

СИЛЬНОЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АНОДНО ОКИСЛЕННОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

© В.Г.Голубев, А.В.Жерздев, Г.К.Мороз, А.В.Пацекин, Д.Т.Ян

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
(Получена 29 июня 1995 г. Принята к печати 5 июля 1995 г.)

Обнаружено сильное нелинейное возрастание фотолюминесценции под действием непрерывного лазерного возбуждения (488 нм) малой мощности ($< < 1 \text{ Вт/см}^2$) при комнатной температуре в свежеприготовленном анодно окисленном пористом кремнии. Максимальное абсолютное значение интенсивности фотолюминесценции, а также ее максимальное относительное изменение со временем облучения достигнуты в слоях пористого кремния со средней степенью окисления. Лазерное освещение привело к увеличению интенсивности колебательных мод в конфигурациях $\text{O}_3\text{-SiH}$, Si-O-Si и Si-OH по отношению к интенсивности мод SiH_n в инфракрасных спектрах поглощения. Результаты подтвердили, что структура окисла на поверхности кремниевых кристаллитов, а также структура интерфейса Si/SiO_2 играют важную роль в процессе фотолюминесценции.

Введение

После открытия яркой фотолюминесценции (ФЛ) в видимой области спектра при комнатной температуре в пористом кремнии (ПК) [1,2] большое число исследований было посвящено изучению влияния различных факторов на интенсивность свечения, его спектральный состав и стабильность. При этом оказалось, что структура и излучающие свойства ПК, получаемого электрохимическим травлением, зависят от большого числа технологических параметров: типа проводимости, удельного сопротивления и кристаллографической ориентации исходной кремниевой пластины; концентрации плавиковой кислоты, типа растворителя и температуры травящего раствора; режимов травления — плотности тока, длительности процесса, освещенности поверхности пластины.

Одним из важнейших и всегда присутствующих факторов является воздействие на параметры люминесценции непосредственно возбуждающего излучения. В ряде работ [3-8] было исследовано влияние длительного воздействия стационарного возбуждения низкой мощности (в

основном лазерного излучения видимого и ультрафиолетового диапазонов спектра) на интенсивность ФЛ свежеприготовленных образцов ПК, полученных анодным травлением монокристаллического кремния p -типа проводимости.

В [3] было обнаружено, что ультрафиолетовая засветка образца, люминесцирующего в красной области спектра, вызывала уменьшение ФЛ на $10 \div 20\%$ за 12 ч и голубой сдвиг спектра. В образце, люминесцировавшем в зеленой области спектра, интенсивность ФЛ падала больше чем на порядок и наблюдался красный сдвиг спектра. Темп деградации ФЛ увеличивался, когда энергия кванта возбуждения превосходила 3.0 эВ . Наблюдаемую деградацию авторы связывают с экспериментально зарегистрированной фотостимулированной десорбцией водорода с поверхности кремния.

Выявлено [4], что стабильность ФЛ ПК (с максимумом 745 нм) сильно зависит от окружающей атмосферы (N_2 , H_2 , O_2 , формирующий газ). Наиболее сильно ФЛ уменьшалась под действием возбуждающего излучения в атмосфере кислорода, при этом наблюдался голубой сдвиг спектра и увеличение числа оборванных связей в образце на 2 порядка. Обнаруженные зависимости связываются с изменением электронных свойств поверхности ПК.

В [5] установлено, что ФЛ ПК, анодизированного при искусственном освещении (с максимумом 685 нм), спадала при длительном ($\sim 25 \text{ мин}$) облучении. Интенсивность ФЛ ПК, анодизированного в темноте (с максимумом 770 нм), также уменьшалась при облучении в вакууме (спектр при этом немного сдвигался в область высоких энергий). Однако при облучении на воздухе ФЛ образцов, анодизированных в темноте, возрастала более чем на порядок, а голубой сдвиг спектра достигал 70 нм .

Различие в поведении во времени ФЛ образцов различной пористости показано в [6]. Усталость ФЛ зарегистрирована в образце 90% -й пористости. В случае длительной ($\sim 10 \text{ мин}$) экспозиции образца 40% -й пористости интенсивность ФЛ (с максимумом 710 нм) возрастала.

Спад ФЛ по закону растянутой экспоненты наблюдался в [7] при достижении некоторого уровня мощности возбуждающего света. При этом интенсивность ФЛ возвращалась к своему первоначальному значению только после выдержки образца в темноте в течение нескольких часов.

В [8] наряду с деградацией ФЛ при освещении обнаружено и ее разгорание при уменьшении интенсивности освещения или после затемнения образца. В кинетике ФЛ выделены три характерных времени, которые могут определяться процессами фотостимулированного обратного изменения концентрации трех типов центров безызлучательной рекомбинации.

