

*Нальгиева М. А., к.ф.-м.н.  
доцент кафедры общей физики  
Ингушский государственный университет  
Россия, г. Магас*  
*Баркинхоева Л. М., студентка магистратуры  
Ингушский государственный университет  
Россия, г. Магас*

**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ПРИ  
ТЕРМИЧЕСКИХ  
ОТЖИГАХ ПЛЕНОК ОКСИДА КРЕМНИЯ**

*Аннотация: представлены опытные сведения о виде энергетического распределения электронных состояний в зоне проводимости и в валентной зоне и для исследованных кремниевых наноразмерных структур. Определено то, что повышение пористости приводит к сдвигу дна зоны проводимости и также повышает ширину запрещённой зоны. Представлено то, что при естественном старении пористого кремния фотолюминесцентные свойства деградируют, что приводит к окислению слоя аморфного кремния, покрывающего развитую поверхность пористого слоя. После низкоэнергетической плазменной обработке пленок кристаллического кремния образуется диоксид кремния, по толщине существенно превышающий толщину естественного оксида кремния.*

*Ключевые слова: электронные состояния, пористый кремний, фотолюминесцентные свойства.*

**Nalgieva M.A., Ph.D.  
Associate Professor, Department of General Physics  
Ingush State University  
Russia, city of Magas**  
**Barkinhoeva L. M., graduate student  
Ingush State University  
Russia, city of Magas**

**The formation of silicon nanocrystals during thermal annealing  
of silicon oxide films**

*Abstract: Experimental data were obtained on the nature of the energy distribution of electronic states in the valence and conduction bands for all investigated nanoscale structures based on silicon and its compounds. It has been established that an increase in porosity leads to a shift in the bottom of the conduction band and increases the band gap. It was shown that during natural aging of porous silicon, the degradation of photoluminescent properties is accompanied by oxidation of the amorphous silicon layer covering the developed surface of the*

porous layer. During low-energy plasma treatment of crystalline silicon wafers, silicon dioxide is formed, the thickness significantly exceeding the thickness of natural silicon oxide.

Key words: electronic states, porous silicon, photo-luminescent properties.

Использованные материалы, включающие наноразмерные текстуры, притягивают серьёзный интерес в силу собственных оригинальных физических качеств. Подобные материалы обязаны отличаться квазиатомной энергетической структурой электронных состояний со следующими из этого особенными оптическими и электрофизическими качествами, значительной адсорбционной возможностью, а также химической активностью. По этой причине главные закономерности перемены электронного диапазона также predeterminedенные ими физические качества при применении к наноразмерным объектам остаются в фокусе интереса физики наноструктур также считаются в особенности важными.

Изучения полупроводниковых систем на базе кремния также его соединений считаются в особенности многообещающими вследствие того что, кремний – это главный использованный материал микроэлектроники, снижение объемов компонентов полупроводниковых устройств считается главной направленностью, в конечном итоге, умение наноматериалов в базе кремния довольно усиленно излучать видимый свет при комнатной температуре, в отличие от объемного кристаллического кремния, обязано послужить причиной ко формированию компонентов микросхем с перспективой совместного оптического и электрического обрабатывания данных.

С целью характеристики исследуемых структур проанализируем, в первую очередь в целом, сведения согласно их фотолюминесценции, во связи с обстоятельством формирования образцов. На Рис. 1 показаны спектры фотолюминесценции начальных пленок  $S_iO_x$ , с температурами подложки  $T_s=250, 300$  и  $350^\circ\text{C}$  (Рис. 1 а) и этих самых же плёнок, отоженных при температурах  $T_a = 900, 1000$  и  $1100^\circ\text{C}$  (Рис. 1 б, в, г).

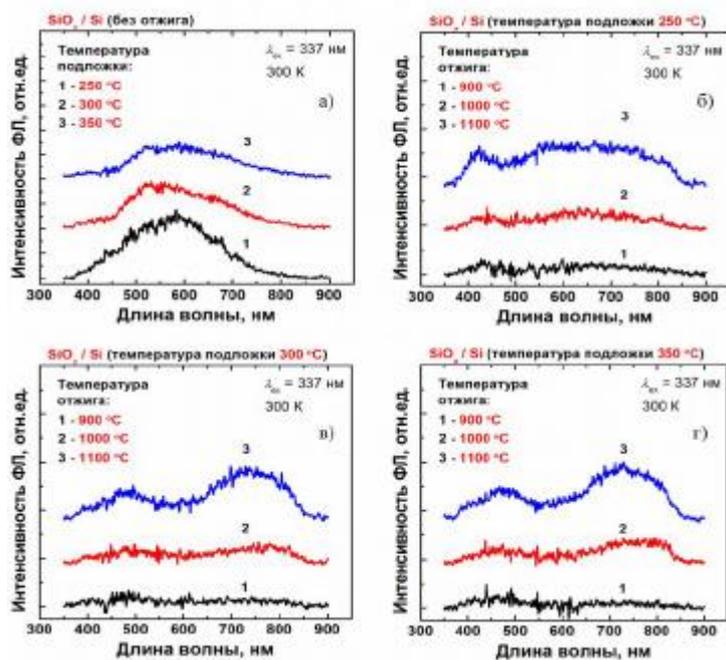


Рис. 1 Спектры ФЛ исходных пленок  $SiO_x$  (а) и пленок, отожжённых в интервале температур  $900-1100^\circ C$  (б, в, г) при трех температурах подложки.

Начальная пленка, осажденная при наименьшей температуре подложки, характеризуется присутствием обширной полосы ФЛ в области  $350-750$  нм (Рис.95 а, кривая 1) с наибольшим значением при  $575$  нм ( $2.17$  эВ). Данную ФЛ возможно объяснить излучением в одно и то же время нескольких видов дефектных центров в пленке нестехиометричного оксида – нейтральных кислородных вакансий и парамагнитных центров типа немостикового атома кислорода [1, 2].

