

## Спектры фотолюминесценции и фотовозбуждения пористого кремния, подвергнутого анодному окислению и травлению

© В.В. Филиппов, В.П. Бондаренко\*, П.П. Першукевич

Институт физики Академии наук Белоруссии,  
220072 Минск, Белоруссия

\*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
220027 Минск, Белоруссия

(Получена 18 января 1996 г. Принята к печати 18 марта 1997 г.)

Исследованы спектры фотолюминесценции и фотовозбуждения пленок пористого кремния исходной пористости 50–60%, приготовленных на монокристаллах кремния *p*-типа проводимости и подвергнутых анодному окислению и химическому травлению. Установлено, что присутствующая в травленном пористом кремнии аморфная фаза не проявляется в спектрах фотовозбуждения, но оказывает влияние на спектр фотолюминесценции пористого кремния. Показано, что особенности спектров фотовозбуждения до и после травления, а также эволюция спектров фотолюминесценции и фотовозбуждения после травления могут быть интерпретированы в рамках модели равномерного квантования, в которой учитываются упругие напряжения в кремниевых кристаллах пористого кремния.

### Введение

Механизм видимой фотолюминесценции (ФЛ) пористого кремния (ПК) продолжает оставаться предметом интенсивного обсуждения. Во многих случаях эффект размерного квантования, предложенный впервые Кэнхемом [1], вполне описывает наблюдаемые закономерности люминесценции пленок ПК, содержащих кристаллиты (кремниевые остовы) нанометрового размера. Несомненно также, что существенное влияние на эмиссию света из ПК оказывает его развитая поверхность с разорванными связями кремния, на которой образуются химические соединения. Поэтому характер пассивации поверхности ПК, роль кремний-водородных соединений на поверхности кристаллитов, в том числе и полисиланов, продолжает широко обсуждаться в литературе [2–6].

В настоящей работе исследовалась эволюция спектров ФЛ и фотовозбуждения (ФВ) в процессе окисления образцов ПК на воздухе при комнатной температуре после их травления в сильно разбавленной фтористоводородной кислоте. Аналогичные исследования только спектра ФЛ осуществлялись в работе [6], в которой использовались свежеприготовленные образцы ПК со значительной концентрацией соединений Si-H<sub>x</sub> ( $x = 1, 2, 3$ ) на поверхности кремниевых кристаллитов. Эти соединения в процессе окисления замещались связями Si-O, что и определяло в [6] неоднозначность изменения спектра ФЛ (исчезновение групп SiH и SiH<sub>2</sub> и появление SiO<sub>2</sub>). Для того чтобы исключить эту неоднозначность в настоящей работе, образцы ПК были подвергнуты анодному электрохимическому окислению. Затем анодный оксид стравливался в водном растворе HF, что, согласно нашим результатам и данным работ [7–9], не сопровождается появлением на поверхности ПК кремний-водородных связей. Таким образом, единственным фактором, определяющим эволюцию спектров ФЛ и ФВ в настоящей работе, являлся процесс образования оксида на поверх-

ности кремниевых кристаллитов. Как будет показано далее, результаты наших экспериментов говорят в пользу квантово-размерного механизма люминесценции в ПК. Оксид кремния хорошо пассивирует поверхность кристаллитов, приводя к усилению эмиссионной эффективности материала. В свежеприготовленных образцах эту роль выполняют кремний-водородные образования. Однако такой ПК не отличается стабильностью ФЛ. В отличие от него пленки анодноокисленного ПК имеют высокую прозрачность в видимом диапазоне спектра и стабильные люминесцентные характеристики, которые восстанавливаются после многократных травлений в водном растворе HF. Кроме того, оксидная оболочка кремниевых кристаллитов приводит к возникновению механических напряжений, следствием которых является частичная поляризация излучения ПК [10].

### 1. Методика проведения экспериментов

Пленки ПК толщиной 5 мкм были приготовлены методом электрохимического анодирования на монокристаллах кремния, легированных бором, с удельным сопротивлением 10 Ом·см и ориентированных в плоскости (111). Плотность анодного тока при электрохимической обработке в 36% HF составляла 10, 20 и 40 мА/см<sup>2</sup>, соответственно, для образцов 1, 2 и 3. Первоначальная пористость образцов 1, 2 и 3 составляла 50, 55 и 60%. Затем эти образцы ПК подвергались анодному электрохимическому окислению в растворе NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-этиленгликоль в гальваностатическом режиме при плотности тока 10 мА/см<sup>2</sup>. Первоначальное напряжение лежало в диапазоне 6–7 В, окончательное напряжение формовки составляло 30 В для всех образцов.

