### РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

# Влияние энергии имплантации ионов Ar<sup>+</sup> на фотолюминесценцию пористого кремния

А.В. Кожемяко,<sup>1, а</sup> А.А. Шемухин,<sup>2,3</sup> А.В. Назаров,<sup>1</sup> Ю. М. Спивак,<sup>4</sup> Е.Н. Муратова,<sup>4</sup> В.В. Черныш<sup>1,2</sup>

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

<sup>1</sup> физический факультет, кафедра физической электроники;

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына;

<sup>3</sup> Центр квантовых технологий.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина).

Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

Поступила в редакцию 30.08.2020, после доработки 21.09.2020, принята к публикации 28.09.2020.

Проведено облучение пористого кремния ионами аргона с энергиями из диапазона 100–400 кэВ и ионным флюенсом  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Исследовано влияние ионного облучения при разных энергиях налетающих частиц на спектр фотолюминесценции пористого кремния. Показано, что спектр фотолюминесценции состоит из двух компонент, одна из которых объясняется присутствием дефектов в структуре, а другая — поверхностными состояниям на развитой поверхности пористого кремния. Предлагается метод оценки толщины люминесцирующего слоя, основанный на анализе пика фотолюминесценции, относящегося к дефектам.

*Ключевые слова*: пористый кремний, ионная имплантация, фотолюминесценция. УДК: 539.534.9, 538.971. PACS: 79.20.Rf.

#### введение

Благодаря своим фотолюминесцентным свойствам пористый кремний (p-Si) является перспективным материалом оптоэлектроники [1, 2]. P-Si также биосовместим и биоразлагаем, что делает возможным его использование для адресной доставки лекарств [3] и производства биосенсоров на его основе [4, 5]. Однако, несмотря на большое количество работ по исследованию фотолюминесценции (ФЛ) пористого кремния, до сих пор отсутствует единое мнение в отношении природы этого явления. Спектр фотолюминесценции p-Si имеет сложную структуру и представляет собой суперпозицию нескольких пиков, имеющих различную природу [6-9]. Чаще всего в качестве механизмов ФЛ p-Si рассматривается квантовое ограничение [1, 10, 11] либо присутствие поверхностных состояний и дефектов на границе раздела с-Si/SiO<sub>x</sub> [12-14].

При исследовании фотолюминесценции пористого кремния также необходимо учитывать толщину слоя, дающего вклад в спектр ФЛ. Данная величина определяется коэффициентом поглощения среды и глубиной проникновения излучения. Согласно [15] глубина проникновения равна 1/ $\alpha$ , где  $\alpha$  — коэффициент поглощения. В отличие от монокристаллического кремния, для которого имеются данные в широком диапазоне длин волн сканирующего излучения [16], пористый кремний — это сложная структура, состоящая из монокристаллического кремниевого остова, покрытого аморфным оксидом, и полостей. В зависимости от параметров травления можно получать структуры с различными пористостью, характерным размером кристаллической части, пор и примесями оксидной пленки. Согласно модели [17] коэффициент поглощения пористого кремния уменьшается

с увеличением пористости, что должно вызывать сильное увеличение глубины проникновения лазерного излучения, однако предложенная модель никак не учитывает присутствие аморфного оксидного слоя, дефектов границы раздела и самой кремниевой матрицы, которые приводят к увеличению коэффициента поглощения [18, 19]. Все это затрудняет оценку глубины проникновения лазерного излучения в пористый кремний, а сопоставление данных, приведенных в литературе, осложняется большим количеством параметров эксперимента и неполнотой описания структур. Например, в [20] для пористого кремния, полученного методом лазерного отжига в растворе 40% HF при мощности лазера 12 Вт/см<sup>2</sup> и длинах волн 1.06 мкм и 0.514 мкм, указано значение глубины проникновения 200 нм для лазера с длиной волны 458 нм, пористость полученной структуры не указана. А для лазера с длиной волны 436 нм в [21] приводится значение 1.7 мкм при проникновении в пористый кремний с пористостью 60-70%, полученный после траления пластины монокристаллического кремния в растворе 48 wt.% HF: C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O (1:2) при плотностях тока 8-40 мА/см<sup>2</sup>. В [22] для лазера с длиной волны 445 нм — глубина проникновения составляет 30 нм в пористом кремнии, полученном после травления пластины монокристаллического кремния в растворе плавиковой кислоты, изопропилового спирта и перекиси водорода при плотностях тока 15 и 50 мA/см<sup>2</sup>; при этом размеры пор составили 50 нм и 1.2 мкм соответственно. Значения пористости здесь также не указаны. Эти расхождения могут объясняться как различными параметрами, исследуемой структуры так и неточностью оценки.

