

# Фотолюминесценция слоев $\text{SiO}_2$ , приготовленных на пленках $\beta\text{-SiC}$ , и анализ их элементного состава

© А.М. Данишевский, В.М. Лебедев\*, А.Ю. Рогачев, В.Б. Шуман, А.А. Ситникова, Р.В. Золотарева

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Российской академии наук,  
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия

E-mail: Alex.D@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 28 августа 2006 г.)

Исследуются спектры импульсной, разрешенной во времени фотолюминесценции (ФЛ) окисленных слоев, полученных электрохимическим окислением на пленках SiC/Si. Анализ их элементного состава, проведенный с помощью методов обратного резерфордского рассеяния и ядерных реакций, показал, что в окисле остается определенная часть атомов углерода. Особенности параметров спектральных полос и их кинетик во времени связываются авторами именно с наличием равномерно распределенного в окисле углерода. С использованием электронной микроскопии изучены структуры окислов при различных длительностях окисления. Сделаны заключения о возможных центрах излучения ФЛ.

PACS: 71.23.Cq, 71.55.Jv, 78.55.Qr

Фотолюминесцентные свойства различным образом полученных слоев двуокиси кремния привлекают внимание многочисленных исследовательских групп [1–7]. С одной стороны, двуокись кремния ( $\text{SiO}_2$ ) является одним из наиболее широко используемых оптических материалов и объемные фотолюминесцентные свойства  $\text{SiO}_2$  хорошо изучены [1,2], с другой — взаимодействие различного рода примесей, проникающих в материал при приготовлении слоев или из атмосферы, со структурными дефектами  $\text{SiO}_2$  может существенно изменить спектральный состав фотолюминесценции (ФЛ). Это оказывается особенно актуальным в случае наноструктурирования образцов  $\text{SiO}_2$ , так как вследствие большого отношения площади поверхности к объему в указанных слоях всегда имеется большая концентрация структурных дефектов как в объеме, так и на поверхности нанобъектов. Люминесцентные свойства нанопорошков  $\text{SiO}_2$  подробно исследовались в работах [3–5]. В частности, идентифицировались полосы ФЛ, связанные с глубокими центрами (ГЦ), возникающими вследствие взаимодействия структурных дефектов  $\text{SiO}_2$  с группами ОН, катионами  $\text{H}_2\text{O}$  и др.

Кремниевые и углеродные атомы [6–10] также могут взаимодействовать с ГЦ в  $\text{SiO}_2$ , образуя новые типы локальных центров, обуславливающих появление тех или иных полос ФЛ.

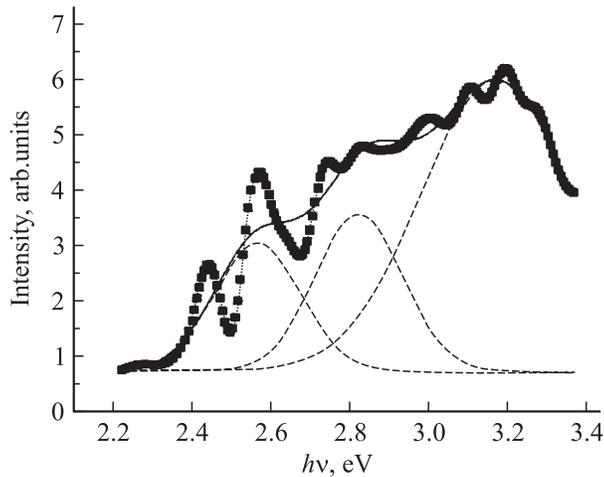
В настоящей работе изучалась ФЛ слоев  $\text{SiO}_2$ , приготовленных путем анодного электрохимического окисления пленок SiC, выращенных методом CVD на кремнии. В подобных структурах, полученных путем электрохимического травления пленок SiC в растворе  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:1:2$  и последующего электрохимического окисления в водном растворе HCl, нами ранее наблюдалась бело-голубая ФЛ [11,12], существенно более интенсивная и смещенная по спектру в коротковолновую область в сравнении, например, с ФЛ аналогично окисленных пленок пористого кремния.

## 1. Приготовление образцов и методика экспериментов

Свойства исходных пленок SiC/Si были подробно описаны в нашей работе [11]. Измерения рентгеновской дифракции показали, что пленки SiC имели кубическую симметрию, в этом случае характерное значение  $E_g$  должно быть 2.36 eV. По данным электронной микроскопии, указанные пленки толщиной 2–3.5  $\mu\text{m}$  были мелко-мозаичными и, по-видимому, нестехиометричными, поскольку ширина запрещенной зоны этих соединений, оцененная из спектров поглощения, не превышала 2 eV (измерения спектров пропускания проводились на „свободных“ пленках). В рамках настоящей работы использовались пленки № 65, ширина запрещенной зоны которых оценивалась как 1.76 eV. ФЛ исходных пленок SiC оказалась очень слабой. Тем не менее спектр ФЛ пленки (рис. 1), полученный с помощью методики, описанной далее, оказался достаточно сложным, и наиболее интенсивная его полоса имела максимум при энергии кванта 3.17 eV. По-видимому, наиболее интенсивно люминесцируют узкие области границ между зернами, где в результате напряжений в процессе роста возникают низкосимметричные полимеры SiC, имеющие более высокое значение  $E_g$ .

