

## Действие быстрых тяжелых ионов на многослойные гетероструктуры Si/SiO<sub>2</sub>

© Г.А. Качурин\*<sup>¶</sup>, С.Г. Черкова\*\*+, Д.В. Марин\*\*+, В.А. Володин\*\*+, А.Г. Черков\*\*+,  
А.Х. Антоненко\*\*+, Г.Н. Камаев\*\*+, В.А. Скуратов\*

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

+ Новосибирский государственный университет,  
630090 Новосибирск, Россия

• Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Россия

(Получена 28 мая 2012 г. Принята к печати 4 июня 2012 г.)

Исследовано действие ионов Хе, 167 МэВ, в интервале доз  $10^{12} - 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  на гетероструктуры, состоявшие из 6 пар слоев Si/SiO<sub>2</sub> с толщинами  $\sim 8$  и  $\sim 10$  нм соответственно. По данным электронной микроскопии, облучение нарушало целостность слоев. При этом рамановские измерения свидетельствовали об увеличении рассеяния от аморфного кремния, а в спектрах фотолюминесценции появлялась желто-оранжевая полоса, присущая мелким выделениям Si в SiO<sub>2</sub>. Отжиг при 800°C восстанавливал сетку SiO<sub>2</sub>, а отжиг при 1100°C приводил к появлению более интенсивного пика фотолюминесценции в области 780 нм, характерного для нанокристаллов Si, причем интенсивность пика люминесценции росла с дозой. Считается, что облучение создает зародыши, облегчающие формирование нанокристаллов Si при последующем отжиге. Процессы протекают внутри треков благодаря сильным нагревам за счет ионизационных потерь ионов.

### 1. Введение

Многослойным гетероструктурам Si/SiO<sub>2</sub>, представляющим собой чередующиеся нанометровые слои Si и SiO<sub>2</sub>, в последние годы уделяется повышенное внимание. Считается, что они перспективны для создания квантово-размерных нанокристаллов Si (нк-Si), которые найдут применение в нанoeлектронике, оптоэлектронике, энергонезависимых запоминающих устройствах, солнечных элементах и радиационно стойких приборах. Способность нк-Si интенсивно излучать в видимом и ИК диапазонах особенно важна для оптоэлектроники, так как в непрямозонном объемном Si излучательная рекомбинация весьма маловероятна и это затрудняет создание кремниевых источников света. Сейчас наиболее распространенным методом формирования светоизлучающих нк-Si является высокотемпературный отжиг слоев SiO<sub>2</sub>, содержащих избыточный Si. Метод, к сожалению, дает большую дисперсию нк-Si по величине и не позволяет независимо контролировать их количество и размеры. Использование нанометровых слоев Si разной толщины, чередующихся со слоями SiO<sub>2</sub>, позволило бы контролировать управлять свойствами квантово-размерных излучателей. В работах [1–4] исследовалась фотолюминесценция (ФЛ) сверхрешеток Si/SiO<sub>2</sub>, полученных осаждением нанометровых слоев без последующих термообработок. В них наблюдались полосы видимой ФЛ, причем изменение энергии фотонов с толщиной слоев Si соответствовало теории квантовых ограничений [2]. Однако в работе [3] было замечено, что отжики после осаждения значительно увеличивают интенсивность ФЛ. В исследованиях [5,6] уже целенаправленно применялись термообработки гетероструктур. В частности, авторы [5]

отметили образование светоизлучающих нк-Si, размеры которых задавались толщинами исходных кремниевых слоев. Кристаллизация при отжигах наблюдалась и в [6], однако было обнаружено, что температура кристаллизации быстро растет с уменьшением толщины слоев Si. Так, было замечено, что, если толщины слоев Si были менее 2–3 нм, аморфная фаза частично сохранялась даже после отжигов при температурах 1100–1200°C [6–10].

Необходимость высокотемпературных термообработок гетероструктур представляет определенное неудобство со многих технических точек зрения. Поэтому ведутся усиленные поиски путей снижения термического бюджета и методов локальной обработки микроучастков без нагрева пластин в целом. В работах [11–15] были использованы несколько вариантов импульсных термообработок, в том числе нано- и фемтосекундные лазерные импульсы. Цель данной работы заключалась в исследовании действия на гетероструктуры Si/SiO<sub>2</sub> быстрых тяжелых ионов (swift heavy ions, SHI). Их особенность заключается в том, что при прохождении через твердые тела они создают треки диаметром в несколько нм, внутри которых в течение  $10^{-11} - 10^{-10}$  с уровни ионизации могут достигать  $10^{22} \text{ см}^{-3}$ , а температуры 5000 К [16]. Таким образом, облучение SHI представляет собой сильно локализованный импульсный отжиг, где активными факторами могут быть и нагрев, и ионизация. В отличие от световых импульсов, поглощающихся в Si на глубинах менее 1 мкм, SHI могут практически равномерно выделять энергию торможения на десятках мкм. Ранее было показано, что облучение SHI субокислов кремния SiO<sub>x</sub> приводит к выделению в треках нанопреципитатов Si, в том числе и в виде люминесцирующих нанокристаллов [17–21]. Известна