С повышением температуры подложки интенсивность ФЛ в области  $500-600$  нм однообразно снижается, также планируется возникновение плеча в области  $600-700$  нм. Подобное действия интенсивности сопряжено со сокращением единого количества дефектов в образце и модификацией единичных кислородо-дефицитных центров в наиболее непростые образования – "нефазовые" включения и аморфные кластеры Si, в том числе и в неотожженных пленках [3].

Отжиг пленок  $SiO_x$  при высоких температурах приводит к почти полному гашению дефектной фотолюминесценции и также возникновению полосы в области  $700-800$  нм, что более четко проявлена в пленках, полученных при температуре подложки  $300$  и  $350^\circ C$  и отожженных при  $1100^\circ C$  (Рис. 1 в и г). ФЛ в данной области свойственна для межзонных излучательных переходов между уровнями размерного квантования в КТ Si с размером  $3-5$  нм [4]. Помимо этого, уже после отжига при высокой темпе-

ратуре возникает пик фотолюминесценции при  $\lambda \sim 470$  нм.

Для выяснения фазового строения аморфных пленок исследовались рентгеновские эмиссионные Si L<sub>2,3</sub>-спектры структур, показанные на Рис. 2. Спектр начального порошка SiO<sub>2</sub>, из которого изготавливались плёнки, кроме того спектры плёнок, изготовленных при температуре подложки 250°C и затем отожжённых при температуре T=1000°C и 1100°C. В данном исследовании глубина анализа была равна 60 нм.

Изучение энергетического диапазона валентных электронов согласно сведениям УМРЭС плёнок SiO<sub>x</sub>, разрешило определить, то что одновременно уже после нанесения плёнки в ней выявляется существенное число элементарного кремния. О данном говорит выражение в Si L<sub>2,3</sub>-спектре

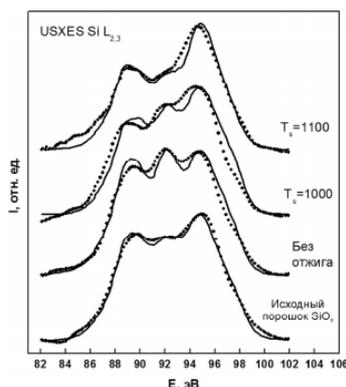


Рис. 2. УМРЭС Si L<sub>2,3</sub>-спектры исходного порошка SiO<sub>x</sub> и плёнок SiO<sub>x</sub>/Si с T<sub>s</sub>=250°C и различными температурами отжига.

эмиссии плёнки пика с энергией, равной главному максимуму кристаллического кремния (~92 эВ) (Рис. 2).

В то же время по обеим сторонам от этого максимума выражаются два максимума, свойственные для оксидов кремния (~89,4 эВ и 94,7 эВ). Наиболее подробные исследования диапазо-

на неотожжённой плёнки с помощью моделирования выявили то, что она включает около 43% нанокристаллического кремния (nc-Si), ~15% аморфного (a-Si) и 42% оксида SiO<sub>2</sub> (Табл. 16). Смоделированные спектры показаны на Рис. 2 (тонкие сплошные линии), также уровень их соотношения опытным спектрам устанавливает достоверность точности оценки содержания эталонных фаз в исследуемом слое. Изучение Si L<sub>2,3</sub>-эмиссионных спектров порошка "SiO", из которого изготавливались напыленные плёнки, выявило по наличию более слабо выраженного максимума при 92 эВ его значительное разложение на Si и SiO<sub>2</sub> уже на стадии хранения.

С увеличением температуры отжига плёнок со временем снижается относительная интенсивность максимума, принадлежащего элементарному кристаллическому кремнию (~92 эВ), также возрастает относительный вклад пиков, относящихся к диоксиду кремния. Но также уже после отжига 1100°C замечается низкая структура в спектре, объясняемая кристаллическим кремнием (23%).

Таким образом, развитие массивов нанокластеров кремния в матрице SiO<sub>2</sub> с помощью ионной имплантации также дальнейшего отжига дает возможность приобрести значительную часть нанокластеров с упорядоченной структурой - то есть в виде нанокристаллов. Одновременно, циклический набор дозы имплантации получается более эффективный способ, чем однократный набор общей дозы.

Получение нанокристаллов Si используя высокотемпературный отжиг тонкой пленки SiO<sub>x</sub> на кремниевой подложке приводит к расслоению этой пленки на области, не содержащие и содержащие нанокристаллы кремния в матрице SiO<sub>2</sub> с преимущественной ориентацией последних параллельно плоскости подложки.

#### Литература

1. Фотолюминесцентные свойства нанокристаллов кремния в зависимости от их размера // Физ. Rev. В. - 2000. - V. 62, N. 23. - P. 15942.Россия
2. The structure and electronic structure of the surface layers of silicon wafers after processing in a low-energy plasma of hydrogen and argon / С.Yu. Turishchev, V.A. Terekhov, Izvestiya VUZov - 2011. - No. 2, S. - 15 - 20.
3. Модификация поверхности и окисление кремниевых пластин после низкоэнергетической плазменной обработки в водороде, гелии и аргоне / С.Ю. Турищев В.А. Терехов, Е.В. // 2013. - Т. 16, вып. 6. - С. 1377 - 1381.
4. The structure and electronic structure of the surface layers of silicon wafers after processing in a low-energy plasma of hydrogen and argon / С.Yu. Turishchev, V.A. Terekhov, Izvestiya VUZov - 2011. - No. 2, S. - 15 - 20.