

02

## Влияние погружения слоев пористого кремния в водные растворы $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ на фотолюминесценцию в процессе длительного хранения

© Н.Г. Галкин<sup>1</sup>, Д.Т. Ян<sup>2¶</sup>, К.Н. Галкин<sup>1</sup>, М.В. Боженко<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, 690041 Владивосток, Россия<sup>2</sup> Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021 Хабаровск, Россия

¶ e-mail: dmitry\_yan@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2018 г.

Взаимодействие пористого кремния (PS) с водными растворами  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  с различной молярной (М) концентрацией приводит к внедрению ионов железа в поры кремния (PS-Fe), образованию различной толщины адсорбированных покрытий железа и повышению стабильности слоев PS, что актуально для разработки приборных структур на основе PS. При обработке слоев PS растворами методом погружения необходимо определить его влияние на спектральный состав излучения, интенсивность фотолюминесценции (PL) и кинетику ее изменения при длительном хранении в атмосферных условиях. При обработке свежеприготовленного PS в водных растворах  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  методом погружения установлено, что при кратковременном хранении (сроком до 5 дней) образцов PS наблюдается рост интенсивности PL в 7.5 раз при малой (0.2 М) и в 3–3.6 раза при большой (0.7–0.8 М) концентрации  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  по сравнению с интенсивностью PL необработанного слоя PS. После длительного хранения (4 месяца) отмечен значительный рост (8–18 раз) интенсивности PL для образцов PS-Fe с концентрациями 0.1–0.2 М и 0.7–0.8 М с сохранением положения пика PL по сравнению с необработанным PS. Однако при концентрации  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  0.3 М обнаружено снижение интенсивности PL и „голубой“ сдвиг пика PL, что объясняется неполным закрытием поверхности PS адсорбированным слоем железа. Проведен анализ кинетики спектров PL при длительном хранении, предложена модель для объяснения интенсивности и спектрального состава PL.

DOI: 10.21883/OS.2018.08.46358.81-18

### Введение

Фотолюминесценция (PL) пористого кремния (PS) в видимой области спектра и при комнатной температуре привлекает серьезное внимание исследователей уже более двух десятилетий [1–11]. Основными проблемами, препятствующими технологическому внедрению, являются усиление и стабилизация эмиссии видимого излучения. Были приложены значительные усилия для реализации люминесцентных свойств PS в оптических структурах, однако низкая эффективность [12] и нестабильность [1] оптических характеристик являются главными проблемами. Нестабильность PS, как известно, возникает из-за трансформации наноструктуры PS при различных условиях формирования [2,3,13,14] и атмосферных условий [15,16]. Старение слоев PS индуцирует нестабильность сигнала PL, поскольку под воздействием атомов кислорода происходит разрушение кремний-водородных (Si-H) связей в нанокристаллах (NC) кремния, а кислород может оставаться на поверхности или диффундировать вглубь кремниевых NC. Последнее приводит к уменьшению размеров NC и, следовательно, к сдвигу максимума пика PL в область больших энергий фотонов („голубому“ сдвигу) [17,18].

Для стабилизации интенсивности PL PS и в дальнейшем для их внедрения в приборные структуры необходимо модифицировать поверхностную структуру PS. Известно, что атомы железа и кобальта могут легко про-

никать в кремниевые поры, что приводит к замене связей Si-H на связи Si-Fe [19] или Si-Co [20]. В работе [21] слои PS пропитывали водным раствором  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  для введения ионов железа в поры. Было обнаружено, что максимум пика PL находится при 1.85 eV (670 nm, „красная“ область спектра). Также была исследована сильная и термически стабильная PL от PS с различным содержанием железа [22]. При температурах от 14 до 120 К интенсивность „красной“ PL для системы PS-Fe была в 10 раз выше, чем от PS без пропитки ионами железа. При этом положение максимума пика PL сохранялось. При температурах от 120 до 300 К наблюдался „голубой“ сдвиг пика системы PS-Fe.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния водных растворов  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  с различными молярными концентрациями на интенсивность PL PS, а также исследовано влияние короткого (до 5 дней) и длительного (до 4 месяцев) хранения на интенсивность и положение пика PL в PS, представлены данные по оптической спектроскопии и обсуждаются модели старения PS и влияние на это раствора  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  с различной молярной концентрацией.