<sup>¶</sup> E-mail: kachurin@isp.nsc.ru

пока одна работа, где исследовалось действие SHI на гетероструктуры Si/SiO<sub>2</sub> [22]. В ней была использована одна доза ( $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) ионов Kr или Pb с энергиями соответственно 9 и 4.6 МэВ/нуклон, а свойства структур изучались только после дополнительного отжига при 1100°C в течение 1 ч. Авторы обнаружили, что максимум послеотжиговой ФЛ облученных образцов смещался в коротковолновую сторону, причем сдвиг увеличивался с ростом ионизационных потерь ионов. В данной работе исследовано влияние облучения высокоэнергетичными ионами Xe в интервале доз  $10^{12}$ – $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и последующих изохронных отжигов 500–1100°C на свойства многослойных структур Si/SiO<sub>2</sub>.

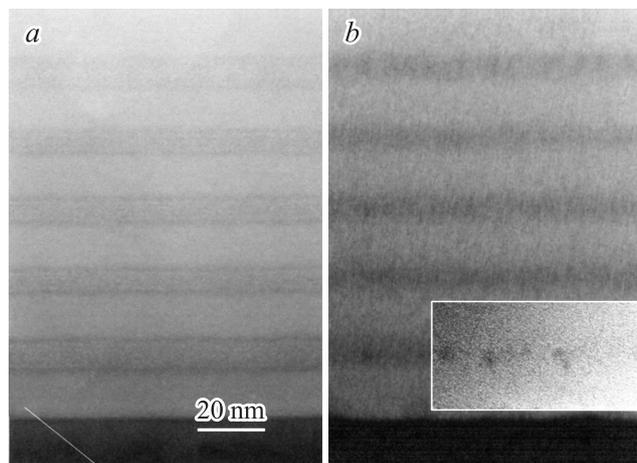
## 2. Эксперимент

Гетероструктуры получали последовательными плазменными осаждениями слоев аморфного Si на кремниевую подложку и затем их окислениями на заданную глубину. Источником осаждаемого кремния служил моносилан. Все операции контролировались по эллипсометрическим спектрам. Для работы использовались 6 пар слоев Si/SiO<sub>2</sub> с толщинами Si около 8 нм и окисла около 10 нм. Облучения ионами Xe с энергией 167 МэВ были проведены на циклотроне ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ дозами в интервале  $10^{12}$ – $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Согласно расчетам по программе SRIM ([www.srim.org](http://www.srim.org)), пробег таких ионов и в Si, и в SiO<sub>2</sub> составляет около 20 мкм, а потери на ионизацию в исследуемых слоях были  $\sim 14.5 \text{ кэВ/нм}$  при упругих потерях  $\sim 0.3$  смещения/нм. Отжиги при 500°C проводили в форминг-газе (Ar + 10% H<sub>2</sub>), а при более высоких температурах — в атмосфере азота. Длительности отжигов составляли 30 мин. Свойства слоев контролировались с помощью спектроскопии ФЛ, рамановского рассеяния в обратной геометрии на длине волны 514.5 нм (спектрометр с тройным монохроматором T64000 Horiba Jobin Yvon) и ИК пропускания в области 9 мкм. Спектры ФЛ нормировались на чувствительность регистрирующей аппаратуры. Структурные исследования были проведены с помощью высокоразрешающей электронной микроскопии поперечных срезов на микроскопе JEM-4000 EX.