Эти пленки SiC были электрохимически окислены в 0.1 М растворе HCl с током 10 mA/cm<sup>2</sup> с использованием ультрафиолетовой (УФ) подсветки от кварцевой лампы ДРШ-200 с тепловым фильтром. Было исследовано пять образцов: исходная пленка 65 карбида кремния SiC/Si толщиной  $\sim 2.2 \mu\text{m}$  на кремниевой подложке и четыре пленки, полученные в результате окисления исходной пленки с различной длительностью (65-1 — 2 min, 65-2 — 4 min, 65-3 — 8 min, 65-4 — 10 min).

По приготовлении окисных слоев их люминесцентные свойства предварительно проверялись с помощью



**Рис. 1.** Спектр ФЛ исходной пленки SiC/Si № 65. Энергия квантов возбуждения ФЛ  $h\nu = 3.68$  eV, коэффициент поглощения возбуждающего излучения лазера  $\alpha = 1.1 \cdot 10^4$  cm<sup>-1</sup>. Штриховые кривые — разложение огибающей спектра на гауссианы.

люминесцентного микроскопа „Люмам-Р3“ с кварцевой лампой в качестве источника света (непрерывное УФ возбуждение ФЛ). Наблюдалась довольно яркая бело-голубая люминесценция, интенсивность которой существенно увеличивалась с длительностью окисления. Спектры ФЛ измерялись на автоматизированной установке со спектрометром ДФС-12 с ФЭУ-79 и короткоимпульсным ( $t_p = 8$  ns) азотным лазером (энергия кванта  $h\nu = 3.68$  eV) в качестве источника возбуждения, работавшего с частотой повторения 100 pulse/s. Временное разрешение стробоскопической системы регистрации импульсов ФЛ — 15 ns. Поскольку под действием интенсивного ( $\sim 0.3$  MW/cm<sup>2</sup>) УФ лазерного излучения сразу после включения лазера наблюдалась медленная деградация интенсивности ФЛ (до  $\sim 50$ –60% первоначальной величины), образцы до начала спектральных измерений выдерживались под лучом лазера более 30 min, в результате чего уровень сигнала ФЛ уже не зависел от облучения. После этого измерялись спектры и кинетические характеристики ФЛ. Характеристики деградации ФЛ и возможные ее причины обсуждались в работе [11].

Измерения спектров ФЛ проводились также после последовательных вакуумных отжигов с шагом по температуре 50–100°C вплоть до 700°C. Все измерения спектров ФЛ выполнялись при температуре образцов 85 K в вакуумном криостате.

Элементный состав пленок был определен с помощью ядерно-физических методов элементного анализа на заряженных частицах. Применялись методы спектрометрии Резерфордского обратного рассеяния (РОР) и ядерных реакций (ЯР) с дейтронами. Работа проводилась на аналитическом комплексе для исследования материалов на базе электростатического ускорителя ПИЯФ [13].

Для количественного определения содержания кислорода и углерода в исследуемых образцах были использованы ядерные реакции с дейтронами:  $^{16}\text{O}(d, p)^{17}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}(d, \alpha)^{14}\text{N}$  и  $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$  [13,14]. Измерения проводились следующим образом. Исследуемая пленка облучалась пучком дейтронов с энергией  $E_d = 1$  MeV. Данная энергия была выбрана вследствие того, что в области энергий дейтронов от 0.9 до 1 MeV сечение ядерной реакции дейтронов с углеродом-12 практически не меняется [14]. Сечения ядерных реакций дейтронов с ядрами кислорода-16 в этой энергетической области также не имеют ярко выраженной резонансной структуры и плавно меняются с энергией. Рассеянные от образца дейтроны и образовавшиеся в результате ядерных реакций протоны и  $\alpha$ -частицы регистрировались планарным кремниевым детектором площадью 7 mm<sup>2</sup> с энергетическим разрешением  $\Delta E = 10$  keV для энергии  $\alpha$ -частиц  $E_\alpha = 5.5$  MeV. Детектор был установлен на расстоянии 6.5 cm от мишени под углом  $\theta = 135^\circ$  к направлению пучка дейтронов [13].

Метод РОР мог дать информацию о распределении кислорода и, возможно, углерода по толщине пленки только для сравнительно тонких пленок. Для более толстых использовался метод ЯР. Из распределения частиц, образующихся в результате реакции, по энергии можно было рассчитать распределение элементов по глубине исследуемой пленки. Налетающий на мишень дейтрон теряет энергию из-за торможения в пленке. Образовавшаяся в результате ядерной реакции вторичная частица (протон или  $\alpha$ -частица) также теряет энергию при вылете из образца. Следовательно, энергия регистрируемой частицы несет информацию о глубине слоя в образце, в котором она образовалась в результате ядерной реакции, а количество частиц с этой энергией дает концентрацию данного элемента на этой глубине [15,16].

Помимо указанных выше методов проводились электронно-микроскопические исследования исходных и окисленных пленок SiC в просвечивающем электронном микроскопе типа EM-420. Образцы для указанных исследований вырезались и вытравливались таким образом, чтобы можно было изучать структуру пленки в направлении торца, т.е. в направлении, ортогональном ее плоскости.