### Эксперимент

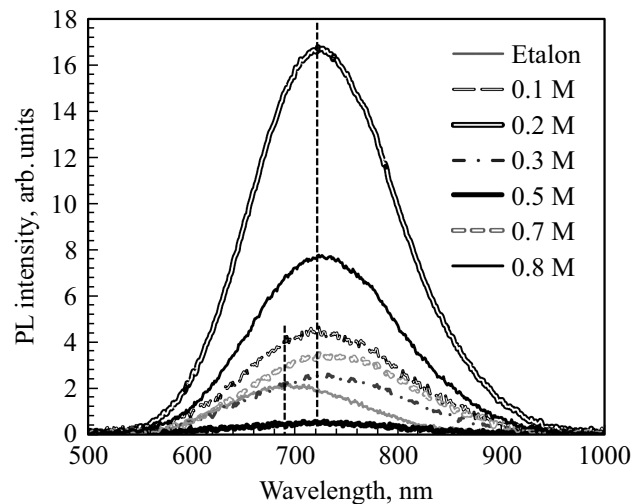
Для получения PS был использован монокристаллический кремний *p*-типа Si(100) с удельным сопротивле-

нием 1–10 Ом·см. В результате анодного травления в растворе  $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:1$  [9,10] были получены семь образцов PS при плотности тока  $10 \text{ mA/cm}^2$  и времени травления 10 min. Один из образцов (в дальнейшем — эталон) использовался для сравнения, и поэтому последующей процедуре не подвергался. После анодного травления образцы промывались деионизованной водой и высушивались в потоке аргона, после чего образцы PS попеременно погружались в водные растворы с различными молярными (М) концентрациями нитрата железа ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ): 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 и 0.7 М в течение фиксированного времени (5 min) при комнатной температуре (1 М = 241.861 g  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , растворенного в 1 л воды при  $20^\circ\text{C}$ ). Затем образцы промывали в деионизованной воде и продували в струе азота без дополнительного высушивания при повышенной температуре. Запись спектров PL образцов проводили с возбуждением при  $\lambda = 405 \text{ nm}$  и регистрацией с использованием монохроматора MS-3504i. Спектры отражения всех образцов в области  $0.2\text{--}0.9 \mu\text{m}$  регистрировались при комнатной температуре на спектрофотометре HitachiU-3010 с интегрирующей сферой. Спектры пропускания трех образцов и отражения шести образцов регистрировались на фурье-спектрофотометре BrukerVertex 80v в диапазоне длин волн  $0.4\text{--}100 \mu\text{m}$ .

## Результаты и обсуждение

После взаимодействия образцов PS с растворами нитрата железа проведено исследование кинетики изменения PL-свойств в два этапа. На первом этапе спектры PL регистрировались в течение первых пяти дней хранения. Замечено, что интенсивность спектров PL изменяется по поверхности образцов, что связано с точечными контактами с обратной стороны подложки и неравномерностью протекания тока в объеме кремниевой пластины. Поэтому при анализе поведения спектров PL от времени хранения добивались максимального попадания пучком лазера в одно место образца при повторных измерениях. После первых пяти дней хранения для всех образцов, включая образец PS без обработки раствором нитрата железа, были зарегистрированы спектры PL (рис. 1). Анализ интенсивностей и положений максимумов в спектрах PL показал, что наблюдаются „красные“ сдвиги спектра при изменении молярной концентрации нитрата железа. Причем эти изменения не являются монотонными (рис. 2, *b, a*). С ростом концентрации нитрата железа (от 0.1 до 0.2 М) при обработке PS положение пика PL сдвигается в сторону меньших длин волн или больших энергий фотонов („голубой“ сдвиг). При концентрации нитрата железа 0.3 М наблюдается максимум положения пика PL („красный“ сдвиг) (рис. 2, *a*). Однако дальнейший рост молярной концентрации нитрата железа приводит к уменьшению и стабилизации положения максимума пика PL.