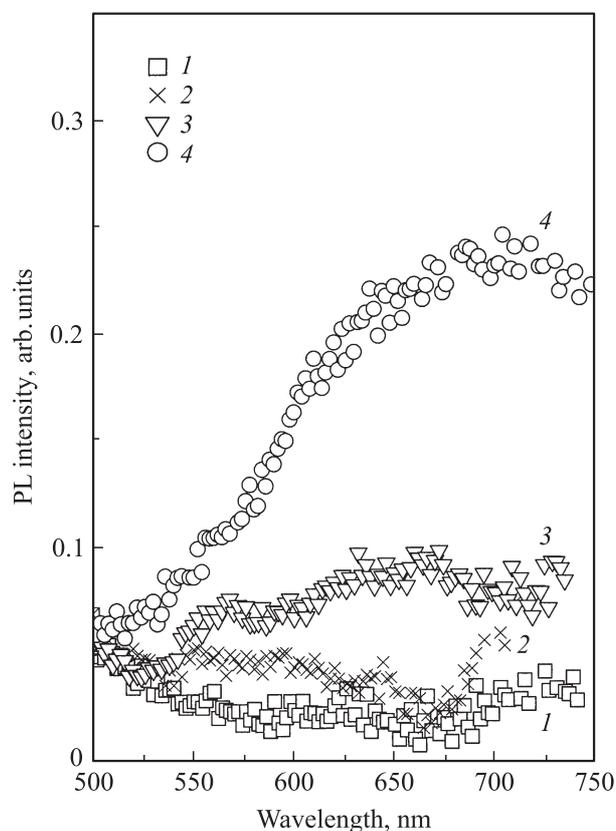
## 3. Результаты

На рис. 1 показаны электронно-микроскопические снимки структур до и после облучения ионами Xe максимальной дозой  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Более темные полосы соответствуют слоям аморфного Si. Из сравнения рис. 1, *a* и *b* видно, что в результате облучения указанной дозой границы между слоями Si и SiO<sub>2</sub> стали менее резкими, хотя в целом слоистость сохранилась. При приготовлении очень тонких поперечных срезов стало видно, что в результате облучения максимальной дозой  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  слои Si перестали быть сплошными и представляли собой темные выделения со средними

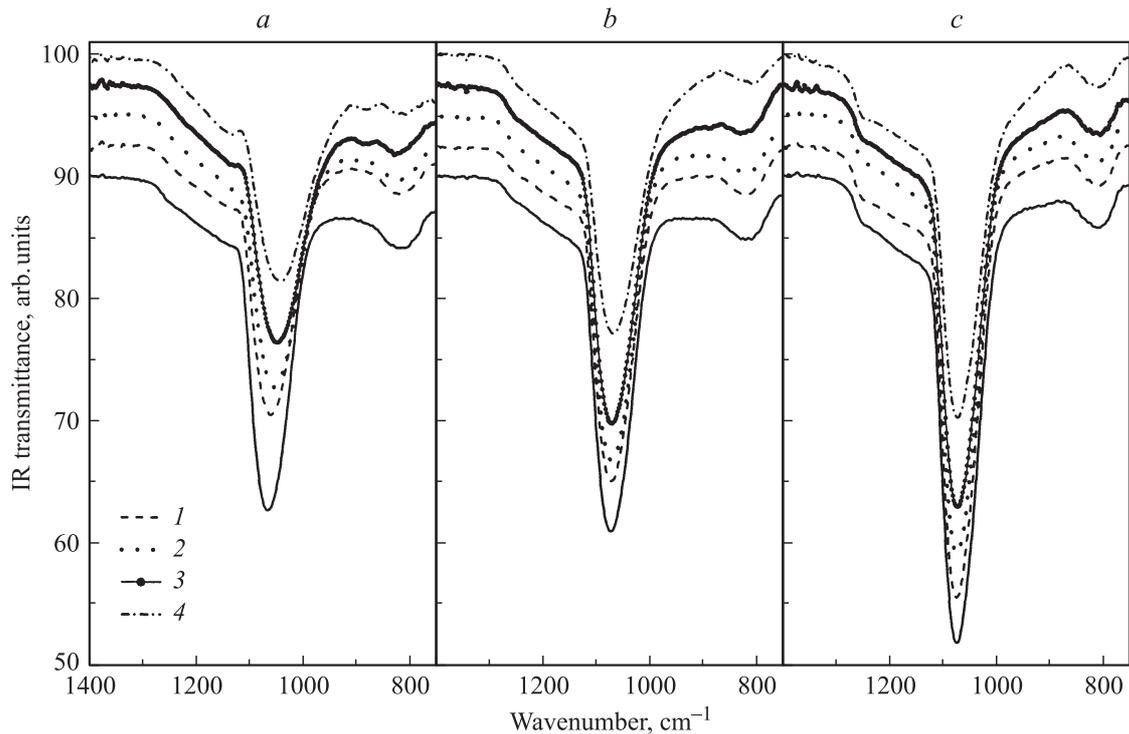
размерами примерно 5 нм (см. вставку на рис. 1, *b*). В некоторых из них удавалось различить атомные плоскости, т. е. они являлись кристаллитами. В более толстых поперечных срезах выделения, видимо, проецируются на экран микроскопа в виде сплошных темных слоев с размытыми краями (рис. 1, *b*).



**Рис. 1.** Электронная микроскопия поперечных срезов структур до (*a*) и после облучения ионами Xe дозой  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (*b*). Вставка — более тонкий срез облученного образца.



**Рис. 2.** Спектры ФЛ структур после облучения ионами Xe дозами,  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ : 1 — 1, 2 — 3, 3 — 10, 4 — 30.