## 2. Результаты экспериментов

2.1. Исследования изменений элементного состава при окислении пленок. Экспериментальные энергетические спектры частиц, полученные при облучении образцов дейтронами, представлены на рис. 2. В левой части рис. 2 приведены спектры рассеянных дейтронов, а в правой — спектры продуктов ядерных реакций.

В области энергий до 1 MeV наблюдаются рассеянные дейтроны, при большей энергии — частицы, возникшие в результате ядерных реакций: при энергии  $\sim 3$  MeV — протоны, возникающие в реакции  $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$  с

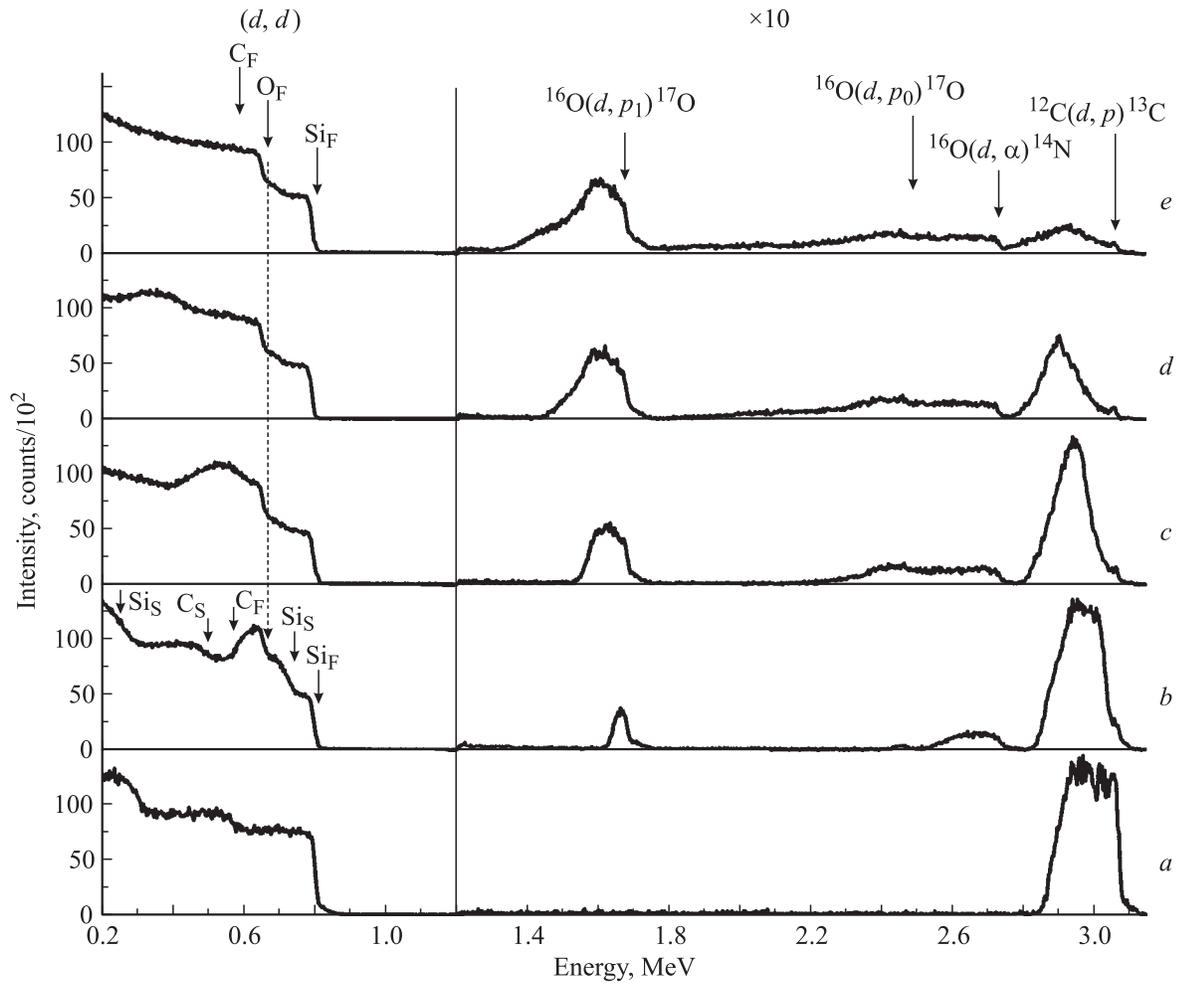


Рис. 2. Спектры рассеянных дейтронов и продуктов МЯР. *a* — 65, *b* — 65-1, *c* — 65-2, *d* — 65-3, *e* — 65-4.

углеродом-12, при энергиях ~ 1.6 и ~ 2.4 MeV — протоны, возникающие в реакции  $^{16}\text{O}(d, p)^{17}\text{O}$  с кислородом-16, при энергии ~ 2.7 MeV —  $\alpha$ -частицы из реакции  $^{16}\text{O}(d, \alpha)^{14}\text{N}$  с кислородом-16.

