

ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СТИМУЛИРОВАННЫЕ В НАНОПОРИСТОМ КРЕМНИИ МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Ю. А. Быковский^a, В. А. Караванский^{b*}, Г. Е. Котковский^a, М. Б. Кузнецов^a,
А. А. Чистяков^a, А. А. Ломов^c, С. А. Гаврилов^d

^a Московский государственный инженерно-физический институт (Технический университет)
115409, Москва, Россия

^b Институт общей физики Российской академии наук
117924, Москва, Россия

^c Институт кристаллографии им. Шубникова Российской академии наук
177333, Москва, Россия

^d Московский институт электронной техники
111250, Москва, Россия

Поступила в редакцию 15 июля 1999 г.

В работе исследованы фотопроцессы, инициированные на поверхности пористого кремния при его возбуждении лазерным излучением с различными длинами волн ($\lambda=266, 337, 532$ нм) в широком диапазоне интенсивностей (до $2 \cdot 10^7$ Вт/см²). В качестве методики эксперимента были выбраны лазерно-индуцированная люминесценция, лазерная масс-спектрометрия. Для определения параметров пленок пористого кремния использовалась методика рентгеновского отражения. Проведен анализ спектров фотолюминесценции, полученных на различных длинах волн при малых интенсивностях, который показал, что для оптически тонкого слоя пористого кремния спектр люминесценции не зависит от длины волны возбуждающего излучения, что указывает на существование выделенной системы уровней в пористом кремнии, отвечающих за люминесценцию. Исследуется поведение спектров фотолюминесценции в зависимости от интенсивности возбуждающего излучения q ; оно показало, что интенсивность люминесценции имеет нелинейную зависимость от q . При высоких интенсивностях возбуждающего излучения интенсивность люминесценции испытывает насыщение и наблюдается коротковолновый сдвиг спектров, что связано с высокими концентрациями фотовозбужденных носителей. Это приводит к увеличению вероятности наблюдаемой экспериментально неравновесной фотодесорбции H₂ и Si с поверхности пористого кремния.

PACS: 78.55.Nx, 79.20.Ds, 81.15.Ch, 78.66.-w

1. ВВЕДЕНИЕ

Устойчивый интерес к фотофизическим свойствам нанопористого кремния обусловлен прежде всего тем, что этот материал рассматривается как перспективный для создания оптоэлектронных приборов нового поколения [1]. Одним из уникальных фотофизических свойств нанопористого кремния является его фотолюминесценция, обнаруженная Кэнхэмом в 1990 г. [2] (объемный кремний — непрямозонный полупроводник, и излучательные переходы в нем сильно подавлены). Однако, несмотря на множество работ, посвященных этой проблеме, при-

чина и физические механизмы фотолюминесценции пористого кремния до конца еще не ясны [3].

Как известно [3–6], пористый кремний представляет собой совокупность нанокристаллов с характерным расстоянием между ними также порядка нескольких нанометров. Такая структура обладает очень большой удельной поверхностью, достигающей порядка 300 м²/см³. Существующие модели объяснения интенсивной фотолюминесценции в видимом диапазоне от пористого кремния можно свести к двум альтернативным. Первая модель утверждает, что излучательными являются переходы между уровнями размерного квантования в кремниевых нанокристаллах [7–9], а поверхность рассмат-

*E-mail: karavan@kapella-1.gpi.ru

ривается как источник безызлучательного канала рекомбинации, когда наличие оборванных связей подавляет люминесценцию. При этом чем меньше характерный размер нанокристаллов, тем более коротковолновой оказывается наблюдаемая люминесценция. Вторая модель основную роль в фотолюминесценции отводит соединениям кремния, образованным в результате анодного травления или локализованным состояниям на поверхности нанокристаллов (поверхностные комплексы Si-H_x и кислородные вакансии) [10, 11]. Уровни размерного квантования при этом определяют поглощение, но не имеют отношения к люминесценции.

В последнее время появились работы, пытающиеся объединить некоторые характерные черты этих двух моделей для объяснения фотолюминесценции пористого кремния [12, 13]. При таком подходе предполагается, что спектр поглощения пористого кремния действительно объясняется эффектами размерного квантования, поверхностные комплексы типа Si-H_x пассивируют оборванные связи и перекрывают каналы безызлучательной релаксации, в то время как радиационный переход происходит с участием локализованных уровней, связанных как с поверхностью, так и с положением уровней размерного квантования в самих нанокристаллах. Это позволяет совместить размерный сдвиг полосы фотолюминесценции и высокую ее эффективность.

Большинство работ по фотолюминесценции пористого кремния проводилось при малых (до 3 Вт/см^2) плотностях мощности непрерывного возбуждающего лазерного излучения, однако уже эти работы [7, 10] показали, что при увеличении мощности излучения происходит сдвиг и искажение спектров фотолюминесценции, что, по-видимому, связано с особенностью энергетической структуры нанокристаллов, ее поведением в условиях сильного возбуждения при высоких интенсивностях (10^3 – 10^6 Вт/см^2). Исследование процессов, обуславливающих такую эволюцию спектров фотолюминесценции может дать дополнительную информацию о ее механизме в пористом кремнии, что представляет в настоящее время большой интерес. Кроме того, эти исследования позволят понять особенности процессов релаксации и переноса электронного возбуждения, а также ответить на вопросы, касающиеся возможности реализации на поверхности нанокристаллов пористого кремния таких фотопроцессов как фотодесорбция, фотодиссоциация и абляция [12, 14].