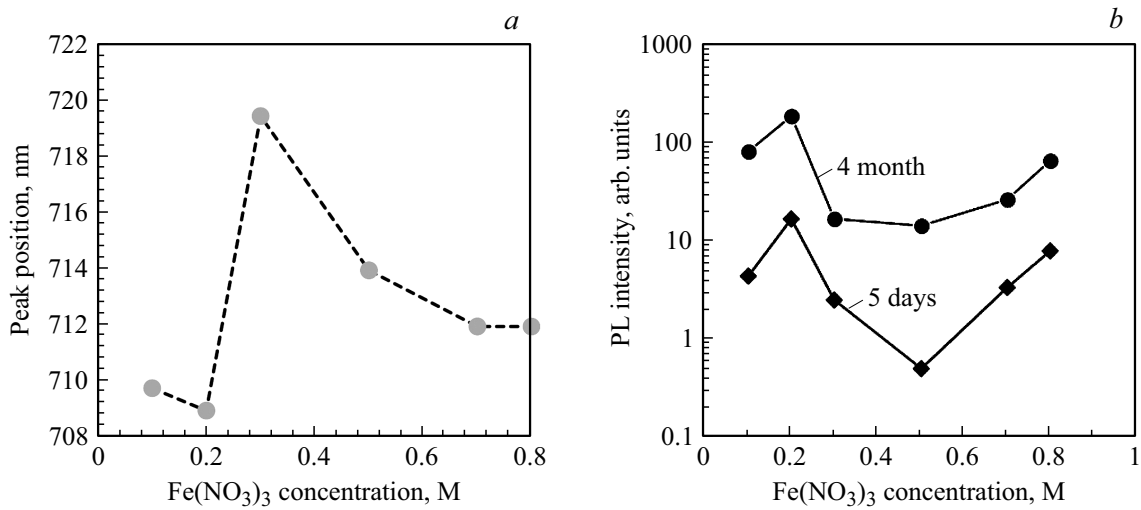
Следовательно, в спектр PL дает вклад несколько составляющих с различным положением максимума и



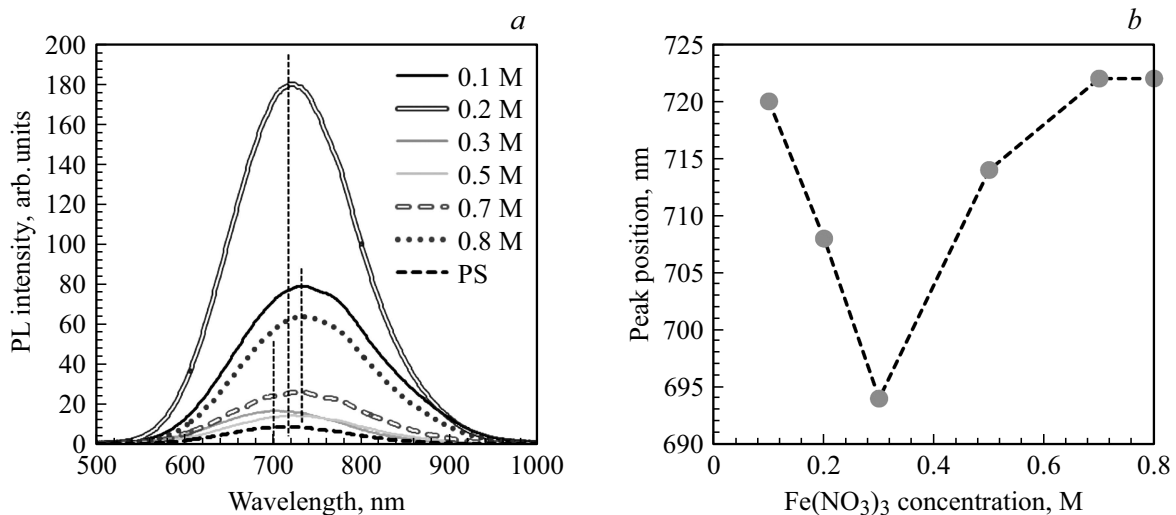
**Рис. 1.** Спектры PL образцов PS, обработанных растворами  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , с молярными концентрациями от 0.1 до 0.8 М в сравнении образцом PS без взаимодействия с раствором (эталон) через 5 дней.

различной интенсивностью. Движение максимума пика в этом случае можно объяснить изменением соотношения вкладов этих пиков. При этом интенсивность максимума пика от концентрации нитрата железа (рис. 2, *b*) имеет немонотонный, но совершенно другой характер. При концентрации 0.2 М наблюдается максимум интенсивности пика PL для срока хранения 5 дней, который затем повторяется и для срока хранения 4 месяца. При концентрациях нитрата железа от 0.3 до 0.5 М наблюдается некоторое плато интенсивности пика PL для срока хранения 5 дней. При увеличении концентрации до 0.7–0.8 М наблюдается одновременно рост интенсивности максимума пика PL и сдвиг максимума пика PL в сторону больших длин волн ( $712 \text{ nm}$  — „красный“ сдвиг по сравнению с PS без обработки,  $682 \text{ nm}$ ) с насыщением. Можно предположить, что основной вклад в спектр PL обеспечен другим механизмом PL.