Рассмотрим характерный спектр на рис. 2, *b*, полученный для образца Ш-65-1 (длительность окисления 2 min). Стрелками указаны максимально возможные энергии дейтронов, рассеянных от элементов, входящих в состав образца. В области спектра до 1 MeV регистрируются обратно рассеянные дейтроны. Хорошо видны ступеньки от рассеяния дейтронов на входящих

в состав пленки атомах кремния Si<sub>F</sub> и кислорода O<sub>F</sub>, а также от кремния Si<sub>S</sub>, содержащегося в оставшейся, еще не окисленной пленке карбида кремния. Также указано положение ступеньки от рассеяния на углероде C<sub>F</sub>. Высота ступеньки пропорциональна сечению рассеяния и концентрации элемента в образце. Ступенька при энергии дейтронов ~ 0.25 MeV (рис. 2, *a*) обусловлена дейтронами, рассеянными на кремниевой подложке Si<sub>S</sub> в исходной структуре Ш-65.

Рассчитанные из этих спектров с помощью программы RBS-Dubna [15] глубинные профили элементов в

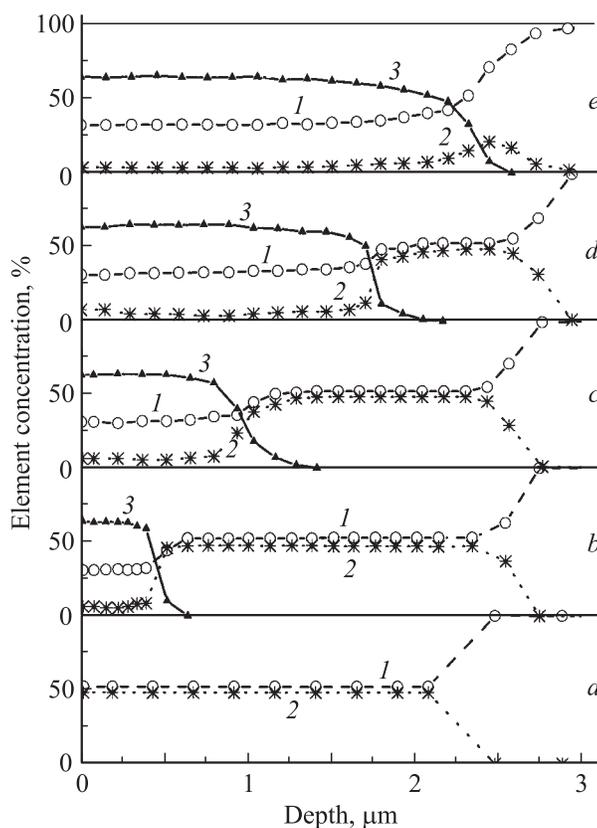
Таблица 1. Характеристики исследованных слоев SiO<sub>2-x</sub>C<sub>x</sub> + SiC

Номер образца	Время окисления, min	Окисленный слой		Оставшаяся SiC-пленка	
		состав окисленного слоя	толщина <i>d</i> , μm	состав оставшейся пленки	толщина <i>d</i> <sub>1</sub> , μm
65	0		Нет	Si <sub>0.52</sub> C <sub>0.48±0.01</sub>	2.15
65-1	2	Si <sub>0.31</sub> O <sub>0.63</sub> C <sub>0.06±0.01</sub>	0.39	Si <sub>0.52</sub> C <sub>0.48±0.02</sub>	2.0
65-2	4	Si <sub>0.31</sub> O <sub>0.63</sub> C <sub>0.06±0.01</sub>	0.80	Si <sub>0.52</sub> C <sub>0.48±0.02</sub>	1.6
65-3	8	Si <sub>0.32</sub> O <sub>0.64</sub> C <sub>0.04±0.02</sub>	1.7	Si <sub>0.52</sub> C <sub>0.48±0.05</sub>	0.9
65-4	10	Si <sub>0.32</sub> O <sub>0.64</sub> C <sub>0.04±0.02</sub>	2.1	Si <sub>0.7±0.1</sub> C <sub>0.3±0.1</sub>	< 0.4

**Таблица 2.** Параметры разложения спектров ФЛ (рис. 4) окисленных SiC пленок на два гауссиана

Номер образца	$h\nu_{\max 1}, \text{eV}$	$W_1, \text{eV}$	Площадь полосы A1, (arb.units)	$h\nu_{\max 2}, \text{eV}$	$W_2, \text{eV}$	Площадь полосы A2, (arb.units)
65-1	2.49	0.36	1.76	2.95	0.45	2.69
65-2	2.606	0.49	10.86	2.987	0.48	9.12
65-3	2.606	0.49	46.53	3.026	0.42	23.9
65-4	2.607	0.6	97.7	3.031	0.43	30.5

создаваемых структурах приведены на рис. 3, причем распределение кислорода и углерода в образце извлекалось из спектров соответствующих ядерных реакций, а кремния — из данных обратного резерфордского рассеяния.

