

## О ПРИРОДЕ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

Д.И. Тетельбаум<sup>1)</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1)</sup>, Ю.А. Менделева<sup>1)</sup>, Е.А. Петриченко<sup>1)</sup>, С.В. Морозов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23/3, e-mail: Tetelbaum@phys.unn.ru

<sup>2)</sup>Институт физики микроструктур РАН, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105

Приведены экспериментальные результаты по фотолюминесценции ионно-синтезированной системы нанокристаллов Si в SiO<sub>2</sub>, свидетельствующие об одновременном вкладе двух механизмов излучательной рекомбинации – внутрикристаллитной и интерфейсной. Аналогичные механизмы обсуждаются для кремния, наноструктурированного путем ионного облучения монокристаллов.

### Введение

Наноструктуры с квантовыми точками на основе кремния перспективны для применения в оптоэлектронике, поскольку они обладают повышенной способностью к люминесценции при комнатной температуре. В настоящее время общепринято, что люминесценция в таких структурах связана с квантоворазмерным ограничением (конфайнментом), но отсутствует единая точка зрения относительно природы излучательных переходов. Наибольшее число работ посвящено пористому кремнию и нанокристаллам Si в SiO<sub>2</sub> (система SiO<sub>2</sub>:nc-Si). Для последней существуют две основные модели люминесценции. Согласно первой модели, излучение происходит между уровнями самого нанокристалла (межзонные переходы); другая модель предполагает схему переходов, в которой по крайней мере один из уровней, задействованных в излучении, локализован в области границы раздела (интерфейса) между нанокристаллом и матрицей. От решения этого вопроса зависят способы управления люминесцентными параметрами системы.

В настоящей работе приведены экспериментальные данные для системы SiO<sub>2</sub>:nc-Si, синтезированной путем ионной имплантации кремния в термически выращенные слои SiO<sub>2</sub>, позволившие предложить комбинированную модель фотолюминесценции (ФЛ), учитывающую действие обоих механизмов. Указано, что сходная ситуация имеет место и для другой наноструктурированной системы – кремния, облученного ионами.

### Основная часть

В качестве исходного материала для формирования системы SiO<sub>2</sub>:nc-Si использовались пленки SiO<sub>2</sub> (0,5 мкм), выращенные при 1100°C во влажном кислороде. Имплантация ионов кремния производилась с энергией 140 кэВ и дозой 1·10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup> (плотность тока не превышала 2 мкА/см<sup>2</sup>). После облучения производился отжиг при 1000°C и 1100°C (2 ч.) в атмосфере осушенного азота и на воздухе.

Облучение монокристаллического кремния марки КДБ-2000 (100) ионами Ne<sup>+</sup> осуществлялась с энергией 150 кэВ и дозами в

интервале 2-50·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>. Затем производился отжиг на воздухе при 300°C (0,5 ч.).

Измерения ФЛ проводились при комнатной температуре с возбуждением на 488 нм аргонового лазера.

На рис.1 приведены спектры ФЛ системы SiO<sub>2</sub>:nc-Si, полученной при отжигах в двух средах – потоке осушенного азота и на воздухе. Видно, что в общем случае спектры имеют двухпиковую структуру – кроме пика при ~ 750-800 нм, который типичен для систем с нанокристаллами Si [1-3], присутствует интенсивный пик при ~ 900 нм. На первый взгляд такую форму пика можно объяснить наличием нанокристаллов с различными размерами: в соответствии с теорией ФЛ квантовых точек [4,5] возрастание размеров квантовых точек должно приводить к

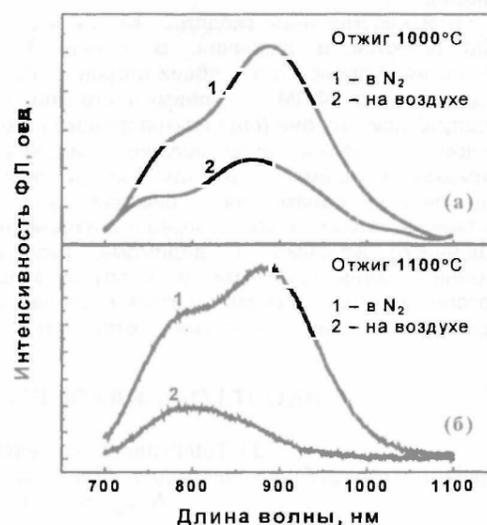


Рис.1. Спектры ФЛ системы SiO<sub>2</sub>:nc-Si, сформированной при 1000°C (а) и 1100°C (б)

сдвигу пика в длинноволновую область. Однако в этом случае пришлось бы допустить двухмодовое распределение нанокристаллов по размерам, что маловероятно. Кроме того, крупные нанокристаллы должны излучать с меньшей эффективностью, тогда как при отжиге в потоке

азота длинноволновый пик выражен сильнее коротковолнового.

Логичнее предположить, что двухпиковая структура спектра ФЛ обусловлена одновременным действием двух механизмов – межзонными переходами внутри нанокристаллов (пик при ~ 780 нм) и переходами с участием интерфейсных состояний (пик при ~ 900 нм). В пользу этого предположения свидетельствует то, что в случае отжига на воздухе при 1100°C длинноволновый пик практически исчезает. Это можно объяснить доокислением интерфейсных областей, влияющим на энергетический спектр состояний на границе раздела. Способ выращивания пленок SiO<sub>2</sub> также должен оказывать существенное влияние. (В отличие от данной работы, в работах, где пик при ~ 900 нм не наблюдался или был слабо выражен [6,7], слои SiO<sub>2</sub> выращивались в цикле «сухой-влажный-сухой»).