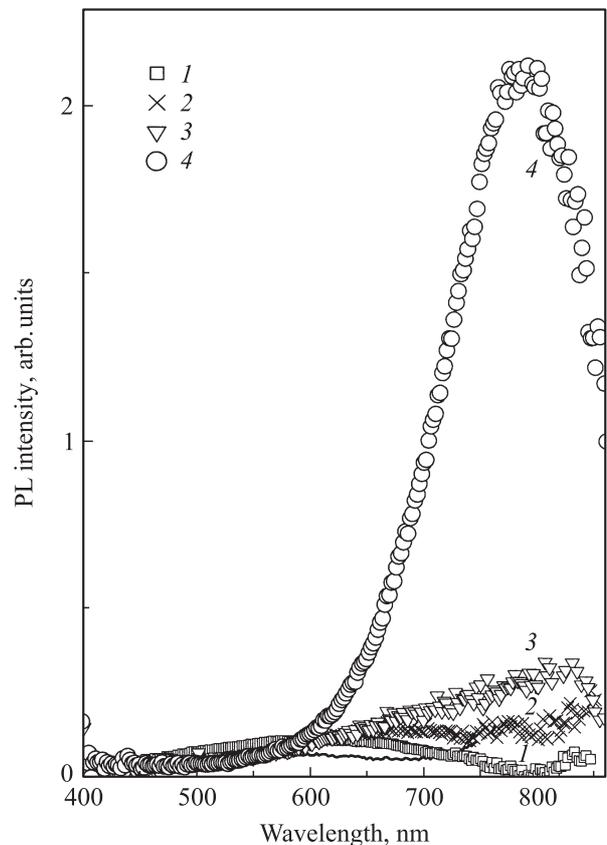


**Рис. 3.** Спектры пропускания слоев после облучения ионами Хе (*a*) дозами,  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ : 1 — 1, 2 — 3, 3 — 10, 4 — 30 и последующих отжигов при температурах 800 (*b*) и 1100°С (*c*). Сплошная линия — спектр необлученного образца.

Спектры ФЛ сразу после облучений разными дозами представлены на рис. 2. На необлученных образцах сигнала практически не было. После доз  $10^{12}$  и  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  ФЛ также была на уровне шумов. Однако с ростом дозы до  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  и особенно до  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  появлялась слабая, но вполне различимая широкая полоса свечения во всем исследованном спектральном интервале. Отметим также, что по мере увеличения дозы наблюдается тенденция к смещению максимума эмиссии в длинноволновую сторону примерно к 700 нм.

Спектры пропускания в зависимости от дозы исследовались в диапазоне волновых чисел 700–1400  $\text{см}^{-1}$ , где имеется известная полоса поглощения 1090  $\text{см}^{-1}$  на связях Si–O в стехиометрическом  $\text{SiO}_2$ . Она хорошо просматривается в необлученных структурах, но с ростом дозы поглощение уменьшается и полоса смещается в сторону длинных волн (рис. 3, *a*). Подобное наблюдалось при облучении SHI стехиометрических слоев  $\text{SiO}_2$ , где было установлено, что спектр поглощения можно разложить на две составляющие — полосы  $\sim 1090$  и  $\sim 1040 \text{ см}^{-1}$  [23]. Вторую полосу обычно приписывают различным структурным несовершенствам окисной сетки и(или) увеличению содержания в ней кремния [24–26].

Далее структуры подвергались отжигам при температурах 500–1100°С. Уже к 800°С спектры пропускания после всех доз, кроме наибольшей, вернулись к форме, бывшей до облучения (рис. 3, *b*). Дальнейшее увеличение температур отжигов до 900 и 1000°С существенных

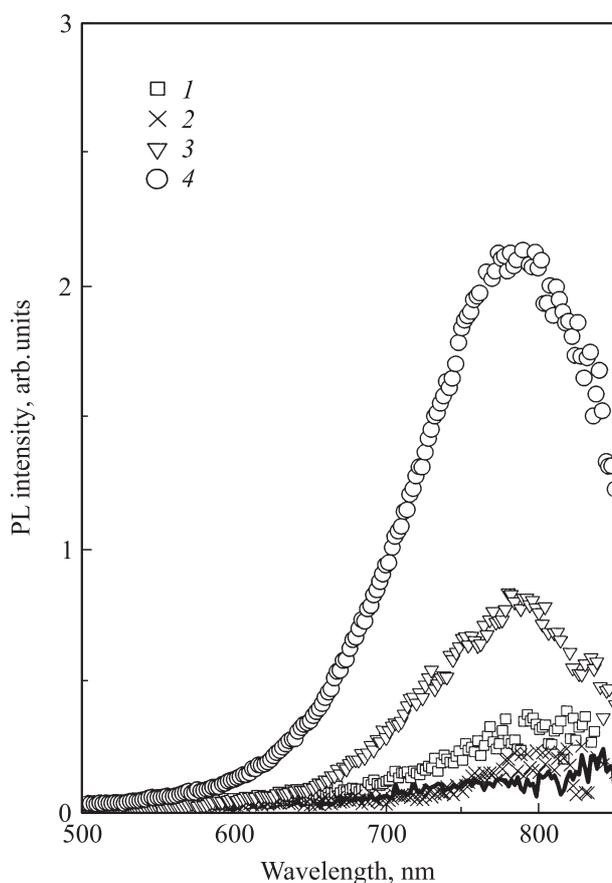


**Рис. 4.** Спектры ФЛ структур, облученных ионами Хе дозой  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , до (сплошная линия) и после отжигов при температурах 500 (1), 800 (2), 1000 (3) и 1100°С (4).