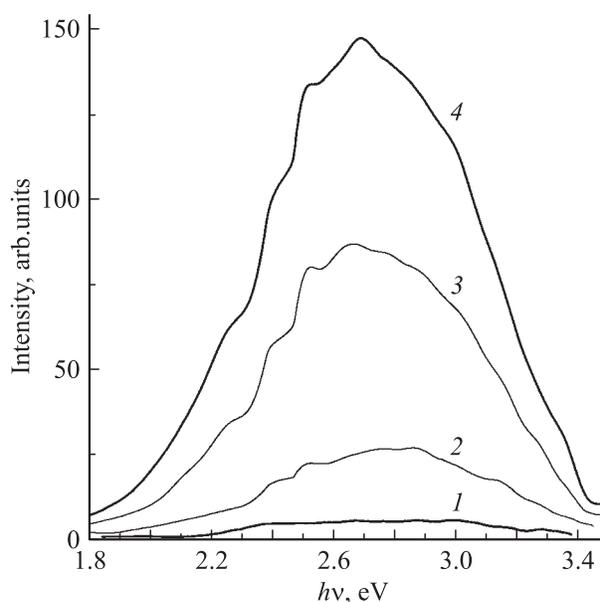


**Рис. 3.** Распределение элементов (кремний, углерод, кислород) в исходной и окисленных пленках № 65 по глубине: 1 — Si, 2 — C, 3 — O.

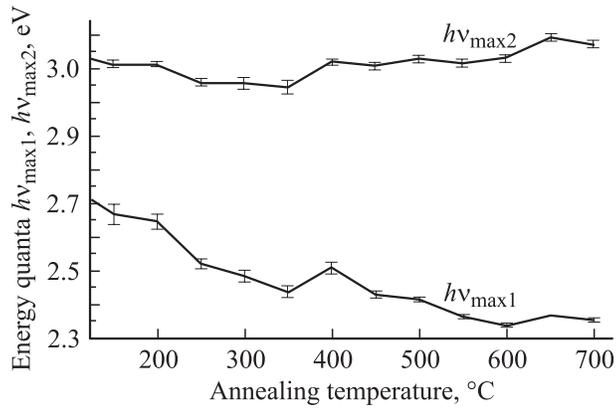
Средние концентрации углерода, кислорода и кремния в разных слоях окисленной структуры и толщины этих слоев представлены в табл. 1. Видно, что с ростом времени окисления исходных образцов растет и толщина получающейся окисной пленки (табл. 1). Однако, как видно из рис. 2 и 3, во всех полученных окисных пленках кремния сохранились следы углерода, равномерно распределенного по их объему. На рис. 3 видно также, что элементы в различных слоях полученных структур распределены довольно равномерно по глубине.

**2.2. Фотолюминесценция.** Спектры ФЛ упомянутых выше окисленных образцов приведены на рис. 4. Они представляют собой широкие неоднородно уширенные спектральные полосы, которые достаточно хорошо могут быть разложены на два гауссиана с энергиями в максимуме  $\sim 2.61$  и  $2.95\text{--}3.03$  eV. Характерные времена начального спада ФЛ во всем указанном диапазоне энергий составляли  $\sim 3 \cdot 10^{-8}$  s. Синий пик обычно более интенсивен при относительно небольших длительностях окисления. Однако с увеличением объема окисла площадь зелено-голубого пика в спектре ФЛ нарастает значительно быстрее (табл. 2). Интересно отметить, что энергия квантов зелено-голубого пика изменяется только в начальных процессах окисления, в то время как для пика синей ФЛ с увеличением длительности окисления энергия квантов постепенно смещается в сторону больших энергий и при больших длительностях процесса окисления.

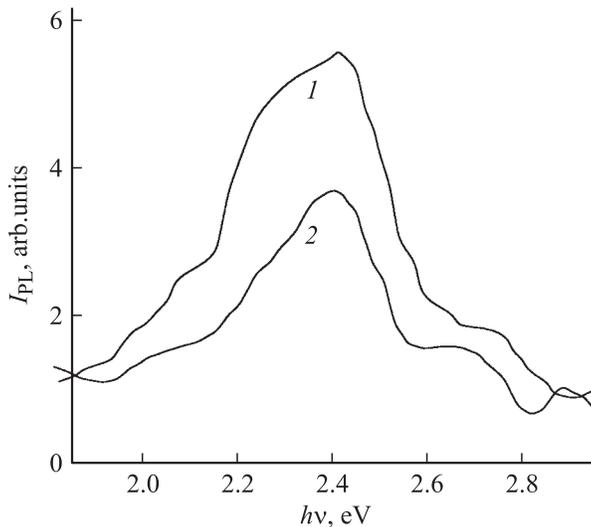
Интенсивность и площадь полос существенно растут с увеличением длительности окисления (табл. 2). Однако при наибольших длительностях ( $t \sim 12$  min) этот рост полностью прекращается. Электронно-микроскопи-



**Рис. 4.** Спектры разрешенной во времени ФЛ электрохимически окисленных пленок SiC/Si с различной длительностью окисления: 1 — 65-1 (2 min), 2 — 65-2 (4 min), 3 — 65-3 (8 min), 4 — 65-4 (10 min).



**Рис. 5.** Смещение полос ФЛ, возникающее в результате ряда последовательных вакуумных отжига. Пленка № 65 — длительность окисления 10 min.



**Рис. 6.** Спектры ФЛ электрохимически окисленных образцов *por*-Si. 1 — *n*-Si,  $\rho = 0.002 \Omega \cdot \text{cm}$ ; ( $\text{HF} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ),  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ , 3 min; окисление в 0.1 M HCl,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ , 10 min; 2 — *p*-Si,  $\rho = 12 \Omega \cdot \text{cm}$ ; ( $\text{HF} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ),  $j = 24 \text{ mA/cm}^2$ , 10 min; окисление в 0.1 M HCl,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ , 5 min.