Известна другая система (a-Si:nc-Si), где наблюдается аналогичная двухпиковая структура ФЛ – это кремний, облученный ионами [8,9], причем, даже положения пиков близки к указанным выше. На рис.2 приведены типичные спектры ФЛ, полученные при облучении Si ионами Ne<sup>+</sup> с дозами в районе дозы

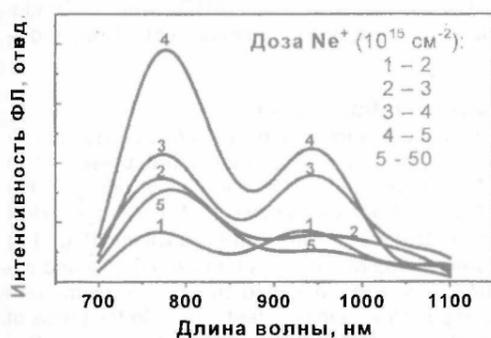


Рис.2. Спектры ФЛ системы a-Si:nc-Si, сформированной при облучении кремния ионами Ne<sup>+</sup>

аморфизации. В работах [8,9] коротковолновый пик (при ~ 750-800 нм) приписывался излучению нанокристаллов Si, а длинноволновый (при ~ 950 нм) – аморфной матрице (a-Si), которая формировалась при облучении ионами Kr<sup>+</sup>, Ge<sup>+</sup> и Ag<sup>+</sup>. В свете сказанного выше можно допустить, что длинноволновое излучение испускается из областей a-Si, прилегающих к нанокристаллам.

Состояние этих областей, по-видимому, близко к состоянию интерфейсных областей в системе SiO<sub>2</sub>:nc-Si. Действительно, согласно [10], в этой системе нанокристаллы Si окружены «рубашкой» a-Si. В системе a-Si:nc-Si интерфейсные области также могут быть частично окислены при облучении (атомы отдачи кислорода) и (или) при отжиге.

#### Заключение

Люминесценция систем нанокристаллов Si в красной и ближней ИК областях спектра в общем случае может быть обусловлена одновременным присутствием «внутрикристаллитной» и «интерфейсной» компонент, относительный вклад которых зависит от конкретных условий приготовления систем.

Работа выполнена при поддержке гранта INTAS (No.00-0064) и Программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы в приоритетных направлениях науки и техники».

#### Список литературы

1. Kachurin G.A., Tischenko I.E., Zhuravlev K.S., Pazdnikov N.A., Volodin V.A., Gutakovskiy A.K., Leiser A.F., Skorupa W., Yankov R.A. // Nucl. Instr. Meth. - 1997. - V.B122. - P.571.
2. Min K.S., Scheglov K.V., Yang C.M., Atwater H.A., Brongersma M.L., Polman A. // Appl. Phys. Lett. - 1996. - V.69. - P.2033.
3. Garrido Fernandez B., Lopez M., Garcia C., Perez-Rodriguez A., Morante J.R., Bonafos C., Carrada M., and Claverie A. // J. Appl. Phys. - 2002. - V.91. - P.798.
4. Delerue C., Lannoo M., and Allan G. // Phys. Rev. B. - 1993. - V.48. - P.11024.
5. Wang L.W. and Zunger A. // J. Phys. Chem. - 1994. - V.98. - P.2158.
6. Tetelbaum D.I., Gorshkov O.N., Trushin S.A., Revin D.G., Gaponova D.M., Eckstein W. // Nanotechnology. - 2000. - V.11. - P.295.
7. Tetelbaum D.I., Trushin S.A., Burdov V.A., Golovanov A.I., Revin D.G., Gaponova D.M. // Nucl. Instr. Meth. - 2001. - V.B174. - P.123.
8. Tetelbaum D.I., Trushin S.A., Krasil'nik Z.F., Gaponova D.M., Mikhailov A.N. // Optical Materials. - 2001. - V.17. - P.57.
9. Tetelbaum D.I., Ezhevskii A.A., Trushin S.A., Mikhaylov A.N., Azov A.Yu., Mukhamatullin A.K., Akis S.E., Gaponova D.M. // Material Science and Engineering B. - 2003. - In press.
10. Kachurin G. A., Yanovskaya S. G., Volodin V. A., Kesler V. G., Leiser A.F., and Ruault M.-O. // Semiconductors - 2002. - V.36. - P.647.

#### ABOUT THE NATURE OF PHOTOLUMINESCENCE OF SILICON NANOSTRUCTURES PRODUCED BY ION IMPLANTATION

D.I. Tetelbaum<sup>1)</sup>, A.N. Mikhaylov<sup>1)</sup>, Yu.A. Mendeleva<sup>1)</sup>, E.A. Petrichenko<sup>1)</sup>, S.V. Morozov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Physico-Technical Research Institute of University of Nizhny Novgorod, 23/3 Gagarin prospect, 603950, Nizhny Novgorod, e-mail: Tetelbaum@phys.unn.ru

<sup>2)</sup>Institute for physics of microstructures, GSP-105, 603950, Nizhny Novgorod

The experimental results on photoluminescence (PL) of ion-synthesized system of Si nanocrystals in SiO<sub>2</sub> are presented that evidence about simultaneously impact of two emission mechanisms – intracrystalline and interface-connected ones. The identical mechanisms are discussed for the Si nanostructured by the ion irradiation of monocrystals.