Измерения спектров ФЛ и ФВ производились на автоматизированном спектрофлуориметре СДЛ-2, созданном на базе дифракционных монохроматов возбуждения

(МДР-12) и регистрации (МДР-23). В качестве источника возбуждения использовалась дуговая ксеноновая лампа ДКСШ-120. В случае измерения спектров возбуждения постоянство формы пятна возбуждения обеспечивалось введением после монохроматора возбуждения специальной системы зеркал. Регистрация сигнала осуществлялась с помощью ФЭУ-100, работающего в режиме счета фотонов. Спектральная ширина щели обоих монохроматоров изменялась в пределах 2.4–3.0 нм. Коррекция спектров ФВ и ФЛ по чувствительности выполнялась по общепринятым методикам. Погрешность при измерении спектров люминесценции не превышала  $2 \div 3\%$ . Спектры отражения и пропускания записывались на спектрометре IR-810 "Jasko" со спектральным разрешением  $2 \text{ см}^{-1}$ .

## 2. Результаты и обсуждение

2.1 *Спектры отражения и поглощения.* На рис. 1 представлены спектры отражения для образцов ПК, полученные при плотности анодного тока  $20 \text{ мА/см}^2$ . В видимом диапазоне спектры отражения характеризуются хорошо выраженной интерференционной картиной, которая исчезает вблизи границы с УФ областью спектра. Как видно из рис. 1, длина волны исчезновения  $\lambda_i$  интерференционной картины составляла 423 нм для образца ПК перед анодным окислением. После анодного окисления этого образца  $\lambda_i$  уменьшилась до 372 нм. Интерференционная картина наблюдалась для всех исследованных образцов ПК, причем длина волны исчезновения

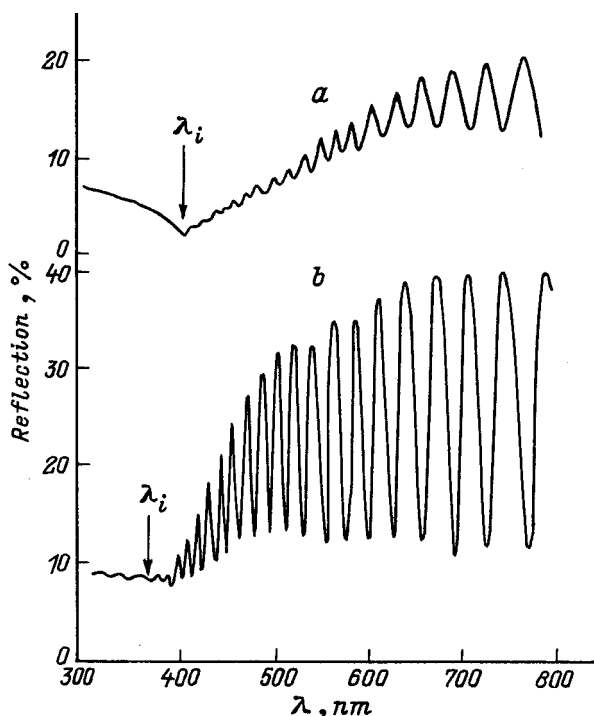


Рис. 1. Спектры отражения образца 2 до (а) и после (б) анодного окисления.

Плотность тока анодирования  $I$ , длины волн исчезновения интерференционной картины  $\lambda_i$  и максимума спектра ФЛ  $\lambda_m$  исследованных образцов ПК, подвергнутых анодному окислению

№ образца	$I, \text{ мА/см}^2$	$\lambda_i, \text{ нм}$	$\lambda_m, \text{ нм}$
1	10	335	645
2	20	372	680
3	40	383	695

интерференционной картины  $\lambda_i$  зависела от режимов приготовления образцов и характеризовала сдвиг края полосы собственного поглощения пленки ПК. Этот сдвиг может быть вызван только эффектом размерного квантования в кристаллитах (кремниевых остовах) ПК нанометрового размера. Другая возможная причина — значительная доля прозрачной фазы в пленке ПК, связанная с пустотами и оксидом, не может объяснить исчезновение интерференционной картины вблизи УФ области. Более того, оно происходит довольно быстро (по мере уменьшения  $\lambda$ ), что говорит о сильном росте поглощения в пленке. Таким образом, в районе  $\lambda_i$  лежит граница области прозрачности и области сильного поглощения. Считая, что интерференция пропадает, когда интенсивность участвующей в интерференции волны, отраженной от границы пленки с подложкой, уменьшается в  $e$  раз, оценим уровень поглощения, соответствующий  $\lambda_i$  [10]. При этом  $\alpha_{\lambda_i} \cdot h = 1$ , где  $\alpha_{\lambda_i}$  — коэффициент поглощения на длине волны  $\lambda_i$ , а  $h$  — толщина пленки ПК. Для наших пленок толщиной  $h = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  имеем  $\alpha_{\lambda_i} = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ . Значения  $\lambda_i$  всех образцов приведены в таблице. В ней же приведены длины волн максимумов спектров ФЛ. Судя по  $\lambda_i$ , характеризующей эффект сдвига края полосы собственного поглощения, наименьшие размеры кремниевых кристаллитов имеет образец 1. Вывод сделан вне зависимости от положения максимума ФЛ. Однако, как видно из таблицы, имеется корреляция ФЛ с размерами кристаллитов: чем они меньше (образец 1), тем сильнее сдвинут в голубую область максимум спектра ФЛ.