ческие наблюдения торцов пленок показывают, что указанное насыщение роста интенсивности ФЛ возникает при длительностях окисления, когда исходная пленка SiC по всей глубине переходит в окисел. Отсюда понятно, что рост интенсивности ФЛ в основном обусловлен увеличением объема окисла, и, таким образом, следует признать, что источником излучения является окисел.

Следует отметить, что далеко не любой слой  $\text{SiO}_2$  может быть возбужден излучением с энергией кванта 3.68 eV. В наших экспериментах ни термические окислы на кремнии или карбиде кремния (в том числе на указанных пленках), полученные в сухом кислороде, ни аналогичные термические окислы, полученные в парах воды, данным излучением не возбуждались и, естественно, дополнительно не люминесцировали.

Спектры ФЛ, измеренные после вакуумных отжигов пленок 65, электрохимически окисленных в течение 2 и 10 min, показали, что воздействие отжига на поведение упомянутых двух спектральных полос существенно различно, что, по-видимому, связано с различной природой их источников излучения. На рис. 5 показано изменение положения энергетических максимумов обеих спектральных полос ФЛ для образца 65-4 в результате последовательных отжигов. Положение максимума зелено-голубой полосы существенно смещается к более низким энергиям, в то время как положение синей полосы изменяется достаточно слабо.

На рис. 6 показаны также спектры ФЛ образцов пористого кремния, полученных как из *n*-, так и из *p*-Si, прошедших описанную выше процедуру электрохимического окисления длительностью 10 и 15 min. Видно, что спектры слоев ФЛ, приготовленных путем электрохимического окисления пленок SiC/Si и пористого кремния, существенно различаются как по интенсивности излучения, так и по его спектральному составу. Последнее указывает на то, что структура и состав окислов, получаемых на *por*-Si и на упомянутых выше пленках SiC, не одинаковы. По-видимому, это различие связано в первую очередь с наличием углерода в окислах, получаемых на пленках SiC.

Таким образом, из приведенных данных можно предположить два варианта объяснения механизма наблюдаемой ФЛ. 1) Приготовленный на пленке SiC электрохимический окисел содержит некие локальные центры (комплексы), обуславливающие появление в его запрещенной зоне примесной зоны, отстоящей от валентной зоны менее чем на 3.7 eV, а также уровней рекомбинации, обеспечивающих наблюдаемую ФЛ. Большая ширина спектральной полосы ФЛ может быть связана как с наличием нескольких уровней рекомбинации, так и с микропористостью окисла. 2) Другой возможный вариант объяснения связан с ФЛ малых квантово-размерных кластеров SiC, которые могли бы остаться в объеме окисла после электрохимического травления.

**2.3. Электронная микроскопия.** Как указывалось выше, для изучения структуры пленок и получаемых на них окислах использовалась просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), причем наблюдение осуществлялось в торец пленки.

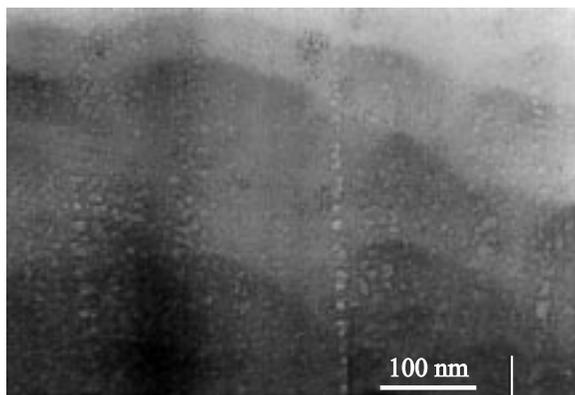
Исходные пленки SiC/Si имели мелко мозаичную структуру с характерными размерами неоднородностей 50–60 nm. Однако указанные области были также, по-видимому, структурно неоднородны и состояли из малых ( $\sim 5\text{--}6 \text{ nm}$ ) участков с разным контрастом (разной толщины), выявленных травлением ионами аргона при приготовлении образца для ПЭМ.

В результате электролитического окисления объем слоя несколько увеличивался и становился более однородным. Никаких кристаллитов SiC на фоне аморфного окисла визуально обнаружено не было. Также не наблюдалось каких-либо точечных рефлексов на картинах микродифракции, полученных в различных участках наблюдаемого сечения пленки.

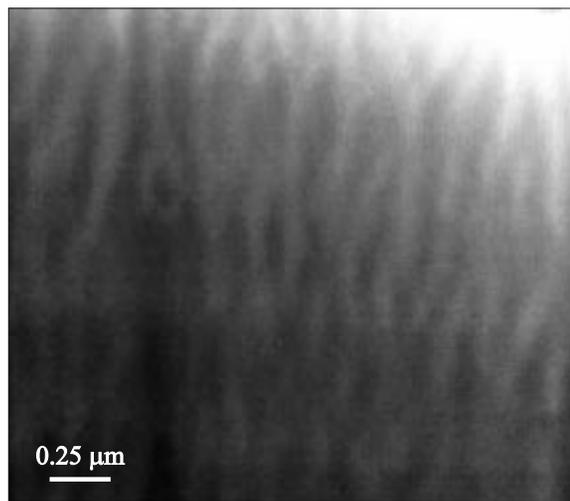
Следует, однако, заметить, что в процессе электронно-микроскопического наблюдения в отдельных „точках“ поперечного сечения окисленного слоя (65-4) в результате воздействия электронного пучка наблюдались быстро затухающие вспышки катодолюминесценции (КЛ). Размер этих областей был порядка 2–3 nm.