Уменьшение ФЛ при низкой мощности лазерного возбуждения (меньше 1.4 Вт/см^2) зарегистрировано также в [9]. С увеличением мощности (больше 50 Вт/см^2) интенсивность ФЛ росла со временем облучения.

В [10] в свежеприготовленном образце ПК имел место 30% -й спад ФЛ со временем при освещении. После обработки, состоящей из отжига при 450°C в вакууме, выдержки на воздухе и в водородной плазме, наблюдался приблизительно пятикратный рост ФЛ в течение 40 мин .

Проведенный цикл обработки значительно (более чем в 100 раз) увеличивал интенсивность, а также повышал стабильность ФЛ по сравнению с ФЛ свежеприготовленного образца.

Значительное повышение стабильности ФЛ достигнуто в ПК, подвергнутом быстрому термическому отжигу [11,12]. Так, в [11] показано, что ФЛ свежеприготовленного образца (с максимумом 825 нм) деградировала при облучении в атмосфере O_2 больше чем на порядок в течение 10 мин. После отжига ($950^\circ C$, 2 мин) интенсивность ФЛ (с максимумом 710 нм) уменьшилась приблизительно в 50 раз по сравнению с исходной интенсивностью ФЛ свежеприготовленного образца, но оставалась стабильной по крайней мере в течение 2 ч. Уменьшение деградации связывается с получением в процессе отжига высококачественного окисла, покрывающего поверхность наноразмерных кремниевых кристаллитов в ПК.

Механическая прочность слоев и высокое качество окисла, покрывающего внутреннюю поверхность ПК, достигается при его анодном окислении [13-16]. Процедура окисления легко контролируется варьированием параметров электрохимического процесса (плотность анодного тока, анодный потенциал, время проведения процесса). При этом в процессе анодного окисления наблюдается электролюминесценция ПК [15,17-19]. В анодно окисленном пористом кремнии (АОПК), полученном из пластин кремния *n*-типа проводимости, обнаружен фотоиндуцированный рост люминесценции [20,21]. В [20] зарегистрированы 18%-й рост интегральной интенсивности и голубой сдвиг ФЛ в течение 20 мин облучения образца, а также насыщение роста при более длительной экспозиции. В [21] установлено, что линейный рост интегральной интенсивности ФЛ сопровождался уменьшением концентрации оборванных связей.

Исходя из совокупности приведенных экспериментальных данных о фотоиндуцированных изменениях в ФЛ ПК можно предположить, что существенную роль в фотоиндуцированных процессах играют кислород и связанные с ним процессы окисления. В связи с этим представляет интерес исследование эволюции ФЛ под действием возбуждающего света в образцах ПК, предварительно и в различной степени окисленных.

Цель настоящей работы: во-первых — исследование фотоиндуцированных изменений ФЛ из образцов свежеприготовленного АОПК с разной степенью окисления, полученных из пластин кремния *p*-типа проводимости; во-вторых — определение существования корреляции между изменениями в ФЛ и возможными изменениями в химическом составе и конфигурациях связей примесных атомов на поверхности кремниевых кристаллитов под действием возбуждающего лазерного излучения.

Техника эксперимента

Образцы ПК были приготовлены анодным травлением пластин кристаллического кремния, легированного бором, с удельным сопротивлением $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (КДБ-10) и с ориентацией поверхности (100). Для обеспечения омического контакта на тыльную сторону пластин наносился слой алюминия, который вжигался в кремний при температуре $450^\circ C$. Рабочая сторона пластин шлифовалась порошком с размером

зерна 5 мкм для устранения влияния интерференции при наблюдении ФЛ из тонких слоев ПК. Процесс травления проводился в растворе 45%-я HF + этанол в соотношении 1:1 при гальваностатических условиях с плотностью тока 10 mA/cm^2 в течение 6 мин. После окончания процесса травления образцы выдерживались в этом растворе в короткозамкнутом состоянии при комнатном дневном освещении в течение 6 мин, после чего промывались в деионизованной воде. Вслед за этим в той же ячейке без выноса образца на воздух проводился процесс электрохимического анодного окисления ПК в 3.6 М спирто-водном растворе HCl при плотности тока 2.5 mA/cm^2 . Различные образцы ПК окислялись в течение разного времени. Процесс электрохимического окисления в гальваностатических условиях сопровождается, как известно, непрерывным ростом разности потенциалов между анодом и катодом [13-15]. Нами были приготовлены образцы АОПК с окончанием процесса при потенциале на аноде $U = 0.9, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5 \text{ В}$. Значение потенциала больше 1.5 В соответствует режиму, при котором имеет место резкий рост потенциала со временем окисления. Как следует из работ [13,14], такой рост является следствием практически полного окисления поверхности кремниевых микрокристаллитов, расположенных вблизи подложки. Полное окисление поверхности приводит к потере электрического контакта между кристаллитами в АОПК и кремниевой подложкой, что сопровождается резким ростом потенциала, необходимого для поддержания постоянного тока через ячейку. Поэтому режимы окисления с потенциалом на ячейке выше 1.5 В не исследовались.