Рассмотрим спектры PL части из тех же образцов через 4 месяца хранения (0.1, 0.2 и 0.8 М) на воздухе. Изменения в интенсивности пика PL после 4 месяцев хранения (рис. 3, *a*), по-видимому, связаны с увеличением интенсивности засветки от светодиода и частично другим выбранным местом на поверхности PS. Однако характер изменений интенсивности (рис. 2, *b*) остается аналогичным, что позволяет нам предположить сохранение основного механизма возбуждения PL в модифицированном нитратом железа слое PS. Максимум имеет также образец с концентрацией 0.2 М. Однако достаточно сильно изменилась зависимость положения максимума пика PL (рис. 3, *b*) по сравнению со случаем малого срока хранения. Сначала уменьшаются положения максимумов пиков PL до 0.3 М. Затем при 0.5–0.7 М сначала наблюдается рост положения максимума спектра PL, а затем его насыщение. В целом при хранении зафиксирован „красный“



**Рис. 2.** Положение максимума в спектре PL в зависимости от молярной концентрации  $Fe(NO_3)_3$  при погружении образцов PS (a). Зависимость максимума интенсивности в спектре PL (b) при двух сроках хранения 5 дней и 4 месяца.

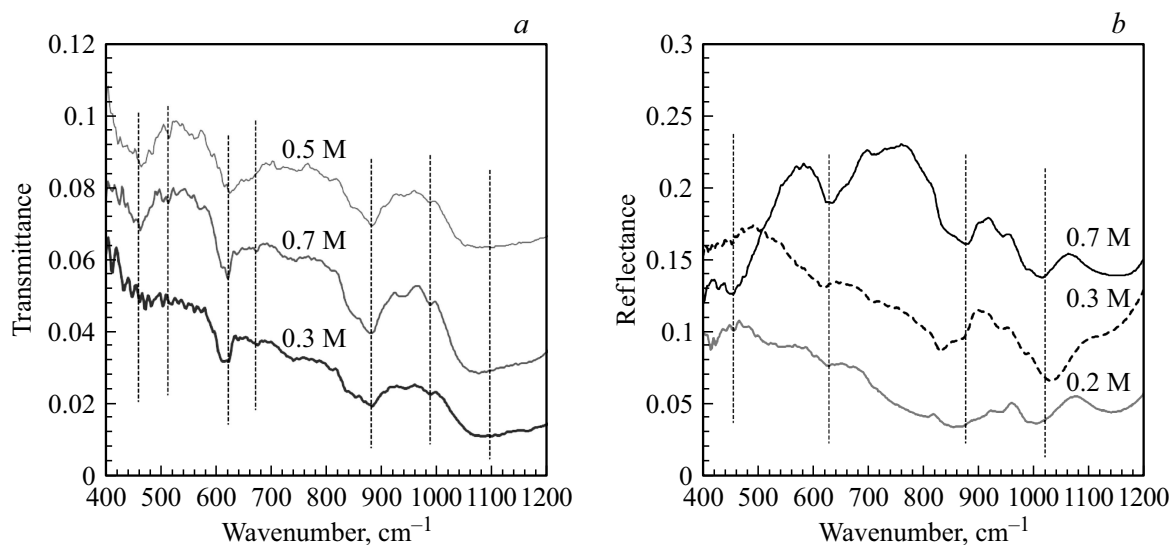


**Рис. 3.** Спектры PL образцов PS, обработанных растворами  $Fe(NO_3)_3$ , с молярными концентрациями от 0.1 до 0.8 М в сравнении с монокристаллическим кремнием (Si) и образцом PS без взаимодействия с раствором (эталон) через 4 месяца (a). Положение максимума в спектре PL в слое PS без обработки и в слоях PS-Fe с различной молярной концентрацией  $Fe(NO_3)_3$  после 4-х месяцев хранения (b).

сдвиг максимума пика PL с увеличением срока хранения, что несколько не совпадает с данными работ [17–19,21,22].