Пленки анодно окисленного ПК подвергались затем травлению в водном растворе фтористоводородной кислоты ( $\text{H}_2\text{O}:\text{HF} = 9:1$ ), промывались в дистиллированной воде, сушились и спустя 10–15 мин после травления снимались их спектры ФЛ и ФВ. Выбор низкоконцентрированного травящего водного раствора фтористоводородной кислоты определяется тем, что он дает ровную и совершенную границу кремния после удаления оксида [11]. Параллельно на идентично обработанных образцах снимались ИК спектры поглощения. Они приведены на рис. 2. Привязка спектров осуществлялась на основании работ [12–15]. Как видно из рис. 2, анодной окисление ПК приводит к сильному увеличению полосы поглощения при  $1100 \text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует о возрастании доли оксида в образцах ПК после анодного

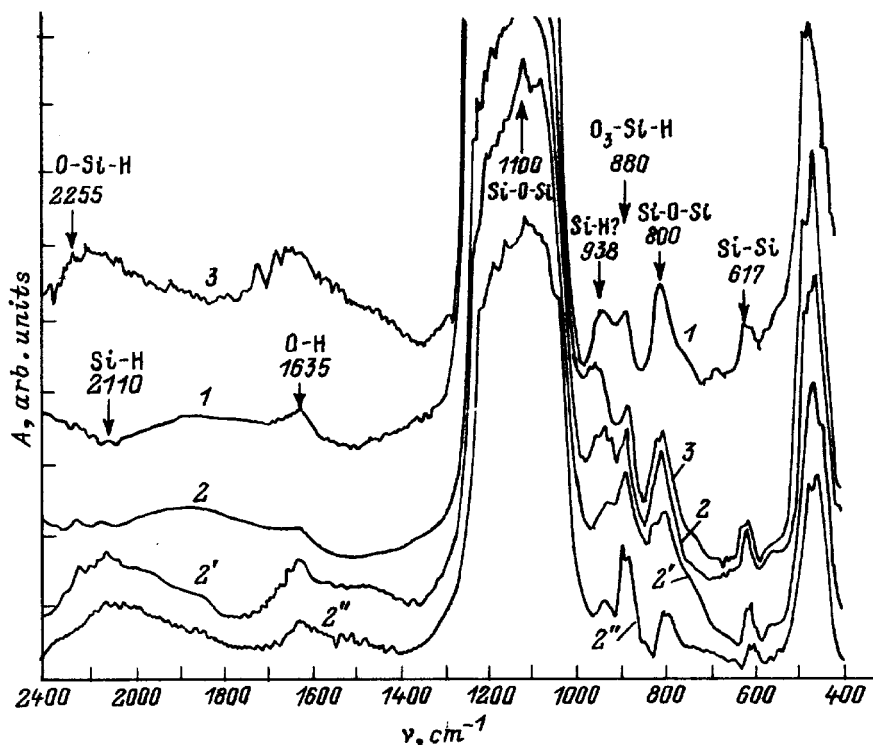


Рис. 2. ИК спектры поглощения образцов 1 (1), 2 (2) и 3 (3) до травления, образца 2(2') после двух травлений в течение 3 мин и образца 2 (2'') до анодного окисления.

окисления. В ИК спектрах анодноокисленных образцов отсутствуют полосы поглощения, характерные для колебаний групп  $\text{SiH}_2$  и  $\text{SiH}_3$ , а также их кластеров [14]. Отметим, что идентификация пика на  $938 \text{ cm}^{-1}$  с колебаниями группы  $\text{Si-H}$  имеется только в работах [14,15] ( $935 \text{ cm}^{-1}$ ) и отсутствует в других исследованиях. После травления слабо выраженные широкие полосы поглощения появились при  $2160$  и  $1635 \text{ cm}^{-1}$ , что может свидетельствовать о наличии кремний-водородных соединений в травленных образцах. Однако, принимая во внимание, что поглощение при  $2160$  и  $1535 \text{ cm}^{-1}$  очень слабое, мы исключали соединения типа  $\text{SiH}_x$  из дальнейшего рассмотрения как возможную причину наблюдаемых изменений ФЛ пленок ПК [4,6,16].

2.2. Спектры ФЛ. В зависимости от исходной пористости пленки ПК имели разную долю оксида. Этим объясняется разное время травления, которое требовалось для появления заметных изменений в характеристиках люминесценции. После травления в течение 20 с образцов 1 и 2, имеющих наименьшие размеры кремниевого остова и наибольшую долю оксида, их спектры ФЛ практически не изменялись. В то же время заметные изменения наблюдались для образца 3. Его спектр сузился и оказался смещенным в коротковолновую часть спектра (рис. 3). Это смещение продолжалось еще в течение 19 ч после травления, хотя ширина спектра начала расти уже через 1 ч после травления. Затем спектр ФЛ стал уширяться и возвращаться назад в красную

область спектра, однако при измерениях через 14 суток первоначального положения не достиг и отстоял от него на 18 нм.