Метод ионной имплантации активно используется для модификации материалов, внесения примесей и создания радиационных дефектов с высокой точно-

<sup>&</sup>lt;sup>*a*</sup> E-mail: anastasiia.kozhemyako@mail.ru

стью и повторяемостью [23-25]. Изменяя параметры облучения можно создавать примесные или дефектные слои на заданной глубине и с необходимыми концентрациями. Данный метод широко используется для управления ФЛ пористого кремния. Например, в [26, 27] ионная имплантация применяется для улучшения интенсивности и стабильности фотолюминесценции. Показано, что имплантация ионов кремния приводит к увеличению интенсивности ФЛ p-Si в 20 раз, а ионов кислорода — в 6 раз. Облучение гелием приводит к сдвигу полосы фотолюминесценции в коротковолновую область [28], а облучение ионами водорода или азота, наоборот, приводит к красному сдвигу максимума ФЛ [29, 30]. Облучение пористого кремния ионами золота приводит к синему сдвигу максимума полосы ФЛ и увеличению ее интенсивности [31]. Имплантация ионов кислорода приводит к появлению еще одного пика в спектре фотолюминесценции, интенсивность которого возрастает с ростом ионного флюенса [32].

В данной работе была проведена имплантация ионов  $Ar^+$  с энергиями 100–400 кэВ и флюенсом  $10^{12}~{\rm cm}^{-2}$  в пористый кремний. Аргон является благородным газом, поэтому не образует химических связей, при его имплантации создаются только дефекты, представляющие собой вакансию и атом в междоузлии. С ростом энергии внедряемых частиц растет их средний проективный пробег в веществе и толщина профиля распределения ионноиндуцированных дефектов. Таким образом, были созданы дефектные слои различной толщины. Сравнение спектров ФЛ пористого кремния до и после облучения позволит определить влияние ионноиндуцированных дефектов, их концентрации и положения на фотолюминесценцию пористого кремния.

#### 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Пленки пористого кремния были получены методом анодного травления в специальных электрохимических ячейках с использованием в качестве анода кремниевой пластины с-Si (100), которая помещалась в стеклоуглеродный тигель. Травление производили в растворе HF(25%):C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>OH 1:1 при плотности тока 10 мА/см<sup>2</sup> в течение 30 мин. Получаемая таким способом структура представляет собой столбчатые поры со средним диаметром 2 мкм и толщиной монокристаллической стенки примерно 200 нм (рис. 1). Пористость образцов составила примерно 63%. Для дальнейшего исследования отбирались участки кремниевой пластины, удаленные от края области травления, чтобы избежать эффектов от неоднородности.

Облучение ионами аргона проводилось на ускорителе HVEE-500 [24]. Линия имплантации содержит системы фокусировки ионного пучка и сканирования мишени, а также ловушку нейтральных частиц. Рабочее давление в камере не превышает 10<sup>-5</sup> Па. Для предотвращения влияния эффекта каналирования на профиль распределения ионов и ионноиндуцированных дефектов по глубине, имплантация проводилась под углом 7° к нормали.

Для оценки профиля распределения ионноиндуцированных дефектов при помощи программного кода SRIM&TRIM было проведено моделирование имплантации ионов аргона с энергиями



на монокристалле кремния, полученное методом растровой электронной микроскопии

100-400 кэВ в монокристаллический кремний. Учитывая особенности пористой структуры (столбчатые поры с толстыми стенками) и геометрию эксперимента, можно считать, что в монокристаллической части пористого кремния взаимодействие ионов с вешеством не отличалось от случая монокристалла. Рассчитанные профили распределения вакансий по глубине приведены на рис. 2. Видно, что с ростом энергии внедряемых ионов профиль распределения ионно-индуцированных дефектов становится шире, а максимум распределения сдвигается вглубь образца. У поверхности присутствуют дефекты при всех энергиях имплантации.