Для того чтобы проанализировать причины такого поведения, рассмотрим данные дальней ИК фурье-спектроскопии. Спектры отражения и пропускания были записаны для отдельных образцов, поскольку на части из них на обратной стороне оставался непрозрачный металлический контакт. На отдельных образцах контакт был удален, что позволило провести запись спектров. Из-за слабого сигнала пропускания спектры сильно зашумлены. Известно, что основные изменения в спектрах образцов PS при хранении происходят при волновых числах, соответствующих основным связям

в PS. В образцах с молярными концентрациями нитрата железа 0.3, 0.5 и 0.7 М на спектрах пропускания (рис. 4, a) наблюдались пики поглощения при  $1100\text{ cm}^{-1}$ , около  $900\text{ cm}^{-1}$ ,  $610\text{--}660\text{ cm}^{-1}$  [23,24], которые, как известно, относятся к ранее определенным в PS валентным колебаниям Si–O–Si ( $1100\text{ cm}^{-1}$ ) и и ножничным колебаниям Si–H<sub>2</sub> ( $900\text{ cm}^{-1}$ ). Полоса поглощения при  $610\text{--}660\text{ cm}^{-1}$  является совокупностью валентных колебаний Si–Si и Si–H<sub>n</sub> ( $n = 1$  и  $n = 2$ ). При больших волновых числах просматриваются линии около  $2160\text{ cm}^{-1}$  (не показаны на рис. 4), которые относятся к связям Si–H, где атом кремния соединен с другим атомом кремния из подложки. Дополнительно, в образцах, обработанных в водных растворах  $Fe(NO_3)_3$ ,



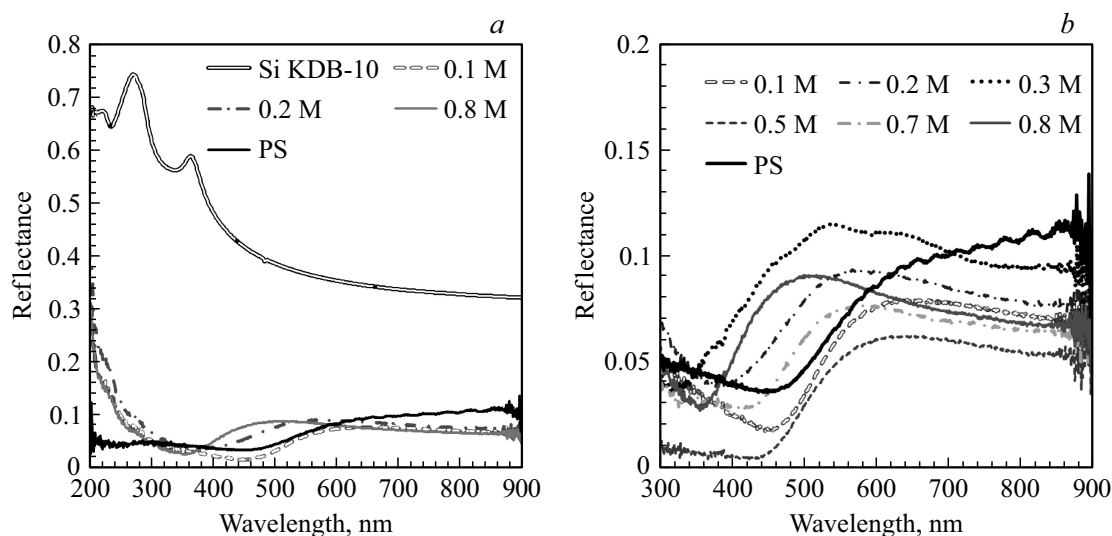
**Рис. 4.** Спектры пропускания (*a*) образцов PS–Fe с концентрацией нитрата железа 0.3, 0.5 и 0.7 М. Спектры отражения (*b*) образцов PS–Fe с молярной концентрацией нитрата железа 0.2, 0.3 и 0.7 М. Спектры записаны после 4 месяцев хранения образцов на воздухе. Спектры произвольно сдвинуты по оси *y* без изменения масштаба для удобства рассмотрения.

после 4 месяцев хранения остались колебательные состояния с волновыми числами  $466\text{--}474\text{ cm}^{-1}$ , которые наблюдались для малых (0.1 М) и больших (0.5, 0.7 М) молярных концентраций нитрата железа как в спектрах пропускания (рис. 4, *a*), так и в спектрах отражения (рис. 4, *b*). Эти пики, как сообщалось ранее [25,26], можно отнести к сформированным колебательным состояниям металл-кислород-кремний. Поэтому обнаруженные пики при  $466\text{--}474\text{ cm}^{-1}$  следует отнести к сформировавшимся связям Fe–O–Si. Они появляются за счет разрушения части связей Si–H<sub>*n*</sub> (*n* = 1 и *n* = 2).

С точки зрения влияния молярной концентрации нитрата железа на спектры поглощения и отражения в дальней ИК области необходимо отметить концентрацию 0.3 М (рис. 4), при которой практически не просматриваются пики при  $466\text{--}474\text{ cm}^{-1}$  и сильно ослаблена интенсивность пика при  $2160\text{ cm}^{-1}$  (не приведен на рис. 4). Этому соответствует минимум в спектре PL (рис. 2, *b*) и минимальное значение положения пика PL (рис. 3, *b*), т. е. „голубой“ сдвиг. Известно, что „голубой“ сдвиг соответствует уменьшению части NC в матрице PS [19] из-за интенсификации процесса дополнительного окисления кремния при длительном хранении и увеличению эффективной ширины запрещенной зоны PS за счет реализации квантово-размерного эффекта [1]. Поскольку остальная часть образцов, обработанная в растворах нитрата железа с меньшими (0.2 М) или большими (0.6 М) молярными концентрациями Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, характеризуется преимущественным „красным“ сдвигом положения пика PL, то обработка в растворах со средними молярными концентрациями Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (0.3–0.5 М) приводит к преимущественному разрушению связей Si–H<sub>*n*</sub>, но не обеспечивает создание устойчивых связей

Fe–O–Si. Это приводит при длительном хранении к усилению окисления слоя PS и уменьшению размера кристаллитов PS.

С этих позиций рассмотрим спектры отражения (рис. 5, *a, b*) в области видимого и ультрафиолетового света для серии образцов PS–Fe после длительного хранения в течение 4 месяцев на воздухе. На рис. 5, *a* видно, что образцы PS до и после обработки в нитрате железа сильно теряют в величине коэффициента отражения по сравнению с монокристаллическим кремнием, что связано с потерей большей части материала при анодном окислении, а значит, и плотности состояний, которые отвечают за коэффициент преломления. Увеличение отражения в области менее 300 нм связано с особенностями регистрации спектров отражения в интегрирующей сфере, когда на образец поступает монохроматический свет, а регистрируется весь отраженный сигнал, включая возможный от возбуждения PL при 550–950 нм. В области энергий фотонов менее 400 нм такое возбуждение обязательно возникает, поэтому некорректно приписывать увеличение отражения в этой области внутренним особенностям образцов PS до и после обработки в нитрате железа, как это было сделано в работе [27] для PS, обработанного в растворе LiBr. Это также подтверждается при сопоставлении со спектрами PL этих образцов после 4 месяцев хранения (рис. 3, *a*). Максимальным отражением с области ниже 300 нм (рис. 5, *a*) обладает образец с концентрацией 0.2 М, что соответствует максимуму для этого образца в спектре PL (рис. 3, *a*). Необходимо также обратить внимание на появление интерференционных пиков в спектре отражения от необработанного PS при длинах волн от 550 до 900 нм (рис. 5, *b*), что свидетельствует о сохранении однородности слоя PS на глубину в несколько микрон.



**Рис. 5.** Спектры отражения серии образцов PS после выдержки 5 min в растворах нитрата железа с различными молярными концентрациями (0.1–0.8 М) и длительного хранения на воздухе в течение 4 месяцев: (а) спектры отражения образцов PS и монокристаллического Si; (б) спектры отражения образцов PS в увеличенном масштабе по оси  $y$ .