При времени травления 3 мин в коротковолновую область сместился спектр ФЛ образца 2. Дальнейшая его эволюция была полностью аналогична эволюции спектра ФЛ образца 3.

Голубой сдвиг спектра ФЛ образца 1 появился только после восьмикратного трехминутного травления с последующей промывкой в воде, сушкой и контрольными из-

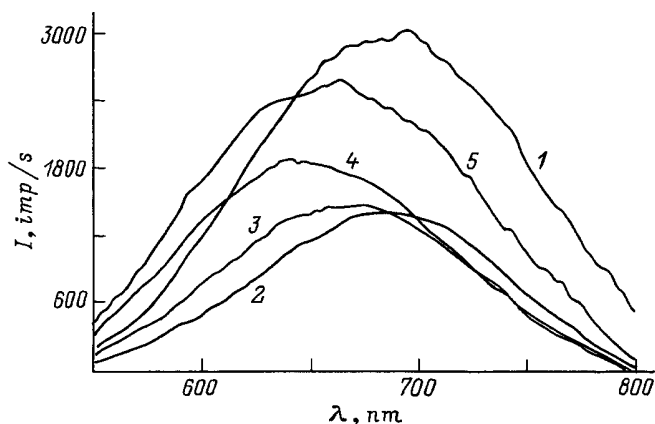
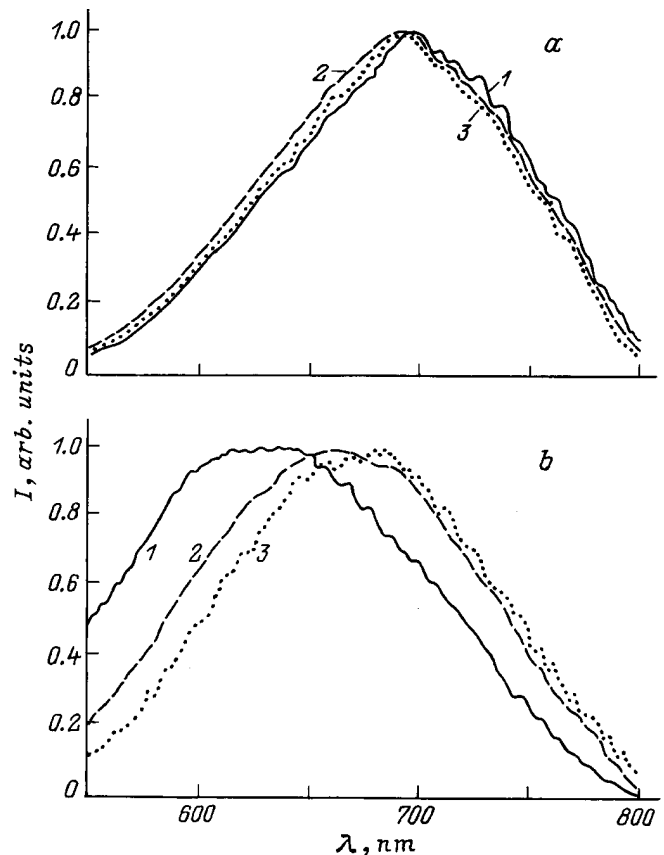


Рис. 3. Эволюция спектров ФЛ образца 2 после травления при окислении на воздухе в течение следующего времени, ч: 2 — 0,3, 3 — 1,3, 4 — 19, 5 — 336. 1 — исходный спектр до травления.

мерениями. Эволюция спектра ФЛ образца 1 была такой же, что и для образцов 2, 3. Для всех образцов после первоначального сужения спектров ФЛ происходило их уширение, причем в основном за счет длинноволнового крыла. В образце 1 ширина спектра превысила его значение в контрольном образце (на 17 нм), но в результате окисления на воздухе он в течение суток уширился до первоначального значения и возвратился в исходное положение, которое занимал до травления.