Стационарная ФЛ АОПК при комнатной температуре измерялась при возбуждении излучением непрерывного аргонового лазера (488 нм) с интенсивностью около 1 Вт/cm^2 с помощью монохроматора МДР-23 и фотоумножителя ФЭУ-62. Спектры ФЛ корректировались на аппаратную функцию установки.

Спектры инфракрасного (ИК) поглощения записывались при комнатной температуре в диапазоне волновых чисел $4000 \div 450 \text{ см}^{-1}$ на фурье-спектрометре IFS-113v фирмы «Bruker» с разрешением 8 см^{-1} и усреднением по 600 сканам. Фурье-спектры снимались после травливания пленки Al с тыльной стороны кремниевой пластины в концентрированном растворе HF.

Результаты и обсуждение

Параметры травления были подобраны так, чтобы сформировать пленки ПК с не слишком высокой пористостью ($50 \div 60\%$), что обеспечивало высокую механическую прочность слоев. В свежеприготовленных образцах ПК, которые не подвергались анодному окислению, ФЛ в видимой области не наблюдалась. В то же время все образцы АОПК обладали заметной ФЛ в видимой области спектра с максимумом в диапазоне $720 \div 755 \text{ нм}$.

Во всех свежоокисленных пленках ПК наблюдался рост интенсивности ФЛ под действием возбуждающего света. На рис. 1 в качестве примера показаны спектры ФЛ, снятые на воздухе последовательно в одной и той же точке образца 3 после различных времен лазерной экспозиции. Развертка спектра осуществлялась в течение приблизительно одной минуты в направлении малых длин волн λ . Времена облучения, указанные в подписи к рисунку, складываются из суммарного времени предшествующей экспозиции и времени регистрации приведенного

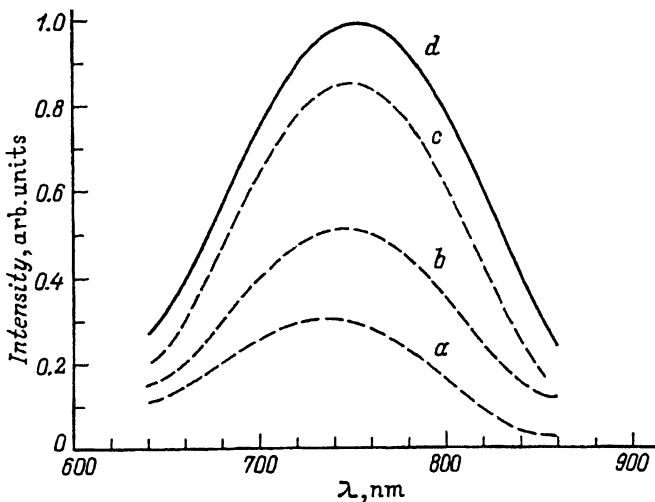


Рис. 1. Спектры ФЛ свежеприготовленного АОПК при различных временах (t) лазерной экспозиции. t , мин: a — 3, b — 8, c — 23. d — после выдержки на воздухе в течение 1 месяца.

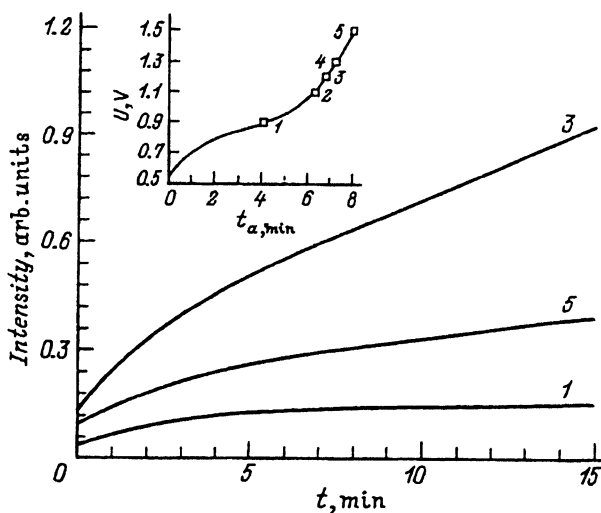


Рис. 2. Разгорание ФЛ на длине волны 740 нм под действием возбуждающего лазерного облучения в зависимости от времени лазерной экспозиции t . Номера кривых соответствуют номерам образцов на вставке. На вставке — зависимость анодного потенциала U при электрохимическом окислении ПК от времени процесса t_a ; точками показаны моменты окончания окисления образцов ПК; цифры, нумерующие точки, соответствуют номерам образцов.