Подобные интерференционные особенности отсутствуют у всех обработанных нитратом железа образцов PS, что позволяет предположить нарушение однородности слоя PS за счет неравномерности адсорбции железа на поверхности PS после обработки в растворах нитрата железа. На рис. 5, *b* представлены спектры отражения образцов PS–Fe с различными концентрациями нитрата железа и необработанного PS после 4 месяцев хранения, но с большим увеличением масштаба по оси  $y$ . Максимальным в диапазоне длин волн 400–700 nm коэффициентом отражения обладает образец с концентрацией 0.3 М с максимальным „голубым“ сдвигом максимума пика PL (рис. 3, *b*). При этом он выше, чем для необработанного PS. Выше, чем у необработанного PS, имеют отражение в части спектра образцы с концентрацией 0.2 и 0.8 М. Но их коэффициент отражения меньше, чем у образца PS–Fe 0.3 М. Такое поведение соответствует росту на поверхности PS разных толщин слоя железа при обработке в нитрате железа в зависимости от его концентрации, а учитывая различный спектральный состав PL, еще и неоднородность слоя адсорбированного железа. Основной гипотезой с учетом опыта адсорбции атомов переходных и щелочных металлов на PS [19,21,22,27,28] является формирование при малых концентрациях нитрата железа (0.1–0.2 М) адсорбированного монослоя железа со связями Si–O–Fe. При увеличении молярной концентрации нитрата железа от 0.3 до 0.5 М происходит формирование долей монослоя железа с уменьшенным количеством связей Si–O–Fe, а также формирование нанометровых кластеров железа, которые непрозрачны для света в видимом диапазоне. Последнее приводит также к существенному снижению интенсивности PL от PS за счет поглощения излучения лазера в нанокластерах железа. Причиной „голубого“ сдвига является неполное покрытие железом NC внутри

слоя PS или на поверхности, их дальнейшее окисление при длительном хранении. Второй гипотезой является предположение, что при достижении концентрации нитрата железа 0.7–0.8 М адсорбция железа протекает более быстро и равномерно, что приводит к образованию сначала большой плотности связей Si–O–Fe, а затем некоторого количества кластеров железа поверх полного монослоя. В этом случае частично снижается интенсивность пиков PL за счет поглощения части лазерного излучения в адсорбированном слое железа, а „красный“ сдвиг пиков PL (рис. 3, *b*) можно объяснить отсутствием дополнительного окисления NC PS, защищенного слоем железа, и уменьшением вклада в спектр PL от NC кремния с меньшими размерами. То есть речь идет об относительном уменьшении доли NC кремния с меньшими размерами за счет снижения темпов их окисления и о росте вклада в спектр PL от кластеров большего размера.

Для построения общей модели старения слоев PS после их обработки в нитрате железа с различными концентрациями требуются данные о распределении атомов железа по толщине обработанного слоя, данные о микроструктуре NC PS и их распределении по размерам, а также данные об изменениях в спектрах комбинационного рассеяния света в этих образцах при различных сроках хранения.

## Выводы

Исследование кинетики изменения спектров PL после обработки слоев PS в водных растворах нитрата железа ( $Fe(NO_3)_3$ ) показали, что кратковременное хранение (5 дней) образцов обработанного PS приводит к росту интенсивности PL при малой (0.2 М) молярной концентрации в 7.5 раз и большой (0.7–0.8 М) молярной

концентрации в 3–3.6 раза по сравнению с интенсивностью PL необработанного слоя PS. Наблюдается „красный“ сдвиг пика PL после обработки в нитрате железа независимо от его концентрации по сравнению с необработанным слоем PS (эталоном). После длительного (в течение 4 месяцев) хранения наблюдается рост сигнала PL с сохранением вида зависимости интенсивности пика PL от концентрации нитрата железа. Обнаружен диапазон молярной концентрации нитрата железа, при котором наблюдается снижение интенсивности PL по сравнению с необработанным слоем PS, а также „голубой“ сдвиг в положении пика PL, что объясняется неполным закрытием поверхности PS адсорбированным слоем железа, окислением вглубь NC PS и уменьшением их размеров, приводящих к росту эффективной ширины запрещенной зоны PS после такой обработки и длительного хранения. При молярных концентрациях нитрата железа 0.2 и 0.7–0.8 М наблюдается „красный“ сдвиг положения пика в спектре PL и рост интенсивности PL в 8–18 раз по сравнению с интенсивностью PL необработанного PS при том же сроке хранения. Это подтверждает снижение окисления кристаллитов кремния в слое PS после обработки, что, следовательно, обеспечивает защиту при длительном хранении. Для построения более точной модели картины „старения“ образцов PS после обработки в водных растворах нитрата железа требуется привлечение методов исследования структуры PS и распределения в нем встроенных ионов железа по глубине.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного бюджета по теме ИАПУ ДВО РАН в 2018 году (№ 0262-2018-0019).