Эти особенности эволюции спектров ФЛ вполне понятны, если связывать наблюдаемое излучение ПК с эффектом размерного квантования носителей в кристаллитах кремниевого остова пленок ПК. Действительно, после травливания оксидной оболочки на поверхности кристаллитов в ПК по мере окисления на воздухе происходит уменьшение размеров кристаллитов и, как следствие, голубой сдвиг спектра ФЛ. Очевидно, что травлению подвергается поверхностный слой ПК, толщина которого зависит от времени травления. В образце 3, в котором кристаллиты имеют наибольшие размеры и доля оксида кремния относительно мала (хуже всего выявлена интерференционная картина), он травлится быстрее. Но в образце 1, где доля оксида велика, а размеры кристаллитов наименьшие, после травления по мере естественного окисления происходит их уменьшение до критических размеров, когда состояние поверхности и поверхностные дефекты в силу малого объема кристаллитов делают преобладающим канал безызлучательной рекомбинации. В этом отношении показательно последующее второе травление образцов. Если после первого травления в поверхностной области ПК происходило образование кристаллитов меньших размеров (спектр ФЛ оказывается после травления и окисления на воздухе сдвинутым в голубую область), то последующее травление в силу приведенной выше причины приводило к гашению излучения. При этом спектр ФЛ оказывался сдвинутым не в голубую, а красную область спектра (рис. 3, спектр 5). Уширение спектра ФЛ обсудим несколько позже.

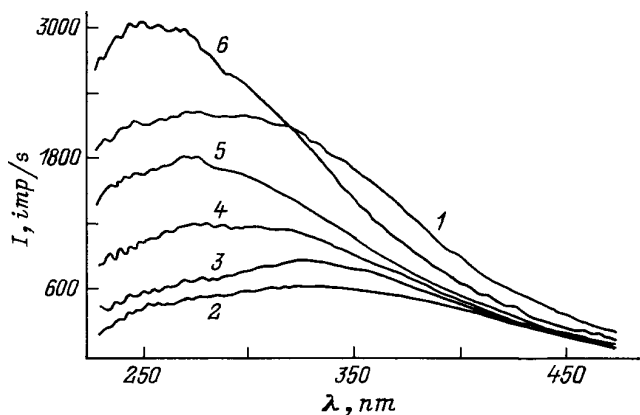
На рис. 4 показаны спектры ФЛ образца 2 при разных длинах волн возбуждения  $\lambda_{\text{ex}}$  до и после травления. Обратим внимание на независимость положения максимума в спектре ФЛ от  $\lambda_{\text{ex}}$  для исходного образца до травления (рис. 4, *a*). Аналогичный характер спектров ФЛ анодированного ПК наблюдался в работе [17]. Совсем иной характер обсуждаемых спектров ФЛ имеет место в свежеприготовленных образцах ПК с большим содержанием групп SiH<sub>x</sub> [18,19], а также в случае гидрогенизированного аморфного кремния [20]. В них наблюдается монотонная зависимость максимума спектра ФЛ от энергии возбуждения. Аналогичная зависимость появляется для анодирования ПК после травления (рис. 4, *b*). Такой ПК, как мы видели, не является стабильной системой и относительно быстро в отличие от свежеприготовленных образцов эволюционирует к некоторому равновесному состоянию, близкому к исходному (рис. 3).



**Рис. 4.** Спектры ФЛ образца 2 до травления (*a*) и после травления (*b*) при разных длинах волн возбуждения, нм: 1 — 250, 2 — 350, 3 — 450. Нормировочные множители для спектров *a*: 1 — 0,7, 2 — 1,0, 3 — 6,0; *b*: 1 — 1,5, 2 — 1,0, 3 — 4,0.

Однако полуширина спектров ФЛ нетравленных образцов зависит от  $\lambda_{\text{ex}}$ . Эта зависимость обязана изменению только коротковолнового крыла спектра ФЛ, тогда как длинноволновое крыло практически совпадает при всех  $\lambda_{\text{ex}}$ . Отсутствие в разных образцах определенной зависимости полуширины спектров ФЛ от  $\lambda_{\text{ex}}$  указывает на различие распределения высокоэнергетической части фотовозбуждения носителей. Таким образом, спектры рис. 4, *a* говорят о высокой однородности процессов возбуждения и излучения в образцах ПК, подвергнутых анодной обработке.

**2.3. Спектры ФВ.** Эволюция спектров ФВ, представленная на рис. 5, как и эволюция спектров ФЛ, отражает стремление к установлению в процессе окисления стабильного состояния, близкого к исходному до травления и зависящего от размера кремниевых кристаллитов. Спектры ФВ для разных длин волн наблюдения приведены на рис. 6. Все они имеют пологий экстремум в районе 275–280 нм. Он коррелирует с положением одного из двух коротковолновых максимумов мнимой части псевдодиелектрической функции  $\epsilon_2$  монокристаллического кремния (293 нм [21]), сдвинутого в коротковолновую

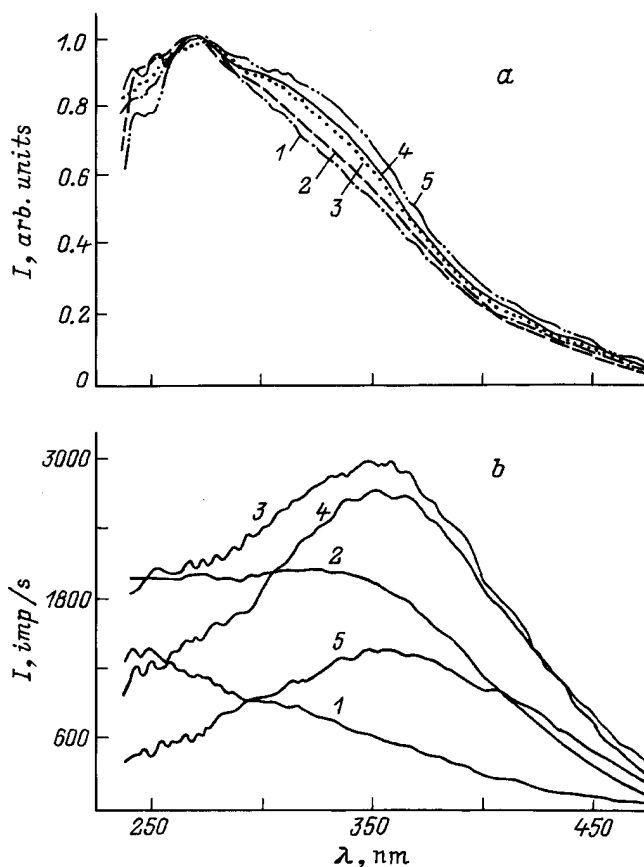


**Рис. 5.** Эволюция спектров ФВ образца 2 после травления при окислении на воздухе в течение следующего времени, ч: 2 — 0.13, 3 — 1.5, 4 — 47, 5 — 144, 6 — 336. 1 — исходный спектр до травления.

часть спектра в результате эффекта размерного квантования. Измерения авторов работы [22] подтверждают наличие единственного максимума функции  $\varepsilon_2$  ПК вблизи его положения, соответствующего прямым межзонным переходам  $E_2$  в монокристалле кремния. Таким образом, не аморфный, а монокристаллический кремний определяет особенности функции  $\varepsilon_2$  и спектра поглощения ПК. Этот вывод справедлив и для спектров ФВ анодированного ПК, приведенных на рис. 6. Имеются основанные на первых принципах теоретические расчеты спектра поглощения и псевдиэлектрической функции  $\varepsilon_2$  при наличии эффекта размерного квантования [23,24]. В первой из этих работ рассматривались квантовые нити кремния, во второй учитывалась пассивация поверхности нитей водородом. Сложный многопиковый спектр, полученный в [23], пока трудно сравнивать с имеющимися экспериментальными результатами. В то же время из расчетов работы [24] следует, что в случае квантовых нитей с поперечником 0.76–1.14 нм функция  $\varepsilon_2$  имеет ярко выраженный максимум в районе 340–366 нм, слабо зависящий от поперечных размеров нитей. В монокристаллическом кремнии он соответствует прямозонному переходу  $\Gamma_{15}-\Gamma'_{25}$  (366 нм). Однако ни спектры поглощения ПК [22], ни спектры ФВ, приведенные на рис. 6, не обнаруживают этого пика, обусловленного кристаллической структурой квантовой нити.

Совершенно иная ситуация возникает после травления (рис. 6, b). Если спектры ФВ для коротковолнового крыла спектра ФЛ существенно не изменяются, то спектры ФВ для длинноволнового его крыла имеют после травления хорошо выраженный максимум именно в той области, где, согласно расчетам [24], должен лежать максимум функции  $\varepsilon_2$ . Почему этот максимум отсутствует в спектре ФВ на коротких длинах волн спектра ФЛ, где казалось бы, эффект размерного квантования должен проявляться более ярко? На наш взгляд, причина заключается в упругих напряжениях, которым подвер-

жен кремниевый остов, покрытый оксидной оболочкой. Они изменяют симметрию кристаллической решетки (согласно [25], постоянная решетки ПК увеличивается в направлении нормали к границе пленки), что должно кардинальным образом сказываться на характеристиках процесса ФЛ. Этим, в частности, можно объяснить отсутствие обсуждаемого максимума в спектрах ФВ исходных анодированных образцов. После травления оксида напряжения в кремниевом остове (или кристаллитах) значительно снижаются, т.е. к нему могут быть применимы результаты расчетов [22]. Однако это не касается кристаллитов малого размера, для которых из-за малости отношения объема к поверхности влияние поверхностных напряжений остается существенным. Поэтому для коротковолновой части спектра ФЛ, которая при квантово-размерном механизме ее интерпретации обусловлена кристаллитами малого размера, влияние структурных особенностей в спектрах ФВ монокристаллического кремния оказывается затухающим. Добавим также, что с напряжениями мы связываем частичную поляризацию излучения ПК [10], которая как раз выше в коротковолновой части спектра ФЛ и монотонно падает с увеличением длины волны излучения [10,26]. Если одним аргументом в пользу такой интерпретации является



**Рис. 6.** Спектры ФВ образца 2 до травления (a) и после травления (b) для разных длин волн ФЛ, нм: 1 — 550, 2 — 600, 3 — 650, 4 — 700, 5 — 750. Нормировочные множители для спектров a: 1 — 10, 2 — 2.5, 3 — 1.25, 4 — 1.0, 5 — 1.5.