Спектры фотолюминесценции пористого кремния до и после ионного облучения были получены при комнатной температуре на установке «Зондовая нанолаборатория ИНТЕГРА Спектра» с использованием лазера с длиной волны излучения 473 нм; мощность лазера при измерении составляла 7 мВт/см<sup>2</sup>.

#### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены спектры фотолюминесценции пористого кремния до и после облучения. Необлученный пористый кремний демонстрирует ФЛ с максимумом на длине волны 634 нм. После облучения ионами аргона с энергией 100 кэВ максимум спектра смещается на длину волны 620 нм, интенсивность ФЛ возрастает почти в 10 раз. Интенсивность ФЛ пористого кремния после облучения ионами аргона с энергией 200 кэВ оказалась незначительно выше интенсивности фотолюминесценции исходной структуры, а после облучения ионами с энергией 300 кэВ возросла почти в пять раз. Максимумы спектров, полученных от образцов, облученных с энергиями 200 и 300 кэВ, находятся примерно на одной длине волны 615 нм, при этом спектр образца, облученного ионами с энергией 200 кэВ, имеет плечо в коротковолновой области спектра, отсутствующее в спектре ФЛ пористого кремния после облучения ионами с энергией 300 кэВ. Максимум спектра фотолюминесценции



Рис. 2. Профиль распределения вакансий, образовавшихся в пористом кремнии после облучения ионами аргона с энергиями 100 кэВ (кривая 1); 200 кэВ (кривая 2); 300 кэВ (кривая 3); 400 кэВ (кривая 4)



Рис. 3. Спектры фотолюминесценции пористого кремния до (кривая 1) и после облучения ионами Ar<sup>+</sup> с энергиями 100 кэВ (кривая 2); 200 кэВ (кривая 3); 300 кэВ (кривая 4); 400 кэВ (кривая 5)

пористого кремния, облученного с энергией 400 кэВ, находится на длине 634 нм, как и у необлученного образца, но наблюдается возрастание интенсивности примерно в восемь раз по сравнению с интенсивность фотолюминесценции необлученного пористого кремния.

Спектры ФЛ, представленные на рис. 3, имеют две ярко выраженные компоненты. При помощи двух функций Гаусса спектры ФЛ пористого кремния были представлены в виде суммы интенсивного пика с максимумом около длины волны 630 нм и более слабого пика с максимумом около 550 нм (рис. 4). При травлении и последующем контакте с атмосферой на развитой поверхности пористого кремния образуется аморфный оксид SiO<sub>x</sub>. Согласно [33] в структуре пористого кремния содержится большое количество различных кислородных и водородных соединений. Именно эти соединения могут отвечать за возникновение длинноволнового пика

с максимумом около длины волны около 630 нм. Согласно [12, 34-36] пик фотолюминесценции пористого кремния в области длин волн 620-670 нм объясняется образованием  $SiO_x$  и  $H_ySiO_x$ , группами Si-OH и другими соединениями кремния, а сдвиг пика — изменением длины связи люминесцентных центров, вызванным ионной имплантацией. Пик в коротковолновой области спектра 500-550 нм может объясняться люминесцирующими дефектами кремниевой матрицы, оксидного слоя или дефектами на границе раздела Si/SiO<sub>x</sub> [12, 14, 37], присутствующими в структуре пористого кремния после травления. Часто в качестве причины фотолюминесценции p-Si называют квантоворазмерные эффекты, связанные с нанокристаллами, присутствующими в структуре p-Si [10, 11, 38]. Согласно [39, 40] длина волны ФЛ определяется размером нанокристалла и проходит весть диапазон видимого излучения. Однако средняя толщина стенки исследуемого p-Si



Рис. 4. Спектры фотолюминесценции пористого кремния до и после облучения ионами Ar<sup>+</sup> с энергиями 100-400 кэВ (сплошная кривая) и их аппроксимация

равна примерно 200 нм, что значительно превышает размер структуры характерный для проявления квантоворазмерных эффектов [41]. Таким образом, данный механизм люминесценции в данной работе рассматриваться не будет.