Таким образом, целью работы являлось исследование фотопроцессов, реализуемых на поверхности пористого кремния в условиях мощного лазерного возбуждения.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАЗЦЫ

Слои пористого кремния получались анодированием в электролите ($\text{HF}(49\%):\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ в объемном соотношении компонентов 1:2) в двухкамерной электрохимической ячейке. В качестве катода применялась платина. После анодирования образцы ополаскивались в деионизованной воде и высушивались в струе сухого воздуха.

Одним из основных моментов в части изготовления образцов был выбор режимов формирования пленок. С одной стороны, известно, что пленки пористого кремния могут иметь слоистую структуру — различные слои отличаются по фотолюминесцентным свойствам. Действительно, свойства формирующегося слоя пористого кремния могут изменяться в процессе анодирования [15], а при определенных условиях меняется даже механизм травления. С другой стороны, было показано, что спектры фотолюминесценции могут существенно зависеть от длины волны возбуждающего излучения. Разделить эффекты, связанные с неоднородностью и различным возбуждением, по-видимому, возможно, если пленка пористого кремния будет достаточно тонкой, чтобы ее можно было бы рассматривать однородной и чтобы условия возбуждения на различных длинах волн не сильно различались. В то же время, предварительные исследования показали, что сразу после начала анодирования существует некоторый период установления стационарного режима травления (уменьшающийся с увеличением плотности тока анодирования), это позволяет предположить, что на внешней границе должен существовать некоторый слой с переменными характеристиками, определяемый переходом от режима травления исходной гладкой поверхности к стационарному режиму формирования продолжающихся пор. Толщина этого слоя предположительно может составлять несколько диаметров усредненной поры. Было изготовлено несколько образцов с различной плотностью тока j и длительностью анодирования t с поверхностным слоем в виде тонкой пленки пористого кремния и один — в виде толстой пленки. В качестве параметра для тонких пленок было выбрано постоянным значение заряда $Q = jt = 0.15 \text{ Кл/см}^2$ с различной плотностью тока: $j = 1, 10$ и 50 мА/см^2 , которым соответствуют обозначения в тексте соответственно № 1, № 2 и № 3. В качестве подложек использовались пластины стандартного кремния p -типа КДБ10 (удельное сопротивление $\rho \sim 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) с ориентацией поверхности (100). Для того чтобы избежать влияния разброса параметров, обусловленных различием пластин, вся серия образцов изготавливалась из частей одной пластины. Образец № 4 с толстой плен-

кой получен при $Q = 0.85$ Кл/см² ($j = 12$ мА/см², $t = 425$ с, подложка КДБ12).

Для тонких пленок определение толщины и эффективной пористости пленок проводилось методом измерения угловой зависимости интенсивности рентгеновского зеркального отражения в области углов полного внешнего отражения [16]. Толщина толстой пленки оценивалась по изображению скола в оптическом микроскопе и составляла величину ~ 10 мкм.

Для изучения фотолюминесценции пористого кремния в широком диапазоне интенсивностей возбуждающего излучения и при различных длинах волн использовался лазерный флюориметр, оснащенный частотным лазером на гранате YAG-Nd³⁺ с гармониками $\lambda = 532$ и 266 нм, а также азотным лазером ($\lambda = 337$ нм). Длительность импульса составляла 10 нс. Набор сменных фильтров и система фокусирующих линз позволяли менять плотность мощности лазерного излучения на образце от $7 \cdot 10^4$ до 10^7 Вт/см² для $\lambda = 532$ нм, и от 10^3 до $4 \cdot 10^5$ Вт/см² для $\lambda = 266$ нм. Плотность мощности азотного лазера составляла 10^4 Вт/см².

Возможные необратимые фотопроцессы на поверхности пористого кремния, которые могли инициироваться мощным лазерным излучением (фотодесорбция, фотодиссоциация и абляция) отслеживались методом лазерной масс-спектрометрии [12].

Таким образом, комплекс методик позволял контролировать процесс создания пленок пористого кремния и их структуру и исследовать фотопроцессы в пористом кремнии при мощном лазерном воздействии, начиная от фотолюминесценции и кончая фотодесорбцией и абляцией.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерения структурных параметров пленки методом рентгеновского отражения приведены в таблице.

Параметры P , d структуры пленок пористого кремния по результатам измерений методом полного внешнего отражения рентгеновских лучей [21]

№ образца	P , %	d , нм
1	58 ± 1	105 ± 1
2	38 ± 1	92 ± 1
3	55 ± 1	85.0 ± 0.5

Примечание. P — пористость, d — средняя толщина пленки.

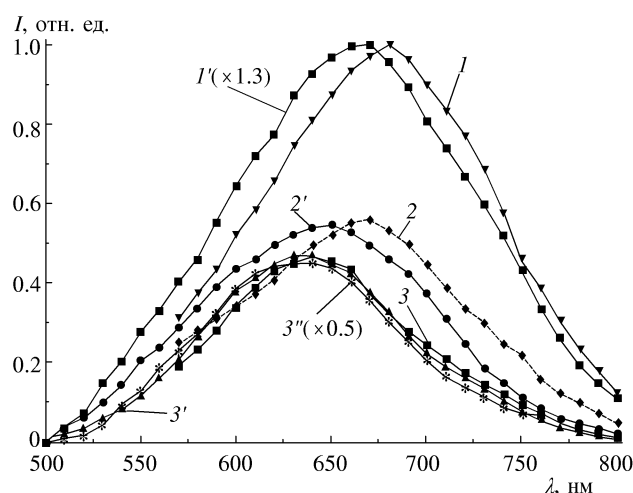


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции образцов пористого кремния. 1 — образец № 1, $\lambda = 532$ нм, 1' — образец № 1, $\lambda = 266$ нм; 2 — образец № 2, $\lambda = 532$ нм, 2' — образец № 2, $\lambda = 266$ нм; 3 — образец № 3, $\lambda = 532$ нм, 3' — образец № 3, $\lambda = 266$ нм, 3'' — образец № 3, $\lambda = 337$ нм. Плотность мощности лазерного излучения $q_{266} = 2.5 \cdot 10^3$ Вт/см² и $q_{532} = 2 \cdot 10^5$ Вт/см²