падение степени поляризации после травления, а затем возвращение ее к значению, близкому к тому, которое было до травления.

Причиной появления экстремума в спектрах ФВ травленного ПК может являться аморфная фаза кремния. Известно, что обработанные в плавиковой кислоте поверхности монокристаллического кремния имеют поверхностный слой сильно разориентированных атомов кремния, образующих неупорядоченную аморфизованную фазу [27,28]. В слое ПК, обработанном в HF, доля этой фазы будет не малой. Ее роль в механизме люминесценции ПК обсуждалась в [29,30]. В некоторых работах непосредственно с аморфной фазой связывается ФЛ пленок ПК [31,32]. Для нас здесь важно то, что спектры мнимой части псевдодиэлектрической функции аморфного кремния имеют максимум при  $\lambda_{ex} = 355$  нм [33]. Очевидно, что если фотовозбуждение ПК идет через аморфную фазу, то размеры кристаллитов не существенны. Поэтому этот максимум, если он обязан аморфной фазе, должен присутствовать в спектрах ФЛ для всех длин волн ФЛ, чего, однако, не наблюдается. Этот и приведенные выше аргументы позволяют заключить, что аморфная фаза кремния не существенна в процессах фотовозбуждения ПК. Тем не менее поверхностные состояния и состояния в хвостах зон аморфного кремния имеют значение в процессах ФЛ пленок ПК. Именно ими обусловлено наблюдаемое уширение длинноволнового крыла спектра ФЛ после травления, о чем говорилось в разд. 2.2. Более существенна их роль как центров безызлучательной релаксации фотовозбужденных носителей. Действительно, после травления оксидной оболочки интенсивность ФЛ падает, иногда значительно (см. рис. 3). Затем, по мере ее образования и при постепенном окислении неупорядоченных поверхностных слоев кристаллитов, интенсивность ФЛ частично, а после второго и последующих травлений обычно полностью, восстанавливается.

## Заключение

Исследованы спектры ФЛ и ФВ пленок анодированного ПК до и после травления в водном растворе HF, а также их эволюция. Отсутствие кремний-водородных соединений на поверхности кремниевых кристаллитов в пленке анодированного ПК позволило исключить влияние полигидридов из возможных механизмов ФЛ ПК. Поэтому особенности спектров ФЛ и ФВ и их временная эволюция после травления целиком обусловлены оксидной оболочкой кремниевых кристаллитов и ее изменениями. Все наблюдаемые особенности указанных спектров и их эволюция не могут быть полностью интерпретированы в рамках модели размерного квантования, в частности отсутствие в спектрах ФВ максимума, связанного с пиком мнимой части псевдодиэлектрической функции ПК, предсказываемого теорией [24], и его появление после травления для длинноволнового крыла спектра

ФЛ. Учет в рамках этой модели упругих напряжений позволяет объяснить такой характер спектров ФВ, а также обнаруженную ранее степень поляризации ФЛ ПК и ее изменение при травлении. Различный характер квантово-размерных структур, рассматриваемых в [22] (квантовые нити с пассивацией поверхности водородом) и в нашей работе, исключает более строгие количественные сопоставления, такие как сечение нитей и кристаллитов в ПК и т.п. Однако это различие не затрагивает вывода общего характера о проявлении в спектрах ФВ ПК особенностей структурно связанных с поглощением в кристаллическом кремнии остова ПК. Аморфная фаза кремния, представляющая собой поверхностные слои кристаллитов с разориентированными атомами кремния, которая возникает в результате травления, не существенна в процессах ФВ. Однако ее влияние сказывается на ФЛ ПК, что проявляется прежде всего в падении интенсивности ФЛ и уширении длинноволнового крыла спектра ФЛ.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность В.А. Яковцевой и А.В. Бондаренко за помощь в подготовке работы к публикации

## Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [2] R. Kumar, Y. Kitochi, K. Hara. Appl. Phys. Lett., **63**, 3032 (1993).
- [3] J.M. Lavine, S. Sawan, Y.T. Shieh, A.J. Balezza. Appl. Phys. Lett., **62**, 1099 (1993).
- [4] K.H. Jung, S. Shin, D.L. Kwong, C.C. Cho, B.E. Gnade. Appl. Phys. Lett., **61**, 2467 (1992).
- [5] S.M. Prokes, W.E. Carlos, P.M. Bermudez. Appl. Phys. Lett., **61**, 1447 (1992).
- [6] Y.M. Weng, Zn.M. Fan, X.F. Zong. Appl. Phys. Lett., **63**, 168 (1993).
- [7] S. Shih, K.H. Jung, D.L. Kwong, M. Kovar, J.M. White. Appl. Phys. Lett., **62**, 1904 (1993).
- [8] J. Vial, F. Bsiesy, F. Gaspard, R. Herino, M. Ligeon, F. Muller, R. Romestain, R. Macfarlane. Phys. Rev. B, **45**, 14171 (1992).
- [9] M.B. Robinson, A.C. Dillon, S.M. George. Appl. Phys. Lett., **62**, 1493 (1993).
- [10] V.V. Filippov, P.P. Pershukevich, V.P. Bondarenko, A.M. Dorofeev. Phys. St. Sol. (b), **184**, 573 (1994).
- [11] Y.G. Chabal, G.S. Higashi, N. Raghavachari, V.A. Burrows. J. Vac. Sci. Techn. A, **7**, 2104 (1989).
- [12] W.B. Pollard, G. Lucowski. Phys. Rev. B, **26**, 3172 (1982).
- [13] M.H. Borsdski, M. Cardona, J.J. Cuomo. Phys. Rev. B, **26**, 3356 (1977).
- [14] Y. Ogata, H. Niki, T. Sakka, M. Iwasaki. J. Electrochem. Soc., **42**, 195 (1995).
- [15] M.S. Brandt, H.D. Fuchs, M. Stutzmann, J. Weber, M. Cardona. Sol. St. Commun., **81**, 307 (1992).
- [16] A. Nakajima, T. Itakura, S. Watanabe, N. Nakayama. Appl. Phys. Lett., **61**, 46 (1992).
- [17] T. Motohiro, T. Kachi, F. Miura, Y. Takeda, S. Hyodo, S. Noda. Jpn. J. Appl. Phys., **31**, L207 (1992).
- [18] N. Ookubo. J. Appl. Phys., **74**, 6375 (1993).

- [19] Y.H. Xie, W.L. Wilson, F.M. Ross, J.A. Mucha, E.A. Fitzgerald. *J. Appl. Phys.*, **71**, 2403 (1992).
- [20] J. Shah, A. Pinczuk, F.B. Alexander, B.G. Bagley. *Sol. St. Commun.*, **42**, 717 (1982).
- [21] D.E. Aspnes, A.A. Studnia. *Phys. Rev. B*, **27**, 985 (1983).
- [22] N. Koshida, H. Koyama, Y. Yamamoto, G.J. Collins. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 2655 (1993).
- [23] G.D. Sanders, Y.C. Chang. *Phys. Rev. B*, **45**, 9202 (1992).
- [24] F. Buda, J. Kohanoff, M. Parrinello. *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 1272 (1992).
- [25] Л.П. Авакянц, В.М. Авдохина, Г.Б. Демидович и др. *Поверхность*, вып. 5, 94 (1989).
- [26] А.Н. Старухин, А.А. Лебедев, Б.С. Разбирин, Л.М. Капитонова. *Письма ЖТФ*, **18**, 160 (1992).
- [27] G. Renand, P. Fuoss, A. Ourmazd, J. Bevk, B. Freer, P. Hahn. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1272 (1991).
- [28] T. Konishi, K. Uesugi, K. Takoka, S. Kawano, M. Yoshimuta, T. Yao. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, 3131 (1993).
- [29] N. Noduchi, I. Suemune, M. Yamanishi. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, L490 (1992).
- [30] F. Koch. *Microelectronic Engineering*, **28**, 237 (1995).
- [31] T. George, M.S. Anderson, W.T. Pike, T.L. Lin, R.W. Fathauer, K. Jung, D.L. Kwong. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2354 (1992).
- [32] J.P. Perez, J.V. Malobes, P. McNeill, J. Prosad, R. Cheek, J. Kelber, J.P. Estrera, P.D. Stevens, R. Glosser. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 563 (1992).
- [33] D.T. Pierce, W.E. Spicer. *Phys. Rev. B*, **5**, 3017 (1972).

*Редактор В.В. Чалдышев*

## **Spectra of photoluminescence and photoexcitation of porous silicon subjected to anodic oxidation and etching**

V.V. Filippov, V.P. Bondarenko\*, P.P. Pershukevich

Institute of Physics,  
Belorussian Academy of Sciences,  
220072 Minsk, Republic Belarus  
\*Belorussian State University  
of Informatics and Radioelectronics,  
220027 Minsk, Republic Belarus

**Abstract** Photoluminescence (PL) and photoexcitation (PE) spectra of porous silicon (PS) films, which had the initial porosity 50–60% and were formed on *p*-type substrates and subjected to anodic oxidation and chemical etching, are investigated. It is found that the amorphous phase of etched PS does not manifest itself on PE spectra but influences PL spectra of PS. Features of PE spectra before and after etching and PL as well as PE spectra time evolution can be interpreted within a framework of the model of quantum confinement, in which mechanical stresses of silicon crystallites of PS are taken into account.

Fax: 0172-39 31 31 (Filippov)

E-mail: ifanbel%bas03.basnet.minsk.by@demos.su (Filippov)