спектра. Заметное изменение интенсивности ФЛ под действием возбуждающего излучения за время записи спектра приводит к искажению его формы в процессе регистрации, что затрудняет сопоставление положения максимумов линий и их ширины. На рис. 1 приведен также спектр ФЛ, снятый в другой точке этого образца после хранения его на воздухе в течение 1 месяца.

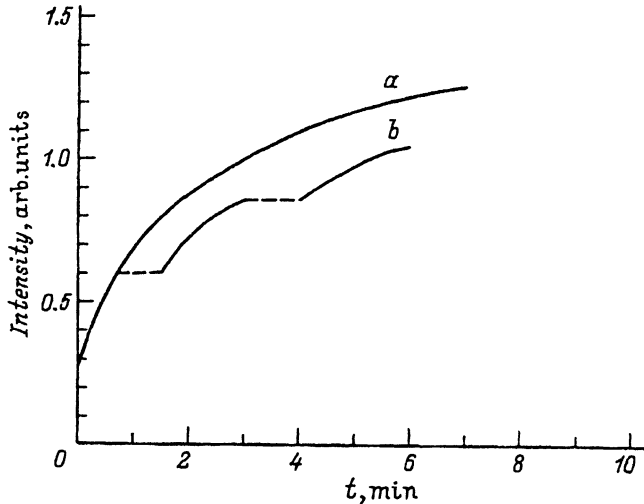


Рис. 3. Разгорание ФЛ на длине волны 740 нм под действием возбуждающего лазерного облучения в зависимости от времени экспозиции для образца 4: *a* — без перерыва в возбуждении, *b* — с перерывом в возбуждении.

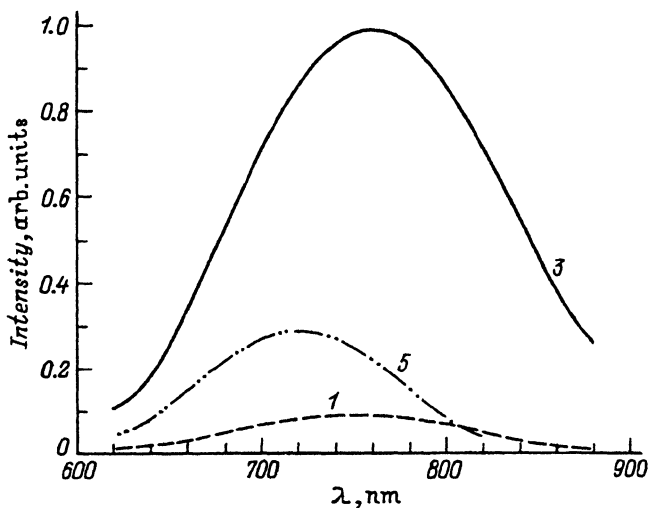


Рис. 4. Спектры ФЛ свежеприготовленных образцов АОПК с различной степенью окисления после примерно 20-минутного лазерного облучения. Номера спектров соответствуют номерам образцов на вставке к рис. 2.

Изменение ФЛ со временем лазерной экспозиции для трех образцов АОПК с различной степенью окисления показано на рис. 2. Интенсивность ФЛ на длине волны 740 нм (вблизи максимума спектра), как видно из рисунка, увеличивается для всех образцов в несколько раз; характер роста ФЛ близок к логарифмическому с тенденцией к насыщению через 15÷20 мин облучения. Значение интенсивности в начальный момент измерений, а также относительное изменение интенсивности со временем сначала увеличиваются, а затем уменьшаются по мере роста степени окисления. Из рис. 3 видно влияние перерывов

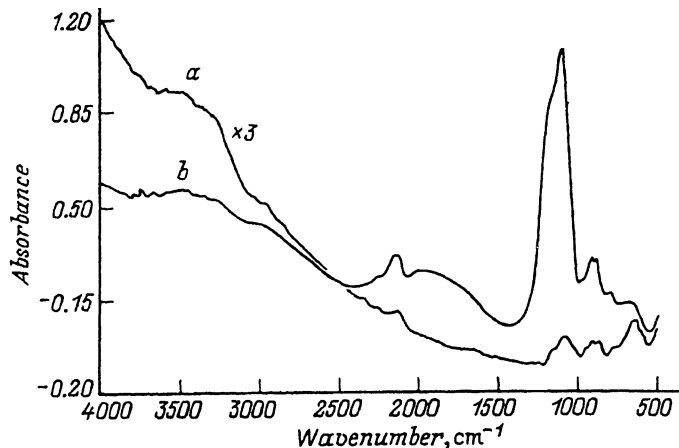


Рис. 5. Спектры инфракрасного поглощения образцов 1 (а) и 5 (b).