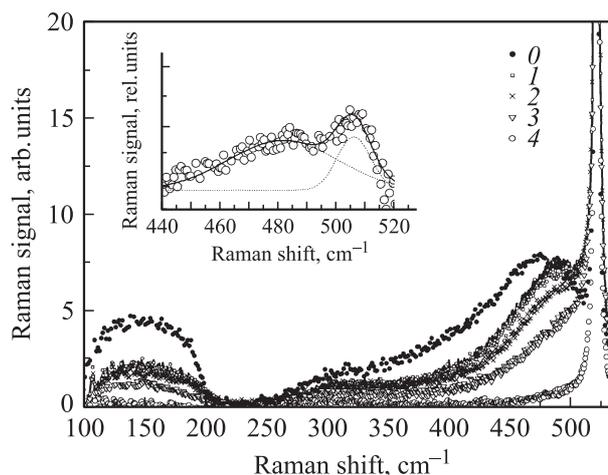
изменений в спектры не внесло. Однако после 1100°C проявилась четкая дозовая зависимость — на длине волны 1090 см<sup>-1</sup> с ростом дозы ионов поглощение уменьшалось (рис. 3, с). Отметим также, что после 1100°C в необлученных образцах поглощение вблизи 1090 см<sup>-1</sup> несколько увеличивалось, что можно рассматривать как улучшение структуры осажденных слоев SiO<sub>2</sub>.

Повышение температуры отжига от 1000 до 1100°C резко изменило спектры ФЛ (рис. 4). Если в интервале температур 500–1000°C наблюдалось слабое увеличение ее интенсивности со смещением максимума в длинноволновую сторону, то после отжига 1100°C произошло многократное усиление ФЛ. Полоса стала относительно более узкой, а максимум сместился к ~ 780 нм (рис. 4). Такая ФЛ типична для нк-Si. Спектры ФЛ слоев, облученных разными дозами и затем отожженных при 1100°C, показаны на рис. 5. Здесь также видна четкая зависимость от дозы облучения — чем доза была больше, тем послеотжиговая интенсивность ФЛ была выше.

Изменение спектров рамановского рассеяния облученных гетероструктур до и после отжига 1100°C показано на рис. 6. Поскольку нанометровые слои аморфных Si и SiO<sub>2</sub> были прозрачны для света, в спектрах вблизи 520 см<sup>-1</sup> всегда присутствовала очень сильная



**Рис. 5.** Спектры ФЛ структур после отжига 1100°C. Сплошная линия — спектр необлученного образца. Дозы облучения ионами Хе, 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>: 1 — 1, 2 — 3, 3 — 10, 4 — 30.



**Рис. 6.** Спектры рамановского рассеяния слоев. Кривая 0 — сразу после облучения дозой  $3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Спектры после отжига при температуре 1100°C: сплошная линия — необлученный образец, кривые 1–4 — облучение ионами Хе дозами, 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>: 1 — 1, 2 — 3, 3 — 10, 4 — 30. Вставка — спектр, полученный путем вычитания из кривой 4 спектра рассеяния подложки (см. текст); пунктир — результат разложения спектра на компоненты, сплошная линия — сумма компонент.

узкая линия рассеяния на продольных длинноволновых оптических фонах монокристаллической кремниевой подложки. Кроме того, были видны более слабые широкие полосы вблизи 480 и 150 см<sup>-1</sup>, обусловленные соответственно поперечными оптическими и акустическими колебаниями в аморфном Si. Из рис. 6 видно, что облучение СИ увеличивает рассеяние на Si-Si-связях аморфного кремния. При последующих отжигах это рассеяние слабело, но на фоне сильного пика 520 см<sup>-1</sup> выявить сигнал от нк-Si, обычно наблюдаемого в области 500–520 нм, в слоях нанометровых толщин не удавалось. Для анализа полученных данных был снят рамановский спектр только подложки, а затем его вычли из кривой 4 рис. 6. Результат показан на вставке рис. 6. Оказалось, что разностный спектр можно довольно точно разложить на две полосы — вблизи 480 и 510 см<sup>-1</sup>. Подчеркнем важный момент — чем выше была доза, тем сильнее после отжига ослаблялся рамановский сигнал от аморфного кремния (рис. 6) и росла интенсивность ФЛ в области 780 нм, характерной для нк-Si (рис. 5).