Эксперименты с импульсной накачкой проводились при следующих длинах волн возбуждающего излучения: $\lambda = 532$ нм, $\lambda = 337$ нм, $\lambda = 266$ нм. Поскольку использовались специально приготовленные образцы с очень тонким пористым слоем ($d = 105, 92, 85$ нм), излучение с каждой длиной волны могло поглощаться по всей глубине пористого слоя. Это позволило уменьшить а) влияние неоднородности структуры пористого кремния по глубине на результаты эксперимента [17]; б) влияние различия в коэффициентах поглощения для первых двух длин волн, которое в случае толстых пленок гарантированно приводит к несоответствию между собой глубин люминесцирующих областей. Отметим также, что выбор образцов с малой толщиной пористого слоя позволяет, как показали наши оценки, исключить эффект перепоглощения собственной фотолюминесценции в слое пористого кремния. Перепоглощение фотолюминесценции необходимо учитывать только при толщине таких образцов более 10 мкм.

Спектры люминесценции для тонких пленок представлены на рис. 1. Видно, что положение максимумов в спектрах фотолюминесценции пленок пористого кремния, полученных при разных плотностях тока, неодинаково. Большей плотности тока соответствует больший сдвиг в коротковолновую область. Это согласуется с известным выводом, что

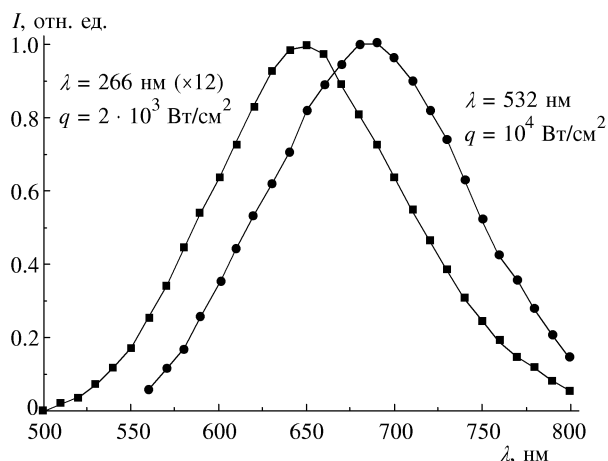


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции образца пористого кремния при воздействии излучением с $\lambda = 532$ нм и $\lambda = 266$ нм

пленки, сформированные при большей плотности тока, имеют меньший размер нанокристаллов кремния. Также видно, что при переходе от $\lambda = 532$ нм к $\lambda = 266$ нм максимум спектров для образцов № 1 и № 2 смещается в коротковолновую область, в то время как положение спектра образца № 3 практически не изменяется. Для сравнения на рис. 2 представлены спектры для образца № 4 с толстой пленкой пористого кремния, у которого это смещение оказалось наибольшим, 34 нм. Полученные результаты по сдвигу качественно согласуются с результатами других исследований для сравнительно толстых пленок пористого кремния ($d > 1$ мкм) [9]. Более важным, по-видимому, следует считать обнаруженную зависимость сдвига от толщины пленки, а также от условий формирования (пористости и плотности тока). Как видно из графиков рис. 1 и 2, сдвиг максимума спектра фотолюминесценции монотонно убывает с толщиной. У образцов № 1 и № 2 он составляет соответственно 15 нм и 10 нм. Для самого тонкого образца (№ 3, толщина $d = 85$ нм) этого сдвига практически нет, а спектры, полученные при трех длинах волн (266, 337 и 532 нм), совпадают в пределах ошибки эксперимента.

Физической причиной наблюдаемого сдвига могут быть различия не только в оптической толщине образцов, но и в их пористости. Действительно, образцам с большей пористостью свойствен меньший характерный размер нанокристаллитов, при этом, как известно, длинноволновое излучение ($\lambda = 532$ нм в нашем случае) будет поглощаться только относительно «крупными» кристаллитами, спектр люминесценции которых сдвинут в «красную» область спектра. Но тогда наибольшего сдвига

спектров следует ожидать для третьего образца, у которого он как раз отсутствует. Для подтверждения предложенных рассуждений проводился контрольный эксперимент с тонкими образцами нанопористого кремния, спектр люминесценции которых с максимумом в области 580–610 нм указывает на весьма малый характерный размер кристаллитов. Однако и в этом случае наблюдалось хорошее совпадение спектров люминесценции для возбуждения излучением с $\lambda = 532$ нм и $\lambda = 266$ нм.

Таким образом, можно сделать вывод, что сдвиг спектров фотолюминесценции в более толстых образцах (№ 1 и № 2, а также № 4) обусловлен именно разным коэффициентом поглощения, а точнее, разной «оптической толщиной» для различных длин волн. У образца № 3 оптические толщины для всех длин волн возбуждения совпадают.

Коротковолновое излучение (с $\lambda = 266$ и 337 нм и коэффициентом поглощения на два-три порядка больше, чем для $\lambda = 532$ нм) возбуждает в толстых образцах их верхний слой, который имеет большую, чем средняя по образцу, пористость и сильнее подвержен окислению. Поэтому спектр таких образцов будет сдвинут в коротковолновую область по сравнению со спектром, полученным при возбуждении излучением с $\lambda = 532$ нм, когда возбуждаются нанокристаллы как на поверхности пористого слоя, так и в глубине.