в лазерной экспозиции на разгорание ФЛ. На рисунке показано разгорание ФЛ на длине волны 740 нм в двух различных точках образца 4 без выключения (а) и с временным выключением (b) лазерного возбуждения. Видно, что в периоды выключения возбуждения изменений в образце не происходит: рост ФЛ после включения возбуждения начинается практически с того значения, которое было до выключения лазера. На рис. 4 представлены спектры ФЛ свежеприготовленных образцов АОПК с разной степенью окисления после приблизительно 20-минутной лазерной засветки. По мере возрастания степени окисления (от образца 1 к образцу 5) интенсивность ФЛ сначала возрастает, достигая максимального значения при некоторой средней степени окисления (образец 3), а затем вновь уменьшается. При этом максимум спектра ФЛ испытывает монотонное голубое смещение от 755 нм (образец 1) до 720 нм (образец 5). Максимальный квантовый выход ФЛ, достигаемый при умеренной, не полной степени окисления, указывает на важную роль окислов кремния, возможно, нестехиометрического состава, в процессах излучательной рекомбинации.

Контроль степени окисления образцов АОПК, а также природы конфигураций локальных связей, которые образуют примесные атомы на поверхности кремниевых кристаллитов, осуществлялся с помощью колебательных спектров инфракрасного решеточного поглощения. Характерные частоты локальных мод колебаний, обуславливающих соответствующие линии поглощения в таких спектрах, определяются ближним порядком в расположении атомов, а атомные смещения локализуются на атомах примесей и их ближайших соседях.

На рис. 5 показаны спектры инфракрасного поглощения образцов 1 и 5 соответственно с наименьшим и наибольшим временем анодного окисления. Приведенные спектры конвертированы из соответствующих спектров пропускания и представляют собой частотную зависимость поглощения: $A = -\log(T/T_0)$, где T — пропускание АОПК на кремниевой подложке, T_0 — пропускание подложки без пленки АОПК. Для удобства сопоставления масштаб спектра образца 1 увеличен в 3 раза.

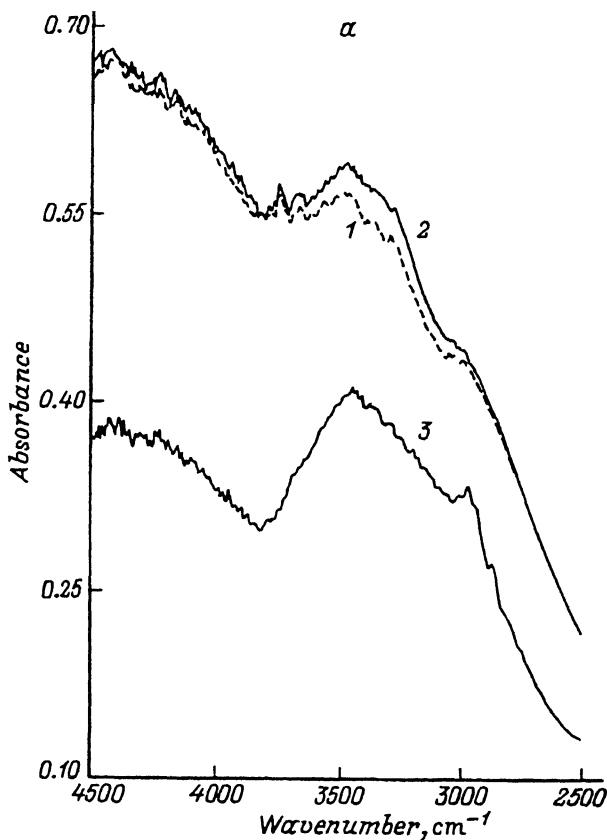


Рис. 6. Спектры инфракрасного поглощения образца 5: 1 — до облучения (пунктир), 2 — после 10-минутного облучения лазером, 3 — после хранения на воздухе в течение 1 месяца. *a-c* соответствуют разным спектральным интервалам.

В области частот больше 1000 см^{-1} в спектре образца 1 зарегистрировано значительное увеличение поглощения, связанное, по-видимому, с рассеянием света на шероховатостях интерфейса пористый слой-подложка и обратной стороны подложки.

В спектре образца 5 пики поглощения видны на фоне интерференционных полос. Наблюдение менее явных интерференционных полос в спектре образца 1, вероятно, связано с тем, что при малой степени окисления поверхность интерфейса неплоская из-за сильной шероховатости.

Большинство линий поглощения обусловлены локальными колебательными модами связей Si-H, Si-O и Si-OH. Для идентификации типов мод колебаний использовались данные работ [22,23] и ссылки в них.