Спектр фотолюминесценции пористого кремния, не подвергавшегося ионному облучению, состоит ИЗ интенсивного пика с максимумом на длине волны 634 нм и слабого пика на длине волны 550 нм (рис. 4). После облучения ионами аргона с энергией 100 кэВ интенсивность длинноволнового пика возрастает почти в 10 раз, а его максимум оказывается на длине волны 625 нм. Интенсивность коротковолнового пика возрастает примерно в два раза по сравнению с необлученным образцом, при этом положение его максимума остается неизменным. Согласно рис. 2, при имплантации ионов аргона с энергией 100 кэВ модифицируется приповерхностный слой толщиной 200 нм при этом средняя концентрация вакансий оказывается максимальной, по сравнению с профилями вакансий, индуцированных ионами при бо́льших энергиях, и составляет 7.4 · 10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>. При высоких концентрациях дефектов ускоряется диффузия кислорода при последующем контакте облученной пористой структуры с атмосферой [31], что приводит к активному образованию кислородных связей. Кроме того, при аморфизации возрастает коэффициент поглощения вещества [42], из-за чего значительно уменьшается глубина проникновения лазерного излучения. Этими факторами может объясняться значительное возрастание интенсивности длинноволнового пика, отвечающего за поверхностные состояния, и низкая интенсивность пика, относящегося к дефектам. Синий сдвиг длинноволнового пика может объясняться напряжениями в структуре, приводящими к увеличению длины связей люминесцентных центров, либо заменой водородной пассивации на кислородную.

Согласно рис. 2 при энергии ионов 200 кэВ профиль распределения вакансий распространен вглубь образца вплоть до 350 нм, но при этом средняя концентрация вакансий равна  $7.0 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. После облучения пористого кремния ионами с энергией 200 кэВ интенсивность фотолюминесцентного пика с максимумом на длине волны 550 нм возрастает в 12 раз, а интенсивность длинноволнового пика остается на уровне необлученного образца; положение максимумов обоих этих пиков остаются неизменными по сравнению со спектрами фотолюминесценции необлученного p-Si. Это может объясняться тем, что концентрация вакансий в этом случае оказывается наиболее эффективной для образования люминесцирующих дефектов, а профиль вакансий распространен достаточно сильно вглубь образца, что препятствует сильному окислению внутренней структуры пористого кремния.

Спектр ФЛ пористого кремния, облученного ионами с энергией 300 кэВ, демонстрирует пик с максимум на длине волны 617 нм и интенсивностью в 5 раз большей, чем интенсивность аналогичного пика необлученной структуры. Пик с максимумом на длине волны 550 нм не изменяет своего положения, а его интенсивность почти в два раза ниже, чем интенсивность аналогичного пика ФЛ образца, облученного ионами с энергией 200 кэВ, и в 4 раза выше по сравнению с интенсивностью аналогичного пика ФЛ необлученной структуры. Средняя концентрация вакансий, индуцированных при облучении ионами аргона с энергией 300 кэВ, ниже, чем при энергии 200 кэВ, и составляет  $6.6\cdot 10^{19}~{\rm cm}^{-3}$ . Также возможно, что возбуждающее фотолюминесценцию излучение не проникает на всю глубину распределения вакансий при данной энергии (до 400-500 нм). Этим объясняется сравнительное снижение интенсивности коротковолнового пика. Из возрастания интенсивности длинноволнового пика можно сделать вывод, что при данных параметрах имплантации на внутренней поверхности пористого кремния образуется большое количество оборванных связей, которые окисляются при контакте с атмосферой.

Спектр ФЛ образца, облученного с энергией 400 кэВ, демонстрирует длинноволновый пик, практически равный по интенсивности аналогичному пику при 100 кэВ, при этом интенсивность коротковолнового пика при энергии имплантации 400 кэВ совпадает с интенсивностью аналогичного пика у необлученного образца. При данной энергии средняя плотность индуцированных при ионном облучении вакансий наиболее низкая среди всех облученных образцов (6.1 · 10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>). Интенсивность коротковолнового пик на уровне исходного образца говорит о том, что при данной концентрации вакансий не происходит создания люминесцирующих дефектов, а происходит эффективное создание оборванных связей, образующих при контакте с кислородом поверхностные соединения, являющиеся люминесцентными центрами. Так же, как и в предыдущем случае, излучение, возбуждающее ФЛ, может не проникать на достаточную глубину и не достигать слоя с максимальной концентрацией дефектов (~ 400-500 нм), который бы мог повлиять на интенсивность коротковолнового пика. То есть для данного типа пористого кремния вклад в фотолюминесценцию дает приповерхностный слой толщиной около 400 нм. Таким образом, исследуя интенсивность коротковолнового пика, отвечающего за дефекты, можно оценить толщину люминесцирующего слоя.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом ионной имплантации в пленках пористого кремния созданы дефектные слои с различной концентрацией дефектов. Измерены спектры фотолюминесценции пористого кремния до и после облучения.