Таким образом, приходим к важному выводу: в образцах с одинаковой оптической толщиной для всего спектра возбуждения, расположенного выше края поглощения, спектр фотолюминесценции пористого кремния не зависит от длины волны возбуждения (в нашем случае для излучения с $\lambda \leq 532$ нм). В этих условиях вне зависимости от энергии кванта носители заряда после возбуждения безызлучательно релаксируют на выделенную систему уровней в нанокристаллах пористого кремния, с которой и происходит люминесценция.

Теперь рассмотрим поведение фотолюминесценции при различных интенсивностях возбуждающего излучения. На рисунках 3 и 4 приведены зависимости интенсивности фотолюминесценции тех же образцов от мощности излучения q соответственно для длин волн $\lambda = 266$ нм и $\lambda = 532$ нм. Лазерный флуориметр настраивался на длины волн, соответствующие максимумам спектров фотолюминесценции при малых q . Особое внимание обращает на себя нелинейная зависимость интенсивности фотолюминесценции при $q > 7 \cdot 10^3$ Вт/см² для $\lambda = 266$ нм и при $q > 2 \cdot 10^5$ Вт/см² для $\lambda = 532$ нм с последующим достижением интенсивностью I значений, при которых фотолюминесценция испытывает насыщение.

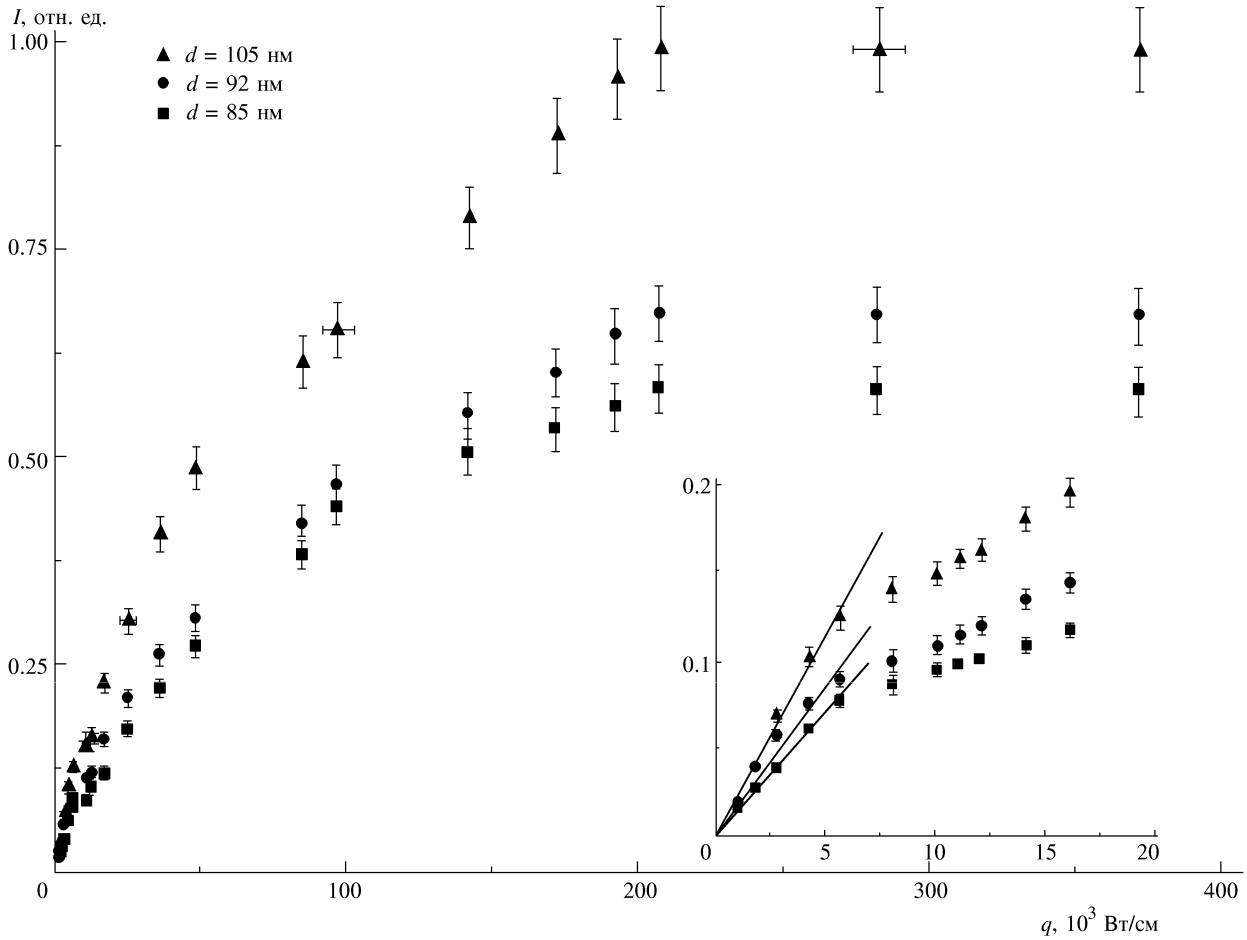


Рис. 3. Зависимость интенсивности фотолюминесценции от плотности мощности возбуждающего излучения q для образцов № 1, № 2 и № 3. Длина волны $\lambda = 266$ нм

Одним из объяснений наблюдаемого в эксперименте характера зависимости I от q является насыщение возбужденных состояний. Действительно, поскольку время жизни фотовозбужденных носителей в пористом кремнии порядка $\tau \sim 10\text{--}100$ мкс [3, 4], можно ожидать эффективный перевод носителей в возбужденные состояния в условиях нашего эксперимента. Оценки, проведенные на основании [18], показывают, что заметное отклонение от линейной зависимости $I(q)$ следует ожидать для

$$q_0 \geq \frac{\hbar\omega}{\tau\sigma},$$

где σ — сечение поглощения излучения, возбуждающего люминесценцию.