## Список литературы

- [1] *Canham L.T., Houlton M.R., Leong W.Y., Pickering C., Keen J.M.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. N 1. P. 422.
- [2] *Koyama H., Nakagawa T., Ozaki T., Koshida N.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. N 13. P. 1656.
- [3] *Lin C.H., Lee S.C., Chen Y.F.J.* // Appl. Phys. 1994. V. 75. N 12. P. 7728.
- [4] *Songyan C., Kashkarov P.K., Timoshenko V.Y., Baolin L., Bingxi J.* // J. Cryst. Growth. 2003. V. 247. N 3–4. P. 445.
- [5] *Бондаренко В.П., Яковцева В.А., Долгий Л.Н., Ворозов Н.Н., Казючиц Н.М., Цыбесков Л., Фуше Ф.* // Письма в ЖТФ. 1999. № 17. С. 69.
- [6] *Беляков Л.В., Горячев Д.Н., Сресели О.М.* // ФТП. 2000. № 11. С. 1386.
- [7] *Примаченко В.Е., Кононец Я.Ф., Булах Б.М., Венгер Е.Ф., Каганович Э.Б., Кизяк И.М., Кириллова С.И., Манойлов Э.Г., Цыркунов Ю.А.* // ФТП. 2005. № 5. С. 595.
- [8] *Викулов В.А., Маслов А.М., Димитриев А.А., Коробцов В.В.* // Опт. и спектр. 2010. Т. 108. № 1. С. 75.
- [9] *Ян Д.Т.* // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 7. С. 21.
- [10] *Ян Д.Т., Галкин Н.Г.* // Опт. и спектр. 2015. Т. 119. № 5. С. 741–744.
- [11] *Ян Д.Т., Галкин Н.Г.* // Опт. и спектр. 2017. Т. 122. № 6. С. 960–968.
- [12] *Koyama H., Nakagawa T., Ozaki T., Koshida N.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. N 13. P. 1656.
- [13] *Zhao Y., Li D., Sang W., Yang D.* // Sol. State Electron. 2006. V. 50. N 9–10. P. 1529.
- [14] *Kim D.A., Im S.I., Whang C.M., Cho W.S., Yoo Y.C., Cho N.H., Kim J.G., Kwon Y.J.* // Appl. Surf. Sci. 2004. V. 230. N 1–4. P. 125.
- [15] *Wadayama T., Arigane T., Hatta A.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. N 18. P. 2570.
- [16] *Elhouichet H., Oueslati M., Bessais B., Ezzaouia H.* // J. Luminesc. 1997. V. 71. N 1. P. 77.
- [17] *Choi S.H., Chung H. Shin G.S.* // Solid State Commun. 1995. V. 95. N 6. P. 341.
- [18] *Tischler M.A., Collins R.T., Stathis J.H., Tsang J.C.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. N 5. P. 639.
- [19] *Li X.J., De Zhu I., Chen Q.W., Zhang Y.H.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. N 3. P. 389.
- [20] *Каукаров В.М., Леньшин А.С., Аганов Б.Л., Турищев С.Ю., Домашевская Э.П.* // Письма в ЖТФ. 2009. № 17. С. 89.
- [21] *Zhu D., Chen Q., Zhang Y.* // Appl. Surf. Sci. 2002. V. 191. N 1–4. P. 218.
- [22] *Lee D.Y., Park J.W., Leem J.Y., Kim J.S., Kang S.K., Son J.C., Kang H.B., Mun Y.H., Lee D.K., Kim D.H., Bae I.H.* // J. Crystal Growth. 2004. V. 260. N 3–4. P. 394.
- [23] *Bisi O., Ossicini S., Pavesi L.* // Surf. Sci. Rep. 2000. V. 38. N 1–3. P. 1.
- [24] *Garbanyuk T.I., Evtukh A.A., Litovchenko V.G., Solnsev V.S., Pakhlov E.M.* // Thin Solid Films. 2006. V. 495. N 1–2. P. 134.
- [25] *Parler C.M., Ritter J.A., Amiridis M.D.* // J. Non-Cryst. Solids. 2001. V. 279. N 1. P. 119.
- [26] *Hamadache F., Renaux C., Duvail J.-L., Bertrand P.* // Phys. Status Solidi (a). 2003. V. 197. N 1. P. 168.
- [27] *Rahmani M., Moadhen A., Zaibi M.-A., Elhouichet H., Oueslati M.* // J. Luminesc. 2008. V. 128. N 11. P. 1763.
- [28] *Haddadi I., Amor S.B., Bousbih R., Whibi S.E., Bardaoui A., Dimassi W., Ezzaouia H.* // J. Luminesc. 2016. V. 173. P. 257.