#### 4. Обсуждение результатов

Проведенные эксперименты показали, что облучение многослойных гетероструктур Si/SiO<sub>2</sub> быстрыми тяжелыми ионами вызывает сильные структурные изменения, причем в той части их пробега, где упругие потери несущественны и торможение происходит в основном за счет ионизации. После дозы ионов Хе  $3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> слои Si перестают быть сплошными и состоят из отдельных

включений нанометровых размеров, хотя чередование слоев еще имеет место (рис. 1). Эти включения дают более темный контраст, как и исходные слои Si, и представляют собой, по-видимому, либо кремниевые, либо обогащенные кремнием нановыделения. Известно, что кремниевые кластеры, цепочки атомов и другие мелкие выделения Si в SiO<sub>2</sub> способны люминесцировать в желто-оранжевой части спектра [27–30]. Из рис. 2 видно, что сразу после облучения ионами Хе с дозы 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup> начинает расти полоса ФЛ именно в этой области. Поскольку в ней нет выраженных пиков, свечение, скорее всего, есть следствие существования источников эмиссии разных форм и размеров. С увеличением дозы до 3 · 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup> интенсивность ФЛ заметно растет и приобретает максимум вблизи 700 нм. Длина волны ФЛ ~ 700 нм является некой условной границей между свечением нк-Si (более длинноволновое) и некристаллических нановыделений Si в SiO<sub>2</sub> (более коротковолновое). Это наводит на мысль, что с увеличением дозы растут как количество источников эмиссии, так и вклад в ФЛ более крупных из них (в соответствии с представлениями о размерном квантовании). Часть нановыделений может приобретать кристаллическую структуру. Как указывалось выше, иногда действительно удавалось различать атомные плоскости внутри отдельных выделений. В работе [23] было показано, что облучение высокоэнергетичными ионами Хе окисных слоев с малым избытком Si приводит без дополнительных отжигов к появлению источников ФЛ в области 550–600 нм, а с увеличением избытка Si максимум ФЛ смещается к 750–800 нм.

Отжиги выявили два температурных интервала — низкотемпературный 500–800 °С и высокотемпературный выше 1000 °С. До 800 °С восстанавливается полоса поглощения 1090 см<sup>-1</sup> стехиометрического SiO<sub>2</sub> (рис. 3, б). Известно, что окислы состава SiO<sub>x</sub> неустойчивы и даже при небольших нагревах разделяются на Si и SiO<sub>2</sub>. Отсюда можно сделать вывод, что бомбардировка SHI приводила к частичному перемешиванию слоев. При температурах 1000–1100 °С происходит ослабление сигнала рамановского рассеяния на связях Si–Si аморфного кремния (рис. 6) и резко увеличивается интенсивность ФЛ со смещением ее максимума к ~ 780 нм (рис. 4). Все это указывает на кристаллизацию части нановыделений, что подтверждается появлением рассеяния вблизи 510 см<sup>-1</sup> (см. вставку на рис. 6). Из этого же спектра видно, что рассеяние аморфным Si все же сохраняется и после 1100 °С. Как уже отмечалось, кристаллизация частиц размерами менее 2–3 нм крайне затруднена. Поэтому кристаллизация, по-видимому, прошла в более крупных нановыделениях. Этому соответствует и послеотжиговое положение максимума ФЛ вблизи 780 нм (рис. 4).

Все наблюдавшиеся эффекты имели четкую дозовую зависимость. Признаков насыщения по дозе не наблюдалось, т.е. процессы протекали в основном внутри отдельных треков [31]. В рамках тепловой модели процессы в треках развиваются следующим образом.

Возбужденные электроны передают энергию атомам за ~ 10<sup>-11</sup> с. Далее трек остывает со скоростью до ~ 10<sup>13</sup> К/с. В стадии расплава материал может пребывать 10<sup>-10</sup>–10<sup>-9</sup> с, чего при коэффициентах диффузии в расплавах 10<sup>-3</sup>–10<sup>-4</sup> см<sup>2</sup>/с достаточно для перемешивания атомов и для создания зародышей новых фаз. Такой механизм представляется вполне реалистичным, хотя ранее высказывались предположения и об атермическом характере процессов в треках [32]. В некоторых работах по действию фемтосекундных лазерных импульсов на мишени отмечалось в частности, что структурные изменения в облучаемых слоях начинаются еще до того, как возбужденные электроны успевают передать атомам энергию, достаточную для плавления [33–36]. Однако за этим все равно следует стадия сильного нагрева.

Как известно, твердофазная кристаллизация объемного аморфного кремния идет уже при температурах около 600 °С. При наличии ориентирующей подложки она протекает эпитаксиально, а в отсутствие ее образуется поликристалл благодаря росту на случайных зародышах. В наших экспериментах в необлученных структурах Si не кристаллизовался даже при отжигах при 1100 °С, что, видимо, было связано с проблемой формирования кристаллических зародышей. Облучение SHI решает эту проблему и может быть использовано для управляемых локальных воздействий при создании наноструктур в строго заданных местах. При этом их размеры будут задаваться по одной координате толщинами исходных нанослоев, а по двум другим — диаметром треков.