Для $\lambda = 532$ нм $q_0 > 10^6$ Вт/см², а для $\lambda = 266$ нм $q_0 > 2 \cdot 10^4$ Вт/см². Видно, что экспериментальные зависимости подтверждают эти оценки.

Таким образом, реализованным в условиях нашего эксперимента плотностям потока возбуждающего излучения ($q = 10^7$ Вт/см² для $\lambda = 532$ нм)

будут соответствовать высокие концентрации фотовозбужденных носителей, при которых, например, существенное значение может иметь безызлучательная оже-рекомбинация носителей [19].

Чтобы полнее представить поведение фотолюминесценции при различных интенсивностях, необходимо перейти к рассмотрению ее спектра.

На рисунках 5 и 6 представлены спектры фотолюминесценции для тех же образцов, полученные при различных границах q , соответственно для длин волн накачки $\lambda = 266$ нм и $\lambda = 532$ нм. На рисунках видно, что увеличение интенсивности лазерного излучения приводит к смещению спектров в коротковолновую область. Сдвиг максимума спектров фотолюминесценции при возбуждении светом с длиной волны $\lambda = 266$ нм составляет $\Delta\lambda = 35$ нм, 30 нм и 25 нм соответственно для образцов № 1, № 2 и № 3 (рис. 5); и при возбуждении светом с длиной волны $\lambda = 532$ нм сдвиг равен $\Delta\lambda = 45$ нм, 40 нм и 5 нм соответственно для образцов № 1, № 2 и № 3 (рис. 6).

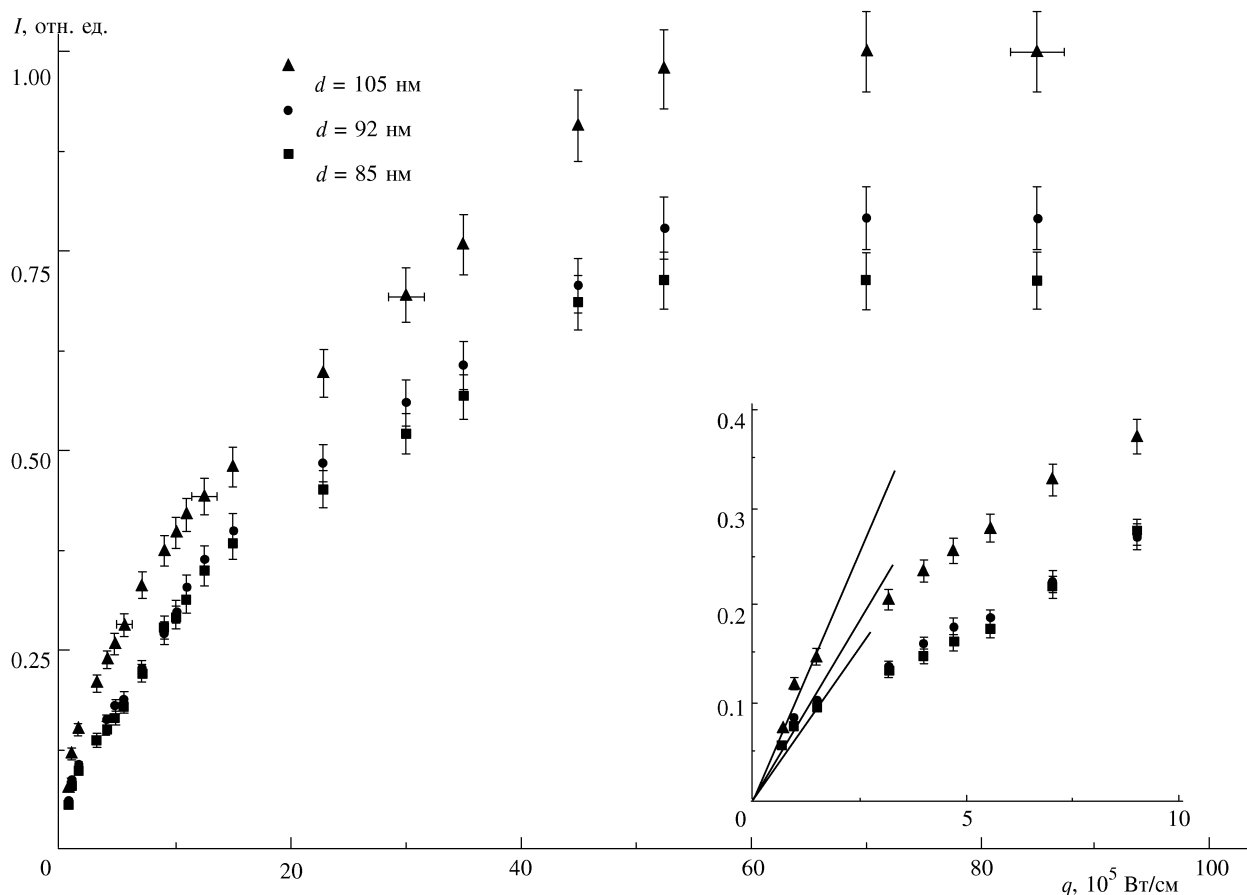


Рис. 4. Зависимость интенсивности фотолюминесценции от плотности мощности возбуждающего излучения q для образцов № 1, № 2 и № 3. Длина волны $\lambda = 532$ нм