На рис. 7 показана микрофотограмма поперечного сечения окисленного слоя образца 65-2 (длительность окисления 4 min). Виден некий рельеф в виде слоев разной толщины, образовавшийся в процессе приготовления образца для ПЭМ при ионном травлении. Кроме того, наблюдаются светлые пятна, расположенные в виде вертикальных цепочек поперек слоя с расстояниями между ними 100–260 nm. По-видимому, их наличие как-то связано с линиями тока и неоднородностями исходной пленки SiC в процессе электрохимического травления при приготовлении окисного слоя.

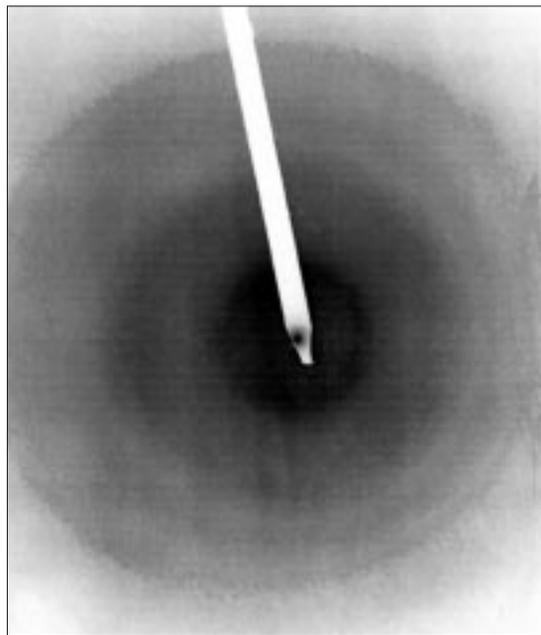
На рис. 8 показана микрофотограмма поперечного сечения окисного слоя для образца 65-4 (длительность



**Рис. 7.** Микрофотограмма поперечного сечения окисленного слоя (4 min) пленки SiC.



**Рис. 8.** Микрофотограмма поперечного сечения окисленного слоя (10 min) пленки SiC.



**Рис. 9.** Микродифракционная картина для окисленного слоя, показанного на рис. 8.

окисления 10 min). Здесь структура окисла уже иная. Видна квазипериодическая структура неких вертикальных (поперек слоя) образований с периодом  $\sim 180$  nm.

Таким образом, можно думать, что окисные слои в данных образцах являются неоднородными по толщине, и, возможно, пористыми.

Анализ колец микродифракции (рис. 9) для слоя, окисленного в течение 10 min, показывает, что окисел является аморфным.

### 3. Обсуждение результатов

Результаты элементного анализа показывают, что атомы углерода равномерно распределены в объеме окисла. Связь наблюдаемых полос излучения с наличием углерода подтверждается данными работ [6,10], где близкие по спектру полосы ФЛ возникали после введения атомов углерода либо в SiO<sub>2</sub>, либо в окисленный пористый кремний. В работе [10], в частности, предполагалось, что излучающими центрами в окисле являются малые кристаллиты SiC. В настоящей работе углерод мог бы также находиться в оставшихся после электрохимического окисления мелкодисперсных частицах SiC, однако такие кристаллиты не были обнаружены. Таким образом, необходимо заключить, что углерод, влияющий на характеристики спектра ФЛ, должен находиться в составе локальных комплексов со структурными дефектами окисла, полученного при травлении исходной пленки.

Анализ спектров ФЛ в различно приготовленных окислах SiO<sub>2</sub> проводился во многих работах [1–5,17,18]. Полоса ФЛ окислов, имеющая в максимуме энергию

кванта излучения  $\sim 2.65$  eV обычно хорошо наблюдается при энергиях кванта возбуждающего излучения в интервале 4.2–5.8 eV. В случае возбуждения ФЛ SiO<sub>2</sub> азотным лазером (3.68 eV) она оказывается единственной и довольно слабой, возникающей вследствие прямого синглет-триплетного возбуждения неких центров, являющихся структурными дефектами в SiO<sub>2</sub> [1]. Однако в отличие от приведенных здесь данных эта полоса ФЛ имела достаточно медленную кинетику спада, порядка  $9 \cdot 10^{-3}$  с. Авторы [1] указывают, что столь медленная кинетика спада связана с запрещенностью данного перехода в том числе и по спине.

Близкая по энергии квантов излучения довольно интенсивная зелено-голубая полоса ФЛ наблюдалась также в работе [6], где на образцы SiO<sub>2</sub> методом магнетронного распыления наносилась пленка углерода с последующим отжигом образцов в атмосфере азота. Однако ее кинетические характеристики в [6] не приведены.

