Ruda, A. Shik. *Phys. Rev. B*, **72** (11), 115 308 (2005).
- [21] G. Allan, C. Delerue, Y.M. Niquet. *Phys. Rev. B*, **63** (20), 205 301 (2001).
- [22] S. Horiguchi. *Superlat. Microstruct.*, **23** (2), 355 (1998).
- [23] S. Horiguchi, Y. Nakajima, Y. Takahashi, M. Tabe. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (10), 5489 (1995).
- [24] A.G. Cullis, L.T. Canham, P.D.J. Calcott. *J. Appl. Phys.*, **82** (3), 909 (1997).
- [25] L.T. Canham. *Appl. Phys. Lett.*, **57** (10), 1046 (1990).
- [26] S. Schuppler, S.L. Friedman, M.A. Marcus, D.L. Adler, Y.-H. Xie, F.M. Ross, T.D. Harris, W.L. Brown, Y.J. Chabal, L.E. Brus, P.H. Citrin. *Phys. Rev. Lett.*, **72** (16), 2648 (1994).
- [27] S.H. Tolbert, A.B. Herhold, L.E. Brus, A.P. Alivisatos. *Phys. Rev. Lett.*, **76** (23), 4384 (1996).

Редактор А.Н. Смирнов

Polarized photoluminescence of *nc*-Si—SiO_x nanostructures

*K.V. Michailovska, I.Z. Indutnyi, P.E. Shepeliavi,
N.V. Sopinskii*

Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kyiv, Ukraine

Abstract The polarization memory effect (PM) in the photoluminescence (PL) of *nc*-Si—SiO_x light emitting structures, containing nanoparticles of silicon (*nc*-Si) in the oxide matrix has been investigated for the first time. The polarization properties of the solid and porous structures passivated in HF vapour or solution were investigated. It was found that the PM effect is observed only after processing of nanostructures in HF, which is also accompanied by short-wavelength shift of PL maximum and the significant increase in PL intensity. In anisotropic porous *nc*-Si—SiO_x samples obtained by oblique deposition in a vacuum, there is also well-defined orientation dependence of the PL polarization degree in the sample plane. This dependence is related to the orientation of oxide nanocolumns that form the structure of the porous layer. The above effects are associated with the transformation during etching in HF of symmetric nanoparticles in asymmetric elongated *nc*-Si. The asymmetric nanoparticles in solid layers are oriented randomly; in the porous structures their preferred orientation is aligned with the orientation of oxide nanocolumns.