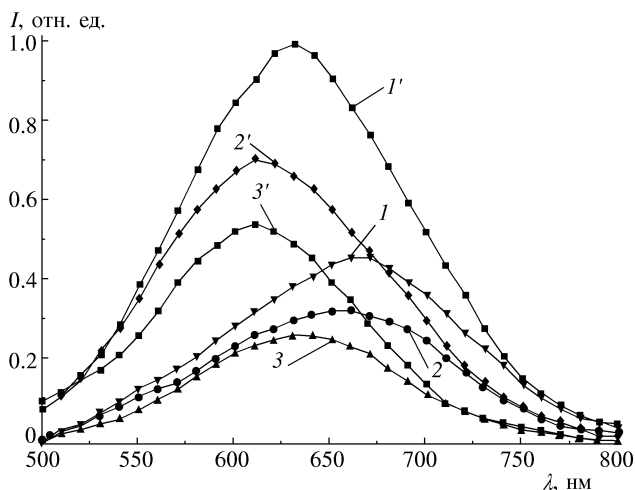


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции образцов пористого кремния при воздействии излучения с $\lambda = 266$ нм при двух значениях плотности мощности: $q_1 = 2.5 \cdot 10^3$ Вт/см² и $q_2 = 10^4$ Вт/см²: 1 — образец № 1 при q_1 , 1' — образец № 1 при q_2 ; 2 — образец № 2 при q_1 , 2' — образец № 2 при q_2 ; 3 — образец № 3 при q_1 , 3' — образец № 3 при q_2

Спектроскопия с временным разрешением [9, 10, 20] регистрирует сдвиг максимума фотолюминесценции с временем в длинноволновую область, т. е. «быстрая», с временем порядка 10 нс, излучательная релаксация происходит в коротковолновом диапазоне, а «медленная» ($\tau \sim 10-100$ мкс) — в длинноволновом диапазоне [3, 9]. Некоторые исследователи [9] связывают это с тем, что в нанокристаллах, имеющих меньший размер (соответственно более коротковолновый спектр фотолюминесценции), время излучательной релаксации меньше, чем в нанокристаллах с большим характерным размером.

Таким образом, коротковолновое смещение спектра фотолюминесценции пористого кремния при увеличении q можно объяснить тем, что при этом больший вклад в фотолюминесценцию начинают вносить нанокристаллы с меньшим размером, для которых зависимость I от q еще линейна, в то время как в нанокристаллах с большим размером фотолюминесценция уже начинает испытывать насыщение.

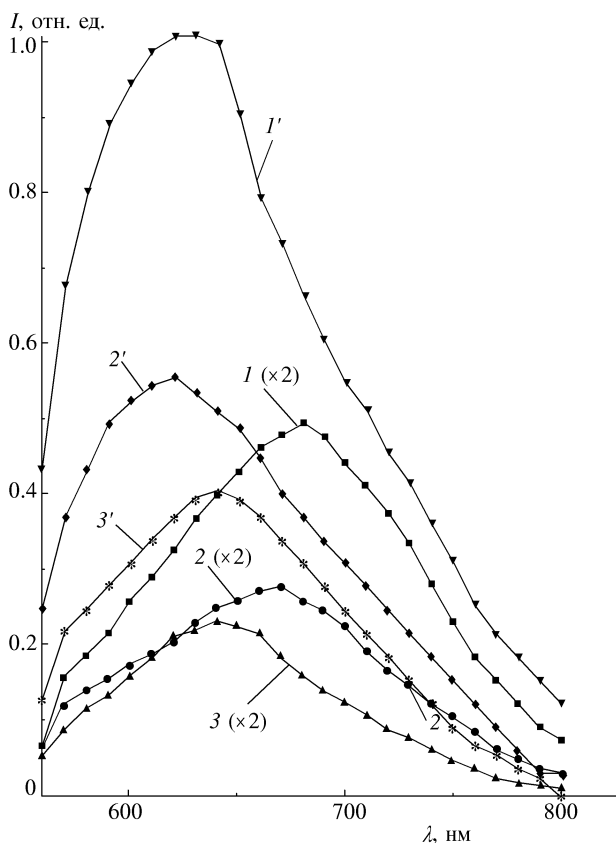


Рис. 6. Спектры фотолюминесценции образцов пористого кремния при воздействии излучением с $\lambda = 532$ нм при двух значениях плотности мощности: $q_1 = 2 \cdot 10^5$ Вт/см² и $q_2 = 2.5 \cdot 10^6$ Вт/см²: 1 — образец № 1 при q_1 , 1' — образец № 1 при q_2 ; 2 — образец № 2 при q_1 , 2' — образец № 2 при q_2 ; 3 — образец № 3 при q_1 , 3' — образец № 3 при q_2 . Искажение спектров в области 550–570 нм вызвано фильтром ОС-23-1, отсекающим излучение $\lambda = 532$ нм

Следует также заметить, что величина сдвига максимума фотолюминесценции при увеличении q прямо пропорциональна толщине образца. Это может объясняться тем, что в более тонком образце нанокристаллы более однородны по характерным размерам, а следовательно, испытывают насыщение при близких значениях q .