Показано, что спектр фотолюминесценции пористого кремния состоит из двух компонент. Фотолюминесценция с максимумом на длине волны 550 нм вызвана ионно-индуцированными дефектами. Фотолюминесценция с максимумом на длине волны около 630 нм может объясняться присутствием на развитой поверхности пористого кремния кислородных соединений, являющихся люминесцентными центрами. При концентрации дефектов  $7.4 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup> происходит сильное разупорядочение структуры, при котором происходит активное окисление, что препятствует образованию значительного числа люминесцирующих дефектов.

Предложен метод оценки толщины люминесцирующего слоя по анализу пика фотолюминесценции отвечающего за дефекты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-32-90174).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Canham L. T., Houlton M. R., Leong W. Y. et al. // J. of Appl. Phys. 1991. 70. № 1. P 422.
- Koshida N., Koyama H. // Appl. Phys. Lett. 1992. 60. P. 347.
- Park Ji-Ho, Gu Luo, von Maltzahn Geoffrey et al. // Nature Materials. 2009. 8. P. 331.
- Harraz Farid A. // Sensors and Actuators B. 2014. 202. P. 897.
- Syshchyk O., Skryshevsky V.A., Soldatkin O.O., Soldatkin A.P. // Biosensors and Bioelectronic. 2015.
   66. P. 89.
- 6. Yogesh K., Herrera M., Singh F. et al // Physics Procedia. 2012. 29. P. 12.
- Jacobsohn L. G., Bennett B. L., Cooke D. W. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 2006. 242. P. 164.
- Kumar Y., Herrera M., Singh F. et al. // Materials Science and Engineering B. 2012. 177. P. 1476.
- Son J. H., Kim H. B., Whang C. N., Chae K. H. // Applied Surface Science. 2004. 233. P. 288.
- Baratta G.A., Strazzulla G., Compagnini G., Longo P. // Applied Surface Science. 2004. 226. P. 57.
- 11. Praveenkumar S, Lingaraja D, Mahiz Mathi P, Dinesh Ram G. // Optik. 2019. 178. P. 216.
- Kopani M., Mikula M., Kosnac D. et al. // Applied Surface Science. 2018.
- Khawla Azaiez, Rabia Benabderrahmane Zaghouani, Saleh Khamlich et al. // Applied Surface Science. 2018.
   441. P. 272.
- 14. Chizhik A. I., Schmidt T., Chizhik A. M. et al. // Physics Procedia. 2011. 13. P. 28.
- Lehtinen O., Nikitin T., Krasheninnikov A. V. et al. // New J. Phys. 2011. 13. P. 073004.
- Green M.A., Keevers M.J. et al. // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 1995. 3, N 3. P. 189.
- Garahan A., Pilon L., Yin J., Saxena I. // J. Appl. Phys. 2007. 101. P. 014320.

- Strashnikova M. I., Voznyæ V. L., Reznichenko V. Ya., Gaævoronskiæ V. Ya. // JETP. 2001. 93, N 2. P. 363.
- Kadlecikova M., Breza J., Vanco L. et al. // Optik. 2018.
   174. P. 347.
- Mavi H. S., Rasheed B. G., Soni R. K. et al. // Thin Solid Films. 2001. 397. P. 125.
- 21. *Skryshevsky V.A.* // Applied Surface Science. 2000. **157**. P. 145.
- Kashkarov V. M., Lenshin A. S., Seredin P. V. // Modern Electronic Materials. 2016. 2. N 4. P. 127.
- Ieshkin A. E., Tolstoguzov A. B., Svyakhovskiy S. E. et al. // Technical Physics Letters. 2019. 45. N 1. P. 37.
- Evseev A. P., Kozhemiako A. V., Kargina Yu. V. et al. // Radiation Physics and Chemistry. 2020. 176. P. 109061.
- Shemukhin A. A., Nazarov A. V., Balakshin Yu. V., Chernysh V. S. // Nucl. Instr. Meth. B. 2015. 354. P. 274.
- Bhave T. M., Hullavarad S. S., Bhoraskar S. V. et.al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1999. 156. P. 121.
- Barbour J. C., Dimos D., Guilinger T. R., Kelly M. J. // Nanotechnology. 1992. 3. P. 202.
- Yamauchi Y., Sakurai T., Hirohata Y. et.al. // Vacuum. 2002. 66. P. 415.
- Tyschenko I.E., Volodin V.A., Popov V.P. // Nucl. Instr. Meth. B. 2012. 282 P. 73.
- Beloto A. F., Ueda M., Abramof E. et.al. // Nucl. Instr. Meth. B. 2001. 175–177. P. 224.