Отметим, что точная идентификация мод в диапазоне меньше 1000 см^{-1} очень затруднена. Проблемы связаны как с большим количеством мод, расположенных в этом диапазоне, так и с возможным взаимодействием между ними. Это приводит, соответственно, к сильному перекрытию между линиями с различной амплитудой и к их частотному сдвигу. При идентификации следует также учитывать напряжение,

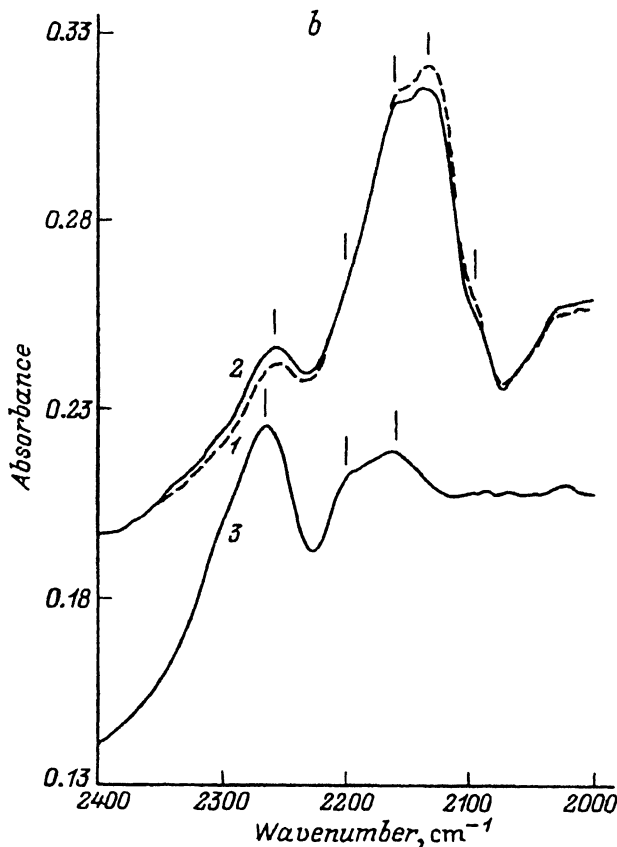


Рис. 6 (продолжение).

имеющееся в пленках ПК [6], и то, что многие поглощающие связи находятся на поверхности кремниевых кристаллитов. В этих условиях частоты колебаний сдвинуты в более высокие по сравнению с соответствующими колебаниями в объеме.

Анализ показал, что большинство линий регистрируется в спектрах всех пяти исследованных образцов. По мере увеличения степени окисления наблюдается рост интенсивности большинства линий. Однако в силу указанных выше причин, а также из-за выбранного масштаба не все из них хорошо различимы на приведенном рисунке.

Наибольший рост интенсивности по мере окисления имеет место у линии 1100 см^{-1} и плеча 1190 см^{-1} , связанных с модой растяжения связей Si-O-Si. Расщепление может быть обусловлено либо упорядочением мостиков Si-O-Si, имеющим, например, место в силосене и его производных, либо двумя типами связей Si-O-Si, существующими в ПК [23]. В последнем случае это может быть кислород как атом внедрения и кислород в преципитатах SiO_2 или субокислах на поверхности.

В диапазоне $2075\div 2300\text{ см}^{-1}$ зарегистрирована группа линий, обусловленная модами растяжения связей Si-H в конфигурациях $\text{Si}_3\text{-SiH}$, $\text{Si}_2\text{H-SiH}$, $\text{Si}_2\text{O-SiH}$, $\text{SiO}_2\text{-SiH}$ и $\text{O}_3\text{-SiH}$, где первые три атома обозначают трех ближайших соседей атома Si в SiH-группе.

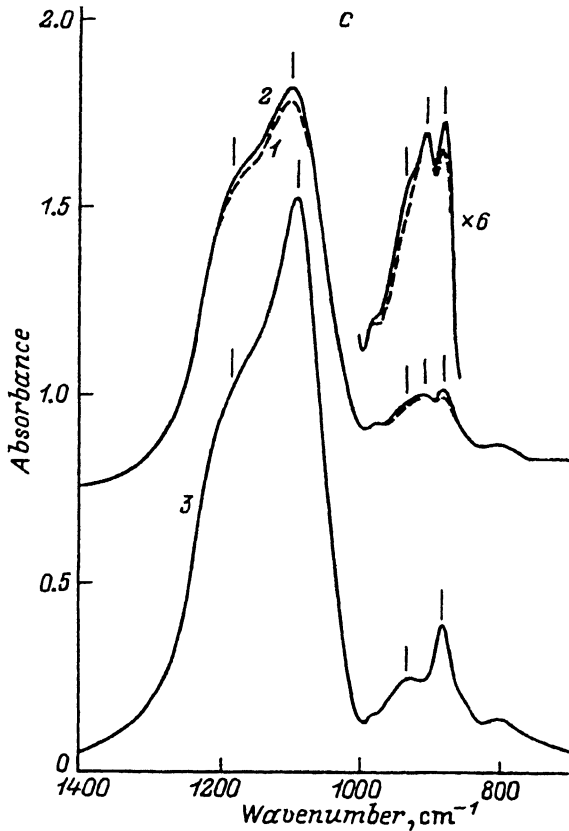


Рис. 6 (продолжение).