Масс-спектрометрические исследования показали, что в диапазоне q от $3 \cdot 10^6$ до $8 \cdot 10^6$ Вт/см² одновременно с достижением значений, при которых фотолюминесценция испытывает насыщение, наблюдается фотодесорбция H₂ и Si. Характерный масс-спектр представлен на рис. 7, на рис. 8 продемонстрирован расшифрованный масс-спектр. Вообще говоря, высокие концентрации носителей, реализованные в наших экспериментальных условиях на нанокристаллах, должны приводить к резкому

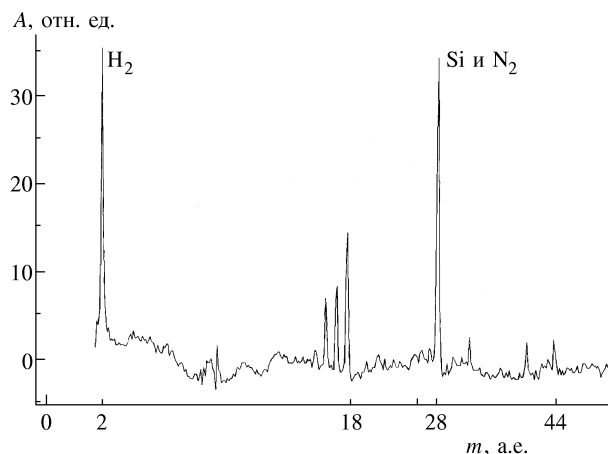


Рис. 7. Характерный масс-спектр при воздействии излучения с $q = 5 \cdot 10^6$ Вт/см² на поверхность образца пористого кремния

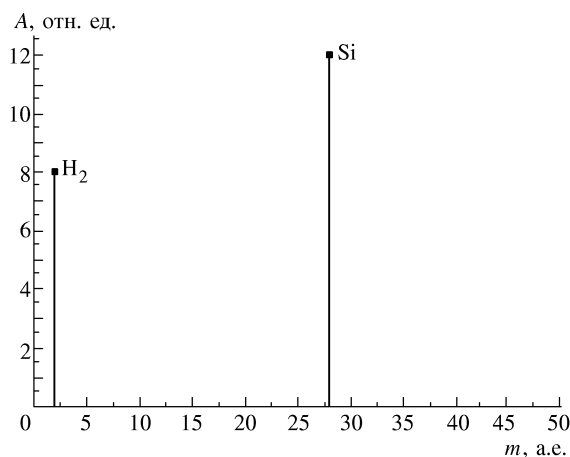


Рис. 8. Расшифрованный масс-спектр при воздействии излучения с $q = 5 \cdot 10^6$ Вт/см² на поверхность образца пористого кремния

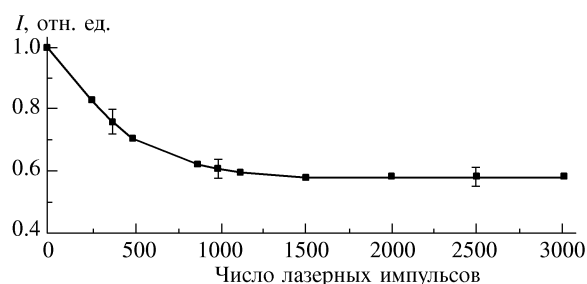


Рис. 9. Зависимость интенсивности максимума люминесценции образца № 3 от числа импульсов лазерного излучения с $\lambda = 532$ нм при $q = 8 \cdot 10^6$ Вт/см²

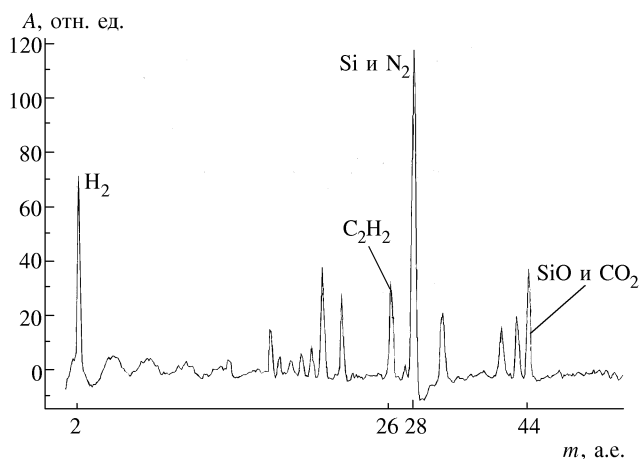


Рис. 10. Характерный масс-спектр при воздействии излучения с $q = 2 \cdot 10^7$ Вт/см² на поверхность образца пористого кремния

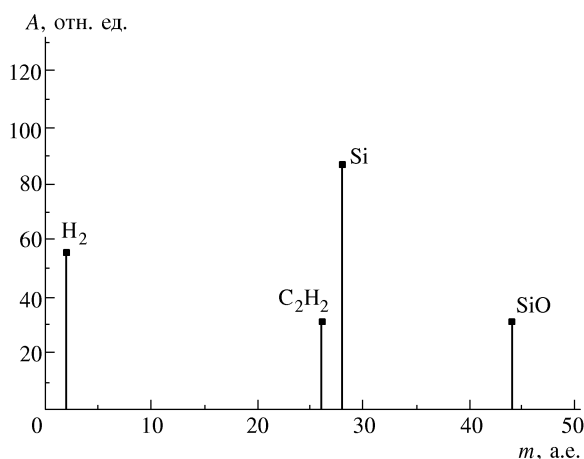


Рис. 11. Расшифрованный масс-спектр при воздействии излучения с $q = 2 \cdot 10^7$ Вт/см² на поверхность образца пористого кремния

возрастанию вероятности поверхностных фотопроцессов, таких как фотодесорбция, наблюдаемая в наших экспериментах, и фотодиссоциация. Возможно эффективное лазерное фотоокисление. С другой стороны, наблюдаемая фотодесорбция, в принципе, увеличивает число оборванных связей, а следовательно, и число каналов безызлучательной релаксации. Этот механизм может приводить к необратимой деградации люминесценции.