В недавно опубликованной работе [17] изучались характеристики импульсных КЛ (ИКЛ) и ФЛ слоев SiO<sub>2</sub>, приготовленных пиролизом на воздухе полисилазана (H<sub>x</sub>C<sub>y</sub>N<sub>z</sub>Si). Разложение широких полос ИКЛ показало наличие спектральных полос 2.3, 2.7, 3.2 eV. Кинетика затухания ИКЛ характеризовалась двумя временами: 50 и 500 ns. В спектрах ФЛ также выделялись широкие полосы излучения с максимумами 2.7 и 3.1 eV. Правда, спектры возбуждения ФЛ, также измеренные в [17], оказались лежащими на энергетической шкале в пределах 4.5–8 eV. В настоящей работе отмечается, что указанные полосы ФЛ известны [18] для аморфных модификаций SiO<sub>2</sub> и соответствуют кислородно-дефицитным центрам (SiODC).

Следует, однако, подчеркнуть, что указанные в настоящей работе полосы излучения (2.61 и  $\sim 3$  eV), полученные для окисленных пленок SiC/Si, наблюдались при значительно меньшей энергии квантов возбуждения (3.68 eV) и имели еще более быструю кинетику затухания. Большая интенсивность излучения и быстрый его спад во времени ( $\leq 3 \cdot 10^{-8}$  s) указывают на наличие разрешенных переходов и, возможно, на близнецовый характер рекомбинации, характерный для достаточно малых кластеров.

Таким образом, можно предположить, что наблюдаемые в настоящей работе в спектре ФЛ окисленных слоев полосы связаны с ODC центрами в окисле, модифицированными наличием углеродных атомов. Сравнивая спектральные сдвиги, ширины и площади полос в табл. 2 для образцов с различной длительностью окисления, можно сделать вывод о том, что постепенный сдвиг синей полосы в сторону больших энергий с увеличением длительности окисления, а также уменьшение относительной доли этой полосы в спектре ФЛ могут быть связаны с уменьшением средних размеров неких излучающих квантово-размерных областей в объеме окисла и уменьшением их количества, а также нарастанием и частичной структурной модификацией всего объема окисла.

## 4. Заключение

Таким образом, описан новый материал, интенсивно люминесцирующий в широкой полосе длин волн. Данный материал может быть легко приготовлен и обладает весьма стабильными характеристиками. Высказано предположение о природе полос ФЛ.

Выражаем благодарность В.А. Смолину и Ю.Г. Лукьянову за помощь в проведении исследований на электростатическом ускорителе.

## Список литературы

- [1] L.N. Skuja, A.N. Streletsky, A.B. Pakovich. Sol. Stat. Commun. **50**, 1069 (1984).
- [2] А.Р. Силинь, А.Н. Трухин. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO<sub>2</sub>. Рига (1985). 244 с.
- [3] Ю.Д. Глинка, С.Н. Науменко, В.М. Огенко, А.А. Чуйко. Оптика и спектроскопия **71**, 431 (1991).
- [4] Yu.D. Glinka, Sheng-Hsien Lin, Yit-Tsong Chen. Appl. Phys. Lett. **75**, 778 (1999).
- [5] Yu.D. Glinka, Sheng-Hsien Lin, Yit-Tsong Chen. Phys. Rev. B **62**, 4733 (2000).
- [6] Q. Zhang, S.C. Bailiss, A. Al-Ajili, D.A. Hutt, P. Harris. NIM B **97**, 329 (1995).
- [7] Г.А. Качурин, И.Е. Тыщенко, В. Скорупа и др. ФТП **31**, 730 (1997).
- [8] L.T. Canham, A. Loni, P.D.J. Calcott, A.J. Simons et al. Thin Solid Films **276**, 112 (1996).
- [9] R. Guerrero-Lemus, J.D. Moreno, R.J. Martin-Palma, F. Ben-Handler et al. Thin Solid Films **354**, 34 (1999).
- [10] О.М. Сресели, Д.Н. Горячев, В.Ю. Осипов, Л.В. Беляков и др. ФТП **36**, 604 (2002).
- [11] А.М. Данишевский, В.Б. Шуман, Е.Г. Гук, А.Ю. Рогачев. ФТП **31**, 420 (1997).
- [12] А.М. Данишевский, А.Ю. Рогачев, В.Б. Шуман, Е.Г. Гук. ФТП **31**, 1387 (1997).
- [13] А.Н. Дюмин, В.К. Еремин, С.Г. Конников, В.М. Лебедев, Ю.Г. Лукьянов, Н.Б. Строкан. ЖТФ **63**, 166 (1993).
- [14] Т.К. Звонарева, Е.И. Иванова, Г.С. Фролова, В.М. Лебедев, В.И. Иванов-Омский. ФТП **36**, 734 (2002).
- [15] J.E. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark. The stopping and range of ions in solids. Pergamon Press, N. Y. (1985). 300 p.
- [16] D.M. Shirokov, V. Bohas. NIM B **84**, 497 (1993).
- [17] В.С. Кортов, А.Ф. Зацепин, С.В. Горбунов, А.М. Мурзакаев. ФТТ **48**, 1205 (2006).
- [18] L. Skuja. J. Non-Cryst. Solids **239**, 16 (1998).