## 5. Заключение

Исследовано действие ионов Хе с энергией 167 МэВ на многослойную гетероструктуру Si/SiO<sub>2</sub>, состоявшую из слоев Si толщиной ~ 8 нм и SiO<sub>2</sub> толщиной ~ 10 нм. Установлено, что облучение ионами нарушает целостность слоев и после максимальной из использованных доз 3 · 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup> на месте кремниевых слоев образуются нановыделения, хотя слоистость в целом сохраняется. Рамановские измерения свидетельствуют об увеличении рассеяния на связях Si–Si аморфного кремния после облучения, а в спектрах ФЛ появляется желто-оранжевая полоса, которую обычно связывают с кремниевыми кластерами и другими мелкими выделениями Si в SiO<sub>2</sub>. При последующих отжигах уже при 800 °С происходит восстановление сетки SiO<sub>2</sub> с вытеснением избыточного Si, но признаков образования нк-Si не наблюдается. Только после отжига 1100 °С появляется пик ФЛ, величина которого непрерывно растет с дозой ионов, причем в необлученных слоях люминесценция не возникает. ФЛ имеет максимум в области 780 нм, что характерно для нк-Si. Считается, что облучение SHI создает зародыши, облегчающие при последующем отжиге формирование нк-Si в гетероструктурах Si/SiO<sub>2</sub>. Процессы протекают внутри отдельных треков благодаря сильным нагревам за счет ионизационных потерь при торможении ионов.

## Список литературы

- [1] A.V. Zayats, Yu.A. Repeyev, D.N. Nikogosyan, E.A. Vinogradov. *Phys. Lett. A*, **155**, 65 (1991).
- [2] D.J. Lockwood, Z.H. Lu, J.-M. Baribeau. *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 539 (1996).
- [3] B.T. Sullivan, D.J. Lockwood, H.J. Labbe, Z.-H. Lu. *Appl. Phys. Lett.*, **69** (21), 3149 (1996).
- [4] Y. Kanemitsu, T. Kushida. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (22), 3550 (2000).
- [5] L. Tsybeskov, K.D. Hirschman, S.P. Duttagupta, M. Zacharias, P.M. Fauchet, J.P. McCaffrey, D.J. Lockwood. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 43 (1998).
- [6] M. Zacharias, P. Streitenberger. *Phys. Rev. B*, **62**, 8391 (2000).
- [7] V. Vinciguerra, G. Franzó, F. Priolo, F. Iacona, C. Spinella. *J. Appl. Phys.*, **87**, 8165 (2000).
- [8] Z.H. Lu, D.J. Lockwood, J.-M. Baribeau. *Sol. St. Electron.*, **40**, 197 (1996).
- [9] L. Khriachtchev, O. Kilpela, S. Karirinne, J. Keranen, T. Lepisto. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 323 (2001).
- [10] P. Photopoulos, A.G. Nassiopoulou. *J. Phys.: Condens. Matter*, **15**, 3641 (2003).
- [11] D. Hiller, S. Goetze, M. Zacharias. *J. Appl. Phys.*, **109**, 054 308 (2011).
- [12] D. Cha, J.H. Shin, I.-H. Song, M.-K. Han. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (8), 1287 (2004).
- [13] H. Zou, L. Wu, X. Huang, F. Qiao, P. Han, X. Zhou, Z. Ma, Y. Liu, W. Li, K. Chen. *Thin Sol. Films*, **491** (1–2), 212 (2005).
- [14] B.V. Kamenev, H. Grebel, L. Tsybeskov. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 143 117 (2006).
- [15] V.A. Volodin, T.T. Korchagina, A.K. Gutakovskiy, L.I. Fedina, M.A. Neklyudova, A.V. Latyshev, J. Jedrzejewski, I. Balberg, J. Koch, B.N. Chichkov. *Phys. Express*, **2** (5), 1 (2012).
- [16] M. Toulemonde, C. Dufour, A. Meftah, E. Paumier. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **166–167**, 903 (2000).
- [17] D. Rodichev, Ph. Lavallard, E. Dooryhee, A. Slaoui, J. Perriere, M. Gandais, Y. Wang. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **107**, 259 (1996).
- [18] P.S. Chaudhari, T.M. Bhave, D. Kanjilal, S.V. Bhoraskar. *J. Appl. Phys.*, **93** (6), 3486 (2003).
- [19] P.S. Chaudhari, T.M. Bhave, R. Pasricha, F. Singh, D. Kanjilal, S.V. Bhoraskar. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **239**, 185 (2005).
- [20] W.M. Arnoldbik, N. Tomozeiu, E.D. van Hattum, R.W. Lof, A.M. Vredenberg, F.H.P.M. Habraken. *Phys. Rev. B*, **71**, 125 329 (2005).
- [21] Г.А. Качурин, С.Г. Черкова, В.А. Скуратов, Д.В. Марин, А.Г. Черков. *ФТП*, **44**, 544 (2010).
- [22] F. Gourbilleau, C. Ternon, X. Portier, P. Marie, M. Levalois, R. Rizk, C. Dufour. *Phys. E*, **16**, 434 (2003).
- [23] Г.А. Качурин, С.Г. Черкова, Д.В. Марин, В.Г. Кеслер, В.А. Скуратов, А.Г. Черков. *ФТП*, **45** (3), 419 (2011).
- [24] А.Н. Карпов, Д.В. Марин, В.А. Володин, J. Jedrzejewski, Г.А. Качурин, Е. Savir, Н.Л. Шварц, З.Ш. Яновицкая, Y. Goldstein, I. Balberg. *ФТП*, **42**, 747 (2008).
- [25] С.Н. Шамин, В.Р. Галахов, В.И. Аксенова, А.Н. Карпов, Н.Л. Шварц, З.Ш. Яновицкая, В.А. Володин, И.В. Антонова, Т.Б. Ежевская, J. Jedrzejewski, E. Savir, I. Balberg. *ФТП*, **44**, 550 (2010).
- [26] I.P. Lisovsky, V.G. Litovchenko, D.O. Mazunov, S. Kaschieva, J. Koprinarova, S.N. Dmitriev. *J. Optoelectron.: Adv. Mater.*, **7** (1), 325 (2005).
- [27] P. Mutti, G. Ghislotti, S. Bertoni, L. Bonoldi, G.F. Cerofolini, L. Meda, E. Grilli, M. Guzzi. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 851 (1995).
- [28] G. Ghislotti, B. Nielsen, P. Asoka-Kumar, K.G. Lynn, A. Gambhir, L.F. Di Mauro, C.E. Bottani. *J. Appl. Phys.*, **79**, 8660 (1996).
- [29] S.P. Withrow, C.W. White, A. Meldrum, J.D. Budai, D.M. Hembree, jr., J.C. Barbour. *J. Appl. Phys.*, **86**, 396 (1999).
- [30] Y. Batra, T. Mohanty, D. Kanjilal. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **266**, 3107 (2008).
- [31] Г.А. Качурин, С.Г. Черкова, В.А. Скуратов, Д.В. Марин, А.Г. Черков. *ФТП*, **44** (4), 544 (2010).
- [32] D. Rodichev, Ph. Lavallard, E. Dooryhee, A. Slaoui, J. Perriere, M. Gandais, Y. Wang. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **107**, 259 (1996).
- [33] T.Y. Choi, D.J. Hwang, C.P. Grigoropoulos. *Opt. Eng.*, **42** (11), 3383 (2003).
- [34] K. Sokolowski-Tinten, J. Bialkowski, D. von der Linde. *Phys. Rev. B*, **51** (20), 14 186 (1995).
- [35] H.W.K. Tom, G.D. Aumiller, C.H. Brito-Cruz. *Phys. Rev. Lett.*, **60** (14), 1438 (1988).
- [36] A. Rousse, C. Rischel, S. Fourmaux, I. Uschmann, S. Sebban, G. Grillon, Ph. Balcou, E. Förster, J.P. Geindre, P. Audebert, J.C. Gauthier, D. Hulinet. *Nature Lett.*, **410**, 65 (2001).

Редактор Л.В. Беляков

## Influence of the swift heavy ion irradiation on multilayer Si/SiO<sub>2</sub> heterostructures

G.A. Kachurin\*, S.G. Cherkova\*\*+, D.V. Marin\*\*+, V.A. Volodin\*\*+, A.G. Cherkov\*\*+, A.H. Antonenko\*\*+, G.N. Kamaev\*\*+, V.A. Skuratov\*

\* Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia  
 + Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia  
 • Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

**Abstract** Effect of irradiation of heterostructures with 167 MeV Xe ions in the dose range of  $10^{12} - 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  was studied. The structures consisted of 6 pairs of Si/SiO<sub>2</sub> layers with the thicknesses being  $\sim 8 \text{ nm}$  and  $\sim 10 \text{ nm}$ , respectively. According to the electron microscopy data the irradiation broke the layers integrity. In addition, Raman spectroscopy evidenced an increase in the scattering by amorphous silicon, and in the photoluminescence spectra the yellow-orange band appeared, usually ascribed to the tiny inclusions of Si in SiO<sub>2</sub>. The annealing at 800°C restored the SiO<sub>2</sub> net, pushing the excess Si atoms out. The annealing at 1100°C led to appearance of more intensive photoluminescence peak at about 780 nm, typical of the Si nanocrystals, and its intensity was growing with the dose. It is concluded, that the irradiation creates the nuclei, which facilitate formation of Si nanocrystals under the subsequent annealing. The processes proceed inside the tracks due to the high temperatures resulting from the strong ionization losses of the ions energy.