На рисунке 9 представлена зависимость интенсивности люминесценции в максимуме спектра от времени или от числа лазерных импульсов для $\lambda = 532$ нм и $q = 8 \cdot 10^6$ Вт/см². Видно, что для 1000 импульсов интенсивность уменьшается на 40%.

Дальнейший рост интенсивности возбуждающего излучения (выше $8 \cdot 10^6$ Вт/см² для $\lambda = 532$ нм) приводит к резкому и необратимому убыванию интенсивности фотолюминесценции. Масс-спектрометрические исследования свидетельствуют, что при этом образуются следующие продукты лазерного воздействия: H₂, Si, C₂H₂, SiO (рис. 10 и 11), характерные для режима абляции и разрушения пористого слоя [21].

4. ВЫВОДЫ

В работе исследованы фотопроцессы при воздействии на поверхность пористого кремния лазерного излучения в широком диапазоне интенсивностей, до $\sim 10^7$ Вт/см², и при $\lambda = 532, 337$ и 266 нм.

Показано, что для образцов с одинаковой оптической толщиной для всего спектра возбуждения, расположенного выше края поглощения, спектр фотолюминесценции пористого кремния не зависит от длины волны возбуждения (в нашем случае для излучения с $\lambda \leq 532$ нм) в линейной области зависимости $I(q)$. В этих условиях вне зависимости от энергии кванта носители заряда после возбуждения безызлучательно релаксируют на выделенную систему уровней в нанокристаллах пористого кремния, с которой и происходит люминесценция.

Экспериментально обнаружен нелинейный характер зависимости интенсивности фотолюминесценции от q , обусловленный высоким уровнем возбуждения полупроводника.

Обнаружен и исследован сдвиг спектра люминесценции в зависимости от интенсивности возбуждающего излучения в коротковолновую область спектра.

Обнаружена фотодесорбция для $q \sim 8 \cdot 10^6$ Вт/см² с образованием H₂ и Si.

Показано, что неравновесная фотодесорбция способствует появлению новых каналов безызлучательной релаксации за счет увеличения числа оборванных связей. Для $q > 9 \cdot 10^6$ Вт/см² и $\lambda = 532$ нм обнаружено резкое убывание интенсивности фотолюминесценции за счет увеличения скорости безызлучательной релаксации в результате нагрева и абляции.

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке Министерства науки и технологий РФ (проекты № 08-02-48 и № 97-10-73), а также программы Интеграции высшего образования и фундаментальной науки (проект № А0103).

ЛИТЕРАТУРА

1. N. Koshida and H. Koyama, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 347 (1992).
2. L. T. Canham, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1046 (1990).
3. A. G. Cullis, L. T. Canham, and P. D. J. Calcott, *J. Appl. Phys.* **82**, № 3, 909 (1997).
4. B. M. Kostishko, A. M. Orlov, S. N. Mikov, and T. G. Emelianova, *Nonorganic materials*, **31**, 444 (1995).
5. S. M. Prokes, O. J. Glembocki, V. M. Bermudez, R. Kaplan, L. E. Friendersdorf, and P. C. Searson, *Phys. Rev. B* **45**, 13788 (1992).
6. C. Tsai, K. H. Li, J. Sarathy, S. Shih, S. C. Campebl, B. K. Hance, and J. M. White, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 2814 (1991).
7. M. Koos, I. Pocsik, and E. B. Vazsonyi, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 1797 (1993).
8. V. Lehmann and U. Gosele, *Appl. Phys. Lett.* **58**(8), 856 (1991).
9. М. С. Бреслер, И. Н. Ясневич, *Физика и техника полупроводников* **27**, 871 (1993).
10. K. L. Narasimhan, S. Banerjee, A. K. Srivasata, and A. Sardesai, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 331 (1993).
11. M. Ohumukai and Y. Tsutsumi, *J. Appl. Phys.* **84**, 4459 (1998).
12. Yu. A. Bykovskii, G. E. Kotkovskii, M. B. Kuznetsov, A. A. Chistyakov, and V. A. Karavanskii, in *XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics technical digest*, Moscow (1998), p. 243.
13. M. Kondo, *J. Non-Crystalline Solids* **164–166**, 941 (1993).
14. A. Hashimoto, K. Iwata, M. Ohkubo, and A. Yamamoto, *J. Appl. Phys.* **75**, 5447 (1994).
15. С. А. Гаврилов, Т. Н. Заварицкая, В. А. Караванский, Н. Н. Мельник, В. Подзоров, И. Н. Смирнов, *Электрохимия* **33**, 1064 (1997).
16. В. А. Караванский, А. А. Ломов, Е. В. Ракова, С. А. Гаврилов, Н. Н. Мельник, Т. Н. Заварицкая, В. А. Бушуев, *Поверхность* № 12 (1999) (в печати).
17. А. Н. Образцов, В. А. Караванский, Х. Окуши, Х. Ватанабэ, *Физика и техника полупроводников* **32**, 1001 (1998).
18. В. П. Грибковский, *Теория поглощения и испускания света в полупроводниках*, Наука и техника, Минск (1975).
19. В. П. Грибковский, Г. Н. Яскевич, *ЖПС* **12**, 231 (1970).
20. R. Laiho, A. Pavlov, O. Novi, and T. Tsuboi, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 275 (1993).
21. Ю. А. Быковский, В. А. Караванский, Г. Е. Котковский, О. А. Ляскина, А. А. Чистяков, *Поверхность* № 9, 23 (1999).