Во всех свежеприготовленных образцах АОПК наблюдалась также широкая полоса поглощения в диапазоне $3100 \div 3800 \text{ см}^{-1}$, представляющая собой суперпозицию, как минимум, двух линий, связанных с колебаниями типа растяжения связей O-H соответственно в молекулах H_2O и SiOH , адсорбированных на поверхности АОПК.

На рис. 6, *a-c* приведены фрагменты спектров инфракрасного поглощения образца 5, записанные непосредственно до и сразу же после 10-минутной лазерной экспозиции, а также после хранения на воздухе в течение 1 месяца.

Облучение приводит к росту интенсивности линий колебательных мод растяжения связей Si-OH (спектры 1, 2 на рис. 6, *a*). После хранения на воздухе интенсивность линий данных мод также увеличивается (спектр 3).

В области частот валентных колебаний связи Si-H (спектры 1, 2 на рис. 6, *b*) наблюдается уменьшение интенсивности мод растяжения в $\text{Si}_3\text{-SiH}$ (2135 см^{-1}) и $\text{Si}_2\text{H-SiH}$ (2095 см^{-1}) и увеличение интенсивности моды растяжения в конфигурации $\text{O}_3\text{-SiH}$ (2257 см^{-1}). Сильное перекрытие линий, соответствующих модам колебаний в конфигурациях $\text{SiO}_2\text{-SiH}$ (2200 см^{-1}) и $\text{Si}_2\text{O-SiH}$ (2155 см^{-1}), не позволило достоверно проследить за возможными незначительными изменениями их интен-

сивности после облучения. После хранения на воздухе в течение 1 месяца линии, соответствующие $\text{Si}_3\text{-SiH}$ и $\text{Si}_2\text{H-SiH}$, полностью исчезли, что означает постепенную замену нестабильного пассивированного водородом покрытия поверхности кристаллитов на более стабильное, пассивированное кислородом.

После облучения увеличивается также интенсивность линий, соответствующих модам растяжения Si-O-Si (1100 и 1190 см^{-1}), изгибной моде Si-OH (934 см^{-1}) и изгибной моде $\text{O}_3\text{-SiH}$ (884 см^{-1}) (спектры 1, 2 на рис. 6,с). Интенсивность этих линий значительно увеличивается и после хранения на воздухе. При этом полностью исчезает линия, обусловленная модой колебаний типа «ножницы» SiH_2 -группы (907 см^{-1}) (спектр 3 на рис. 6,с).

Сопоставление данных по ФЛ и ИК поглощению позволяет предположить, что усиление ФЛ под действием облучения может быть связано с фотостимулированной модификацией структуры окисла на поверхности кремниевых кристаллитов, а также структуры интерфейса между кристаллитами и двуокисью кремния. При этом данная модификация может приводить к изменению как рекомбинационных процессов в содержащих кислород химических соединениях [23,24] и дефектах [25-27], входящих в состав покрытия поверхности кремниевых кристаллитов, так и рекомбинационных процессов, включающих электронные состояния на поверхности кремниевых кристаллитов [28-30] и электронные состояния на интерфейсе Si/SiO_2 [31-33].

Авторы благодарны В.В. Чалдышеву и А.Е. Куницыну за содействие в проведении экспериментов по облучению образцов АОПК.

Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [2] V. Lehmann, V.Gösele. Appl. Phys. Lett., **58**, 856 (1991).
- [3] R.T. Collins, M.A. Tischler, J.H. Stathis. Appl. Phys. Lett., **61**, 1649 (1992).
- [4] M.A. Tischler, R.T. Collins, J.H. Stathis, J.C. Tsang. Appl. Phys. Lett., **60**, 639 (1992).
- [5] I. Suemune, N. Noguchi, M. Yammanishi. Japan. J. Appl. Phys., **31**, L494 (1992).
- [6] S.M. Prokes, J.A. Freitas, P.C. Searson. Appl. Phys. Lett., **60**, 3295 (1992).
- [7] R. Laiho, A. Pavlov, O. Hovi, T. Tsuboi. Appl. Phys. Lett., **63**, 275 (1993).
- [8] К.С. Журавлев, Н.П. Степина, Т.С. Шамирзаев, Э.Ю. Бучин, Н.Е. Мокроусов. ФТП, **28**, 482 (1994).
- [9] P.D. Stevens, R. Glosser. Appl. Phys. Lett., **63**, 803 (1993).
- [10] Y. Xiao, M.J. Heben, J.M. McCullough, Y.S. Tsuo, J.I. Pancove, S.K. Deb. Appl. Phys. Lett., **62**, 1152 (1993).
- [11] J.L. Batstone, M.A. Tischler, R.T. Collins. Appl. Phys. Lett., **62**, 2667 (1993).
- [12] V. Petrova-Koch, T. Muschik, A. Kux, B.K. Meyer, F. Koch, V. Lehman. Appl. Phys. Lett., **61**, 943 (1992).
- [13] A. Bsiesy, J.C. Vial, F. Gaspard, R. Herino, M. Ligeon, F. Muller, R. Romestain, A. Wasieleski, A. Halimaoui, G. Bomchil. Surf. Sci., **254**, 195 (1991).
- [14] J.C. Vial, A. Bsiesy, F. Gaspard, R. Herino, M. Ligeon, F. Muller, R. Romestain, R.M. Macfarlane. Phys. Rev. B, **45**, 14171 (1992).
- [15] D. Bellet, S. Billat, G. Dolino, M. Ligeon, C. Meyer, F. Muller. Sol. St. Commun., **86**, 51 (1993).
- [16] T. Ito, K. Motoi, O. Arakaki, A. Hatta, A. Hiraki. Japan. J. Appl. Phys., **33**, L941 (1994).
- [17] A. Halimaoui, C. Oules, G. Bomchil, A. Bsiesy, F. Gaspard, R. Herino, M. Ligeon, F. Muller. Appl. Phys. Lett., **59**, 304 (1991).

- [18] M. Ligeon, F. Muller, R. Herino, F. Gaspard, J.C. Vial, R. Romestain, S. Billat, A. Bsiesy. *J. Appl. Phys.*, **74**, 1265 (1993).
- [19] A. Halimaoui. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1264 (1993).
- [20] S. Shih, K.H. Jung, D.L. Kwong, M. Kovar, J.M. White. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1780 (1993).
- [21] S. Shih, K.H. Jung, J. Yan, D.L. Kwong, M. Kovar, J.M. White, T. George, S. Kim. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 3306 (1993).
- [22] A. Borghesi, A. Sassella, B. Pivas, L.Pavesi. *Sol. St. Commun.*, **87**, 1 (1993).
- [23] H.D. Fuchs, M. Stutzmann, M.S. Brandt, M. Rosenbauer, J. Weber, A. Breitschwerdt, P. Deak, M. Cardona. *Phys. Rev. B*, **48**, 8172 (1993).
- [24] Y. Takeda, S. Hyodo, N. Susuki, T. Motohiro, T. Hioki, S. Noda. *J. Appl. Phys.*, **73**, 1924 (1993).
- [25] S.M. Prokes. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 3244 (1993).
- [26] S.M. Prokes, O.J. Glembocki. *Phys. Rev. B*, **49**, 2238 (1994).
- [27] S.M. Prokes, W.E. Carlos, O.J. Glembocki. *Phys. Rev. B*, **50**, 17093 (1994).
- [28] F. Koch, V. Petrova-Koch, T. Muschik, A. Nicolov, V. Gavrilenko. In: *Microcrystalline Semiconductors: Materials Science and Devices* [MRS Symp. Proc. (Pittsburg, P.A., 1993) v. 283, p. 297].
- [29] L. Tsybeskov, Ju.V. Vandyshev, P.M. Fauchet. *Phys. Rev. B*, **49**, 7821 (1994).
- [30] L. Tsybeskov, P.M. Fauchet. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 1983 (1994).
- [31] Y. Kanemitsu, T. Ogawa, K. Shiraishi, K. Takeda. *Phys. Rev. B*, **48**, 4883 (1993).
- [32] Y. Kanemitsu, T. Futagi, T. Matsumoto, H. Mimura. *Phys. Rev. B*, **49**, 14732 (1994).
- [33] Y. Kanemitsu. *Phys. Rev. B*, **49**, 16845 (1994).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoinduced strong luminescence enhancement from anodically oxidized porous silicon

V.G.Golubev, A.V.Zherzdev, G.K.Moroz, A.V.Patsekin, D.T.Yan

A.F.Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences,
194021 S.Petersburg, Russia

Strong nonlinear photoluminescence enhancement was observed with increasing illumination time of low intensity ($< 1 \text{ W/cm}^2$) cw laser excitation (488 nm) from freshly anodically oxidized porous silicon at room temperature. Both the gained maximum absolute value of the photoluminescence intensity and its maximum relative change with illumination time took place in the anodically oxidized layers with moderate extent of oxidation. The laser illumination led to an increase in relative intensity of the vibrational modes in $\text{O}_3\text{-SiH}$, Si-O-Si and Si-OH configurations towards the intensity of SiH_n modes in infrared absorption spectra. The results confirm the importance of the structure of the oxide on the surface of Si crystallites and that of Si/SiO_2 interface in the photoluminescence process.