- 31. Sehrawat K., Singh F., Singh B.P., Mehra R.M. // Journal of Luminescence. 2004. **106**. P. 21.
- 32. Prabakaran R., Kesavamoorthy R., Amirthapandian S., Ramanand A. // Materials Letters. 2004. 58. P. 3745.
- Spivak Yu. M., Mjakin S. V., Moshnikov V. A. et al. // Journal of Nanomaterials. 2016. 2016. N 1. P. 1.
- 34. Абрамова Е.Н., Хорт А.М., Яковенко А.Г. // ДАН. 2018. 481, № 5. С. 503.
- Ramirez-Gutierrez C. F., Mosquera-Mosquera J. C., Rodríguez-García M. E. // Journal of Luminescence. 2018. 201. P. 11.
- Lenshin A. S., Seredin P. V., Kashkarov V. M., Minakov D. A. // Materials Science in Semiconductor Processing. 64. P. 71.
- 37. Torchynska T., Aguilar-Hernandez J., Diaz Cano A. I. et al. // Physica B. 2001. **310**. P. 1108.
- 38. Ali G.G., Karomi I.B., Sulaiman A.A., Mohammed A. M. // Nucl. Instr. Meth. B. 2020. 468. P. 23.
- Wolkin M. V., Jorne J., Fauchet P. M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. 82. P. 197.
- 40. Wu X.L., Xiong S.J., Fan D.L. et al. // Phys. Rev. B. 2000. 62. P. 7759.
- Гончар К. А., Мусабек Г. К., Таурбаев Т. И., Тимошенко В. Ю. // ФТП. 2011. 45. № 5. С. 625.
- 42. Kompan M. E., Novak I. I., Kulik V. B., Kamakova N. A. // Phys. Solid State. 1999. 41. P. 1207.

### The Influence of the Energy of $Ar^+$ Ion Implantation on the Photoluminescence of Porous Silicon

## A. V. Kozhemiako<sup>1,a</sup>, A. A. Shemukhin<sup>2,3</sup>, A. V. Nazarov<sup>1</sup>, Yu. M. Spivak<sup>4</sup>, E. N. Muratova<sup>4</sup>, V. S. Chernysh<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of physical electronics, Faculty of Physics;
<sup>2</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics;
<sup>3</sup>Center for Quantum Technologies, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.
<sup>4</sup>Department of Micro- and Nanoelectronics Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI». Saint Petersburg, Russia. E-mail: <sup>a</sup>anastasiia.kozhemyako@mail.ru.

Irradiation of porous silicon with  $Ar^+$  ions at energies from 100 to 400 keV and fluence of  $10^{12}$  cm<sup>-2</sup> was carried out. The effect of ion irradiation at different energies of incident particles on the photoluminescence spectrum of porous silicon has been studied. it has been shown that the photoluminescence spectrum consists of two components. One of then is associated with the presence of structural defects; another, with the surface states on the complex surface of porous silicon. A method for estimating the thickness of the luminescent layer based on the analysis of the photoluminescence peak associated with defects is proposed.

Keywords: porous silicon, ion implantation, photoluminescence.

PACS: 79.20.Rf.

Received 30 August 2020.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2020. 75, No. 6. Pp. 590-595.

#### Сведения об авторах

- 1. Кожемяко Анастасия Владимировна аспирантка; e-mail: anastasiia.kozhemyako@mail.ru.
- 2. Шемухин А.А. канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией.
- 3. Назаров А.В. мл. науч. сотрудник.
- 4. Спивак Ю. М. канд. физ.-мат. наук, доцент.
- 5. Муратова Е.Н. канд. техн. наук, науч. сотрудник.
- 6. Черныш В.С. доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой.