

# Формирование наночастиц Au и особенности травления подложки Si после облучения атомарными и молекулярными ионами

© М.С. Тужилкин<sup>1</sup>, П.Г. Беспалова<sup>1</sup>, М.В. Мишин<sup>1</sup>, И.Е. Колесников<sup>2</sup>, К.В. Карабешкин<sup>3</sup>,  
П.А. Карасев<sup>1</sup>, А.И. Титов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Ресурсный центр „Оптические и лазерные методы исследования вещества“,  
Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504 Петродворец, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Акционерное общество „Научно-производственное предприятие „ЭЛАР“,  
194223 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Tuzhilkin.Michael.1995@yandex.ru

Поступила в Редакцию 23 июля 2019 г.

В окончательной редакции 29 июля 2019 г.

Принята к публикации 29 июля 2019 г.

Исследовано образование наночастиц при облучении тонких металлических пленок золота быстрыми атомарными и молекулярными ионами. Полученные структуры были использованы для получения пористого кремния методом металл-ассистированного каталитического химического травления. Размер получаемых наночастиц золота и структура пористого кремния сильно зависят от типа и флюенса падающих частиц. Локальное повышение плотности выделения энергии у поверхности мишени при бомбардировке молекулярными ионами позволяет существенно снизить дозы, необходимые для формирования заданных морфологий пленки и распределения наночастиц на поверхности, оказывая в то же время меньшее радиационное воздействие на подложку. Форма спектров флуоресценции и спектров возбуждения флуоресценции пористого кремния, полученного из облученных структур, не зависит от параметров облучения, но изменяется в зависимости от концентрации травящего раствора.

**Ключевые слова:** золотые наночастицы, ионное облучение, молекулярные ионы, пористый кремний, флуоресценция.

DOI: 10.21883/FTP.2020.01.48782.9222

## 1. Введение

Наночастицы (NPs) металлов находят все более широкое применение в качестве катализаторов, активных элементов различных сенсоров, в медицине и т.д. [1–6]. Особый интерес вызывают наночастицы благородных металлов, в частности золота (AuNPs). Одним из методов получения AuNPs является химическое восстановление благородного металла из его соединений [2–4]. В результате такого процесса получается раствор, содержащий AuNPs, так называемое коллоидное золото. Данный способ известен людям и используется еще с давних времен, но получаемые таким образом наночастицы всегда покрыты слоем пассивирующих молекул, который останавливает рост размера частиц [2]. Данное обстоятельство может являться положительным, например, когда на этом слое впоследствии фиксируются специфические антигены и таким образом формируются избирательные сенсоры [2,5,6]. Однако есть целый ряд областей, в которых необходимо иметь чистую поверхность частиц, в частности для их применения в качестве катализаторов, когда необходим непосредственный контакт реагента с золотом [7,8]. Для этого были разработаны другие способы синтеза. В качестве безводного способа формирования наночастиц благородных металлов на твердых подложках было предложено

наносить тонкие металлические пленки и нагревать их до температур  $\sim (400–600)^\circ\text{C}$  [9]. Это позволяет получать частицы размером от 10 до 50 нм в зависимости от толщины исходной пленки, температуры и времени формирования. Кроме того, недавно было показано, что облучение быстрыми электронами [10] и ионами [11,12] тонких металлических пленок на поверхности различных подложек также приводит к образованию наночастиц. Данный способ потенциально может позволить тонко контролировать распределение размеров получаемых AuNPs путем варьирования параметров падающего пучка: тип ионов, энергия, доза. Существенное влияние на процесс формирования частиц из пленки может оказывать такой параметр, как плотность каскадов смещений, формируемых тормозящимися ионами [13]. Известно, что каскады большой плотности формируются тяжелыми ионами с энергией порядка нескольких десятков кэВ [14]. Однако такие ионы будут сильно разрушать структуру подложки. Ранее нами в [15,16] было показано, что локального повышения плотности упругого выделения энергии у поверхности мишени можно добиться при ее бомбардировке молекулами, состоящими из довольно легких атомов. Тогда под пленкой, где атомы, составляющие молекулу, уже расходятся на достаточное расстояние, повреждения будут существенно ниже, чем при об-

лучении тяжелыми одноатомными ионами. Вероятнее всего, повышение плотности каскадов смещений должно увеличивать эффективность формирования наночастиц. Однако этот вопрос до сих пор не исследован.

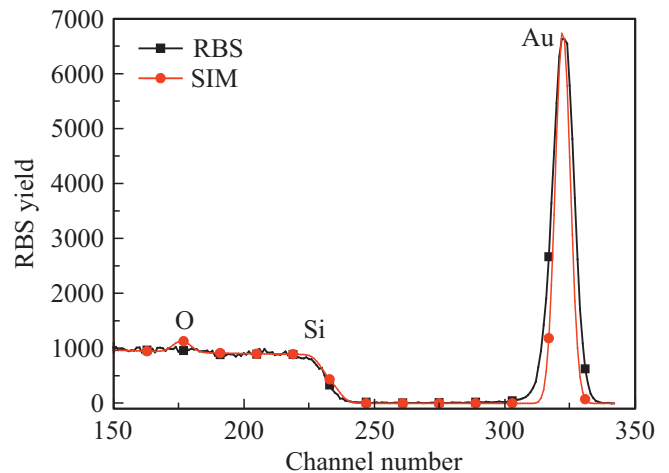
Как сказано выше, одним из способов практического применения AuNPs является их использование в качестве катализатора при химическом травлении (так называемый метод металл-ассистированного каталитического химического травления, metal-assisted chemical etching, MACE). Метод MACE — это простой и недорогой способ изготовления различных наноструктур, позволяющий в широких пределах управлять архитектурой поверхности, и вместе с тем подходящий для крупномасштабного производства. В частности, можно кристаллическую подложку Si частично покрыть благородным металлом, а затем погрузить в раствор, содержащий плавиковую кислоту и окислитель [7]. Поскольку металл действует как катализатор химических реакций, покрытые металлом области подложки вытравливаются, оставляя нетронутыми не покрытые части, позволяя тем самым получить пористый кремний (por-Si). Используя упомянутый выше метод облучения тонких пленок Au ионами, можно получать различные маски из AuNPs, управляя тем самым морфологией поверхности por-Si.

Пористый кремний в зависимости от морфологии может применяться для оптоэлектроники, фотоники, фотовольтаики, аккумуляции энергии и биозащиты [17–20]. Стоит упомянуть о способности por-Si к флуоресценции в видимом диапазоне (красный свет) при комнатной температуре под воздействием ультрафиолетового (УФ) возбуждения [20]. Особый интерес к флуоресценции пористого кремния вызван тем, что монокристаллический кремний является основным материалом полупроводниковой электроники. Однако он не пригоден для изготовления светоизлучающих устройств, так как является непрямозонным материалом и соответственно имеет низкую излучательную способность.

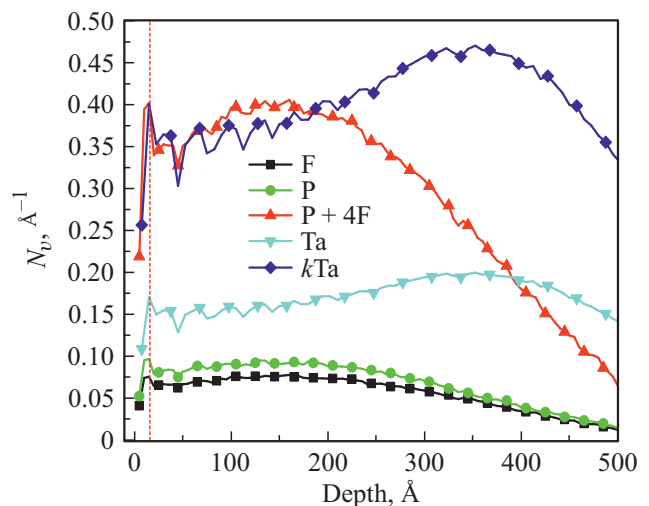
В данной работе мы, во-первых, сообщаем о результатах исследования модификации тонких золотых пленок атомарными и молекулярными ионами. Во-вторых, показываем влияние морфологии пленки и ионного облучения на свойства пористого кремния, создаваемого методом каталитического химического травления.

## 2. Методика эксперимента

Пленка золота толщиной 1.5 нм наносилась на монокристаллический кремний марки КЭФ-4.5 ориентации (100) методом термического испарения с вольфрамовой спирали. Средняя толщина пленки контролировалась массой испаряемого вещества и дополнительно проверялась методом резерфордовского обратного рассеяния (RBS) ионов гелия с энергией 0.7 МэВ. Обработка спектров RBS для определения толщины пленки проводилась с использованием свободно распространяемого пакета



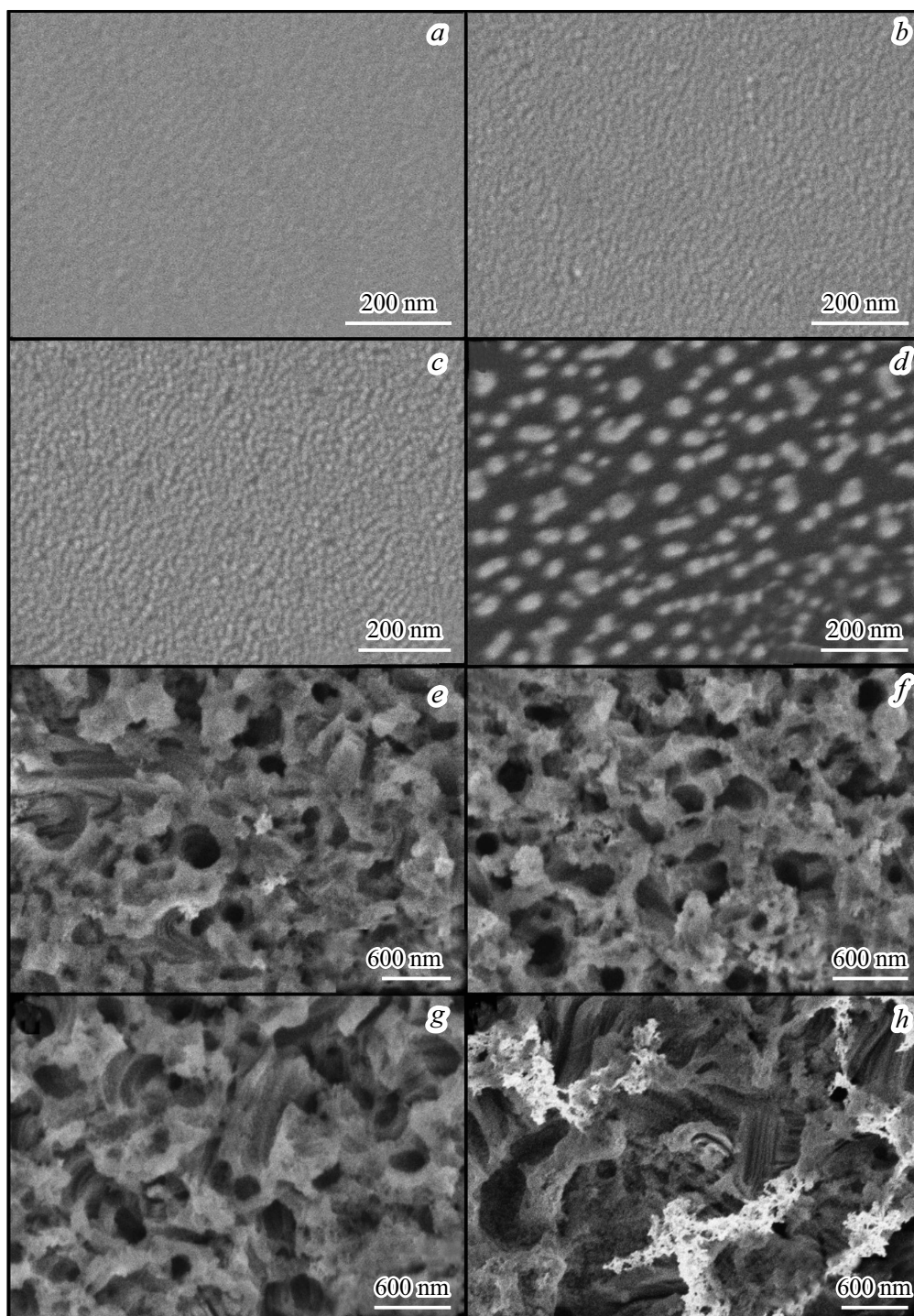
**Рис. 1.** Типичный RBS-спектр образца с напыленной пленкой Au (RBS) и модельная кривая (SIM) согласно расчету в пакете RUMP. Состав образца по результатам моделирования: Au (1 нм), SiO<sub>2</sub> (7 нм), Si.



**Рис. 2.** Зависимости среднего количества смещений атомов на единицу длины от глубины при попадании одной частицы. Границе пленки золота и поверхности кремния соответствует пунктирная линия. Расчет проведен в программе TRIM.

RUMP [21]. Типичный спектр и результат моделирования показаны на рис. 1. Видно хорошее совпадение обеих кривых при толщине пленки  $\sim 1$  нм. Уширение пика золота на экспериментальной кривой по сравнению с расчетной связано, по-видимому, с неоднородностью толщины золотой пленки по поверхности образца, что дополнительно подтверждается изображением пленки (см. далее).

Полученные покрытия облучались ионами Ta, BF<sub>2</sub> и PF<sub>4</sub> с энергией 0.65 кэВ/а.е.м. в диапазоне эквивалентных доз  $0.54 \cdot 10^{-4} - 2.7 \cdot 10^{-2}$  DPA (DPA — displacements per atom) при помощи имплантера HVEE 500 кВ. Здесь под DPA подразумевается полное число смещений, которое испытал каждый атом золотой пленки за время



**Рис. 3.** СЭМ-изображения не облученного образца (*a*) и образцов после облучения ионами  $\text{PF}_4$  до доз  $5.4 \cdot 10^{-4}$  (*b*),  $5.4 \cdot 10^{-3}$  (*c*),  $2.7 \cdot 10^{-2}$  (*d*), и тех же образцов после травления, соответственно *e, f, g, h*.

облучения. Численно эта величина определяется как  $\text{DPA} = g_m \Phi / n_{\text{at}}$ , где  $\Phi$  — флюенс ионов,  $g_m$  — среднее число вакансий, формируемое одним ионом на единицу толщины золотой пленки (определяется по результатам моделирования),  $n_{\text{at}}$  — атомная плотность пленки. Величины DPA рассчитывались в приближении парных столкновений при помощи кода TRIM. Для молекуляр-

ных ионов оценка DPA вычислялась как линейная сумма смещений, создаваемых атомами, составляющими молекулу. Результаты моделирования, необходимые для вычисления величины DPA для атомарных ионов (P, F, Ta) и молекулы  $\text{PF}_4$  приведены на рис. 2. Там же показано модифицированное распределение смещений ( $k \cdot \text{Ta}$ ), создаваемых ионами Ta, приведенное для достижения

Параметры облучения ионами

Ион	Энергия на атомную единицу массы, кэВ/а.е.м.	Энергия, кэВ	DPA			
			$5.4 \cdot 10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-4}$	$5.4 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-2}$
			Флюенс, $\text{см}^{-2}$			
PF <sub>4</sub>	0.65	69	$8 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{13}$
BF <sub>2</sub>	0.65	32	$1.5 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{12}$	$1.5 \cdot 10^{13}$	$7.5 \cdot 10^{13}$
Ta	0.65	117	$1.9 \cdot 10^{11}$	$1.9 \cdot 10^{12}$	$1.9 \cdot 10^{13}$	$9.5 \cdot 10^{13}$

одинаковой величины DPA с распределением для PF<sub>4</sub>. Полный перечень параметров облучения содержится в таблице.

Пористый кремний (por-Si) изготавливался методом металл-ассистированного каталитического химического травления. В качестве травителя применялся водный раствор, содержащий HF (12.8 M) и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (5.8 M) в двух пропорциях — 50 : 50 и 10 : 90. Образцы погружались в травитель при комнатной температуре на 60 мин, затем промывались дистиллированной водой и высушивались на воздухе.

Морфология исходных, облученных покрытий и полученных слоев por-Si изучалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе SUPRA 55VP-25-78. Спектры флуоресценции измерялись на спектрофлуориметре Fluorolog-3 (Horiba Jobin Yvon) при накачке на длине волны 400 нм. Кроме того, выполнялось измерение спектров возбуждения флуоресценции на длине волны, соответствующей максимуму интенсивности в спектрах флуоресценции в зависимости от длины волны возбуждающего излучения.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Облучение

На рис. 3 приведены СЭМ-изображения поверхности образцов сразу после нанесения золотой пленки (рис. 3, *a*) и в результате облучения дозами  $5.4 \cdot 10^{-4}$ ,  $5.4 \cdot 10^{-3}$  и  $2.7 \cdot 10^{-2}$  (рис. 3, *b, c* и *d* соответственно). Как видно на рис. 3, *a*, исходная необлученная пленка обладает неоднородной поверхностью, что позволяет выделить в ней некоторое подобие зернистой структуры. При облучении структуры ионами PF<sub>4</sub> в золотой пленке, во-первых, более явно формируются зерна, во-вторых, размеры этих зерен изменяются по сравнению с размерами неоднородности исходной пленки (рис. 3, *b, c* и *d*). Однако характер этих изменений зависит от дозы, с которой происходило облучение. При облучении пленки Au молекулярными ионами PF<sub>4</sub> с малой дозой средний размер зерен несколько уменьшается (см. рис. 3, *a, b, c*). На распределении размеров частиц это проявляется значительным увеличением числа мелких зерен по сравнению с первоначальной пленкой Au (см. далее). Такое воздействие наблюдается в широком диапазоне доз (около двух порядков), что видно

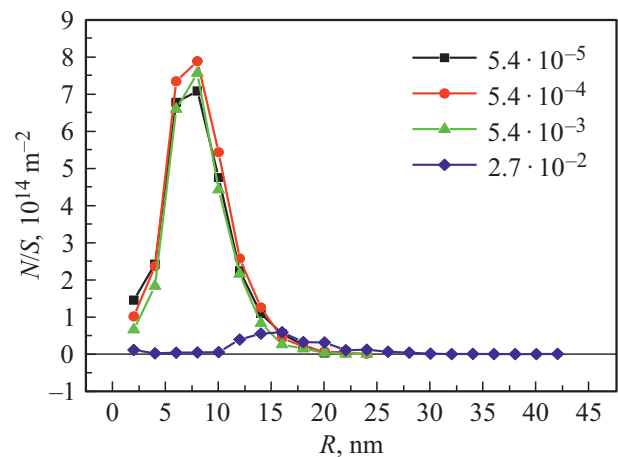
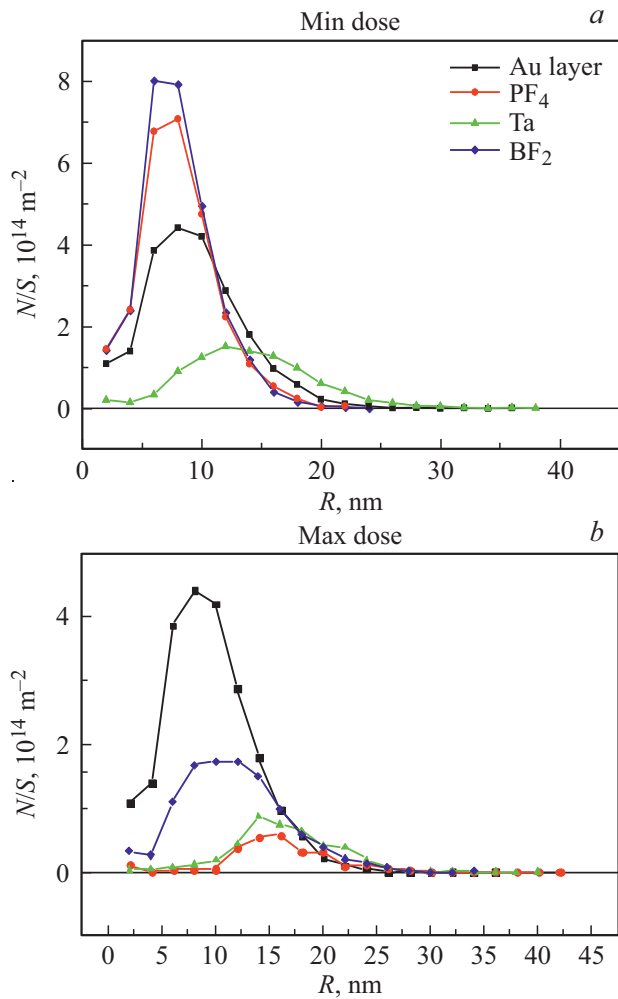


Рис. 4. Распределение концентрации частиц по размерам (по радиусу  $R$ ) при облучении ионами PF<sub>4</sub> с различными дозами (указаны).  $N/S$  — поверхностная концентрация частиц.

из рис. 4, на котором распределения концентрации частиц по размерам для 3 малых доз практически совпадают. При дальнейшем увеличении дозы ионов происходит резкий переход к разбиванию пленки Au и образованию наночастиц золота. Из рис. 4 видно, что максимум распределения частиц по размерам при самой большой дозе ионов резко переходит в область крупных частиц, а их количество при этом существенно уменьшается.

На рис. 5 приведены зависимости распределений размеров зерен после облучения различными ионами до самой малой (DPA =  $5.4 \cdot 10^{-5}$ , рис. 5, *a*) и самой большой (DPA =  $2.7 \cdot 10^{-2}$ , рис. 5, *b*) из использованных доз. Видно существенное различие в их воздействии на металлическую пленку. Для большей наглядности этих различий, произведенных ионами в пленке, приведена еще зависимость распределения размера зерен для необлученной пленки, одинаковая для обеих картинок. Из рис. 5 видно, что молекулярные ионы PF<sub>4</sub> и BF<sub>2</sub> при малой дозе уменьшают размер зерна (рис. 5, *a*), а при большой дозе разбивают пленку на AuNPs (рис. 5, *b*), тогда как для тяжелых атомарных ионов Ta отсутствует область доз, при которой наблюдается уменьшение размеров зерна. Во всем исследуемом промежутке доз при облучении ионами Ta происходило разбивание пленки Au ионами на фрагменты разного



**Рис. 5.** Распределение концентрации частиц по радиусу для различных ионов при дозах: *a* —  $5.4 \cdot 10^{-5}$ , *b* —  $2.7 \cdot 10^{-2}$ . Кривая „Au layer“ одинаковая и соответствует неровностям необлученной пленки Au.

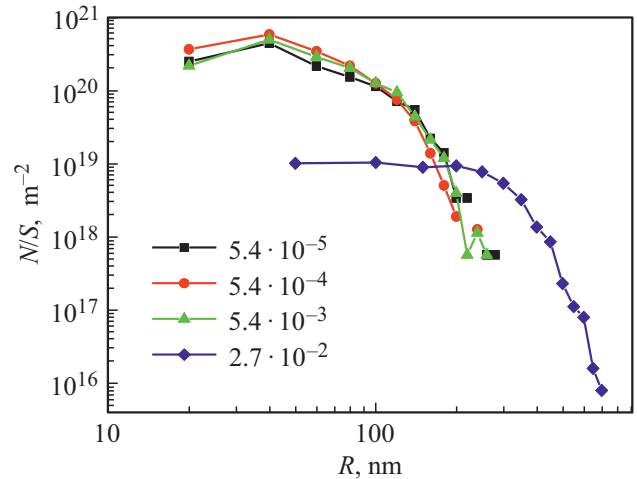
размера (рис. 5, *a*), вплоть до появления AuNPs при высоких дозах (рис. 5, *b*).

Подробнее остановимся на результатах облучения молекулярными ионами  $\text{BF}_2$ . В целом поведение золотой пленки при таком воздействии аналогично тому, что было получено для ионов  $\text{PF}_4$ : так же в широком диапазоне доз наблюдается уменьшение размера зерна по сравнению с необлученной пленкой. Однако при максимальной дозе эффективность разбивания пленки Au оказалась несколько меньшей, чем для иона  $\text{PF}_4$  с такой же дозой. Очевидно, что более легкому иону  $\text{BF}_2$  необходимо большее количество частиц для разбивания пленки Au, чем того требовалось для более тяжелого иона  $\text{PF}_4$ . Напомним, что сравнение выполняется при одинаковом количестве смещений, испытанных каждым атомом золота в пленке в рамках приближения парных столкновений. Наблюдаемое поведение можно объяснить тем, что молекулярные ионы отличаются по массам, что приводит к различным критическим значениям доз, при которых начинается переход от разравнивания

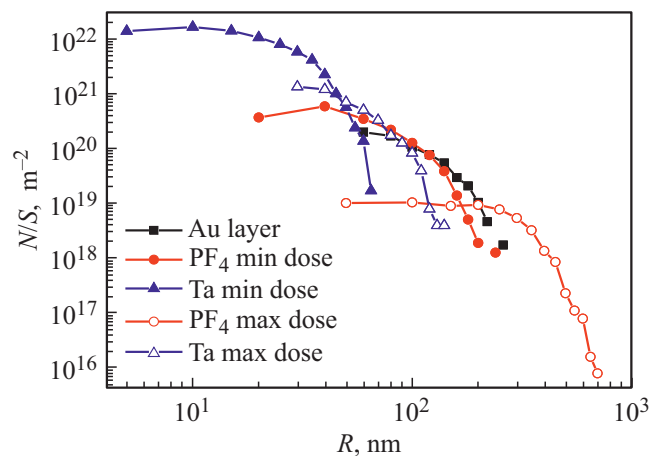
к разбиванию пленки Au, либо к различным длительностям перехода, либо к тому и другому одновременно.

### 3.2. Травление

Результаты, полученные при анализе протравленных образцов (рис. 3, *d, e, f*), качественно соответствуют распределениям AuNPs. Распределения пор для образцов, облученных  $\text{PF}_4$ , так же не изменяются в широком диапазоне доз, что видно на рис. 6. Точно так же 3 зависимости, соответствующие малым дозам, практически совпадают, и основная часть пор имеет малые размеры. При большой дозе распределение пор сильно изменяется, поры существенно увеличиваются в размерах, благодаря чему зависимость смещается вправо (рис. 6), но их количество уменьшается более чем на порядок (зависимость смещается вниз).



**Рис. 6.** Распределение концентрации пор по радиусу при облучении ионами  $\text{PF}_4$  с различными дозами.



**Рис. 7.** Распределение концентрации пор по радиусу для различных ионов при дозах: „Min dose“ —  $5.4 \cdot 10^{-5}$ , „Max dose“ —  $2.7 \cdot 10^{-2}$ . Кривая „Au layer“ соответствует распределению пор при травлении необлученной пленки Au.

Облученные ионами Ta образцы имеют более мелкие поры в большем количестве, чем не облученные образцы и облученные ионами PF<sub>4</sub> (рис. 7). Причиной этого может служить большее радиационное воздействие, производимое на кремниевую подложку атомарными ионами Ta при облучении пленки Au. Другими словами, Ta — тяжелый ион, который при попадании в образец летит глубоко и большое количество дефектов производит в дальних слоях подложки (~40 нм), что показано, в частности, на результатах моделирования процесса облучения (рис. 2). Молекула PF<sub>4</sub>, в свою очередь, это кластер из нескольких достаточно легких частиц, который при попадании в кремний рассыпается и создает дефекты в ближних слоях подложки (~10 нм). Кроме того, в статье [15] показано, что количество дефектов, образованных попаданием молекулы PF<sub>4</sub>, на практике оказывается в несколько раз больше, чем предсказывает моделирование в рамках приближения парных столкновений. В связи с этим можно сделать вывод, что травление проходит преимущественно по аморфизованному кремнию, в случае молекулярных ионов поры получаются широкие и в малом количестве, а в случае атомарных — узкие и в большом количестве, что и показано на рис. 7.

Фурье-анализ СЭМ-изображений протравленных образцов выявил только наличие ближнего порядка, свидетельствуя о том, что травление происходит случайным образом, без зависимости от кристаллографических направлений.

### 3.3. Спектры флуоресценции

На рис. 8 приведены спектры флуоресценции образцов, облученных различными ионами и в разных дозах. Интересным оказывается то, что ни тип иона, ни доза практически не влияют на форму спектра. На всех зависимостях максимум находится около 730 нм. Форма спектра меняется только при изменении параметров травления, т.е. соотношения концентраций травителя и окислителя.

В спектрах возбуждения флуоресценции (рис. 9) выделяются две компоненты: ультрафиолетовая и достаточно узкий пик в видимой области (611 нм), одинаковый для всех образцов. Напомним, что спектры возбуждения флуоресценции снимались на длине волны, соответствующей максимуму интенсивности спектров флуоресценции (730 нм). Ранее проводились работы по изучению флуоресценции пористого кремния (см., например, [20]) и, несмотря на то что *por-Si* изготавливался иным способом, получающиеся спектры флуоресценции и возбуждения флуоресценции достаточно хорошо совпадали с нашими результатами. Авторы работы [20] объясняют наличие УФ области с возбуждением *por-Si*. Кроме того, они утверждают, что с увеличением степени окисления Si до SiO<sub>2</sub> растет и интенсивность флуоресценции. Появление пика в видимой области, одинакового для всех образцов, можно объяснить наличием продуктов реакции, адсорбированных на поверхности *por-Si*, которые

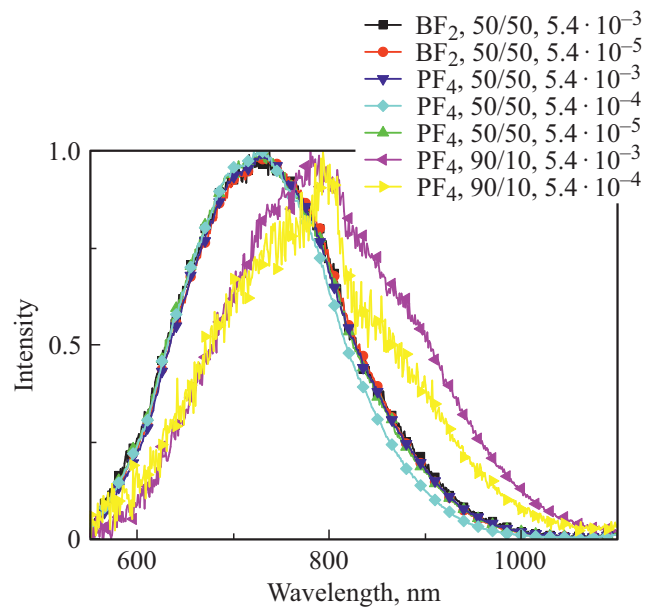


Рис. 8. Спектры флуоресценции, нормированные на максимум. Указаны тип ионов, схема травления и доза.

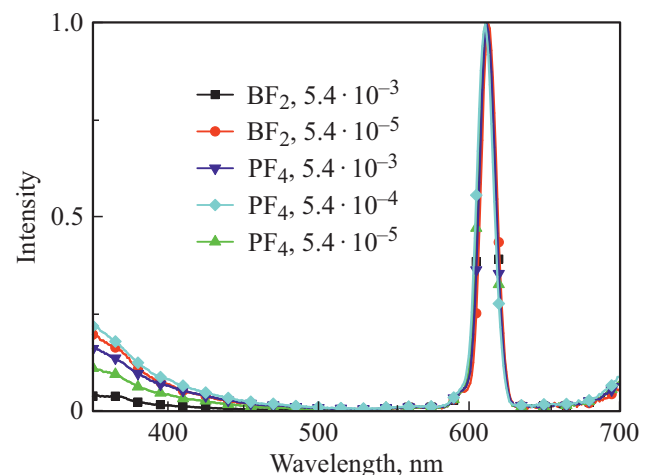


Рис. 9. Спектры возбуждения флуоресценции, нормированные на максимум. Указаны тип ионов и доза. Спектры сняты с образцов, травленных по схеме 50/50. Длина волны, на которой проводилось измерение, соответствует максимуму интенсивности спектров флуоресценции и равна 730 нм.

образовались при травлении, что также экспериментально подтверждено в работе [20]. Таким образом, основные особенности спектров флуоресценции не зависят от способа получения наночастиц.

## 4. Заключение

В работе исследовано поведение тонкой золотой пленки на поверхности кремния при ионном облучении и флуоресценция пористого кремния, полученного методом каталитического травления, активируемого фор-

мируемыми наночастицами. Из результатов видно, что изменение морфологии тонкой пленки золота на поверхности кремния при облучении молекулярными ионами (как  $\text{BF}_2$ , так и  $\text{PF}_4$ ) имеет более сложный характер зависимости от дозы, чем при облучении тяжелыми атомарными ионами Та. В широком диапазоне малых доз молекулярных ионов происходит уменьшение зерна пленки по сравнению с необлученной пленкой, а при высоких дозах происходит резкий переход к разбиванию пленки на наночастицы, причем степень разбивания зависит от типа иона. При облучении атомарными ионами Та разбивание Au пленки происходит во всем диапазоне исследуемых доз, и степень ее декомпозиции плавно растет с ростом дозы.

При каталитическом химическом травлении образцов, облученных молекулярными ионами, распределение образующихся пор качественно соответствует распределению наночастиц, образованных бомбардировкой до соответствующих доз. В образцах, облученных атомарными ионами Та, во всем диапазоне исследуемых доз образуются поры гораздо меньшего размера и в большем количестве, чем для образцов, облученных молекулярными ионами, и не облученных образцов. Обнаруженная разница связана с различной степенью разупорядочения решетки кремния ионами.

Форма спектров флуоресценции и спектров возбуждения флуоресценции не зависит от параметров облучения, но изменяется в зависимости от параметров травления: соотношения травителя и окислителя. Резонансный пик в спектрах возбуждения флуоресценции не является характерной особенностью  $\text{por-Si}$ , а относится к примесям, адсорбированным на поверхности образца.

## Благодарности

Спектрофлуориметрические измерения проведены в РЦ „Оптические и лазерные методы исследования вещества“, Научный Парк СПбГУ.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Z. Huang, N. Geyer, P. Werner, J. de Boer, U. Gösele. *Adv. Mater.*, **23** (2), 285 (2011).
- [2] R. Herizchi, E. Abbasi, M. Milani, A. Akbarzadeh. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, **44** (2), 1 (2014).
- [3] P. Suchomel, L. Kvitek, R. Prucek, A. Panacek, A. Halder, S. Vajda, R. Zboril. *Sci. Rep.*, **8**, 4589 (2018).
- [4] Y.-C. Yeh, B. Creran, V.M. Rotello. *Nanoscale*, **4** (6), 1871 (2012).
- [5] Tai-Chia Chiu, Chih-Ching Huang. *Sensors*, **9**, 10356 (2009).
- [6] V.K. Khanna. *Nanosensors: physical, chemical, and biological* (Taylor & Francis, 2012).
- [7] B. Hvolbæk, T.V.W. Janssens, B.S. Clausen, H. Falsig, C.H. Christensen, J.K. Nørskov. *Nano Today*, **2** (4), 14 (2007).
- [8] A. Corma, H. Garcia. *Chem. Soc. Rev.*, **37** (9), 2096 (2008).
- [9] F. Niekiel, P. Schweizer, S.M. Kraschewski, B. Butz, E. Spiecker. *Acta Materialia*, **90**, 118 (2015).
- [10] Yooseok Kim, Wooseok Song, Su-il Lee, Seung Youb Lee, Myoung-Jun Cha, Dae Sung Jung, Chong-Yun Park. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 223116 (2013).
- [11] J. Prakash, A. Tripathi, V. Rigato, J.C. Pivin, J. Tripathi, K.H. Chae, S. Gautam, P. Kumar, K. Asokan, D.K. Avasthi. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 125302 (2011).
- [12] R. LoSavio, L. Repetto, P. Guida et. al. *Solid State Commun.*, **240**, 41 (2016).
- [13] A.I. Titov, P.A. Karasev, A.Yu. Azarov, S.O. Kucheyev. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, **267**, 2701 (2009).
- [14] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, **268**, 1818 (2010).
- [15] К.В. Карабешкин, П.А. Карасев, А.И. Титов. *ФТП*, **50**, 1009 (2016).
- [16] A.I. Titov, P.A. Karasev, V.S. Belyakov, K.V. Karabeshkin, A.V. Arkhipov, S.O. Kucheyev, A.Yu. Azarov. *Vacuum*, **86**, 1638 (2012).
- [17] H. Han, Z. Huang, W. Lee. *Nano Today*, **9**, 271 (2014).
- [18] Kui-Qing Peng, Xin Wang, Li Li, Ya Hu, Shuit-Tong Lee. *Nano Today*, **8**, 75 (2013).
- [19] F. Priolo, T. Gregorkiewicz, M. Galli, T.F. Krauss. *Nature Nanotechnol.*, **9**, 19 (2014).
- [20] Н.Е. Корсунская, Т.В. Торчинская, Б.Р. Джумаев, Л.Ю. Хоменкова, Б.М. Булах. *ФТП*, **31** (8), 908 (1997).
- [21] L.R. Doolittle. *Nucl. Instr. Meth. B*, **15**, 227 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова

## Formation of gold nanoparticles by irradiation with accelerated monatomic and molecular ions

M.S. Tuzhilkin<sup>1</sup>, P.G. Bepalova<sup>1</sup>, M.V. Mishin<sup>1</sup>,  
I.E. Kolesnikov<sup>2</sup>, K.V. Karabeshkin<sup>3</sup>,  
P.A. Karasev<sup>1</sup>, A.I. Titov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
195251 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Resource Center „Optical and Laser Methods for  
Research of Substances“  
St. Petersburg State University,  
198504 St. Petersburg, Petrodvorets, Russia

<sup>3</sup> Joint Stock Company „Research  
and Production Enterprise „ELAR“,  
194223 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Formation of metal nanoparticles by thin gold film irradiation with accelerated atomic and molecular ions is shown. Structures obtained were etched by metal-assisted catalytic chemical etching to get porous silicon. Size of gold nanoparticles and the structure of porous silicon strongly depend on kind of incident species and ion fluence. A local increase in the energy release density at the target surface that takes place during molecular ion bombardment significantly reduce the doses required for the formation of predetermined film morphology and the spreading of nanoparticles on the surface, while at the same time molecules exhibit lower radiative effect on the substrate. Luminescent properties of porous silicon do not depend on the kind of ion used, and can be tuned by composition of the etching solution.