



## Оригинальные статьи

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3119>

Поступила в редакцию 24.08.2020

Принята к публикации 01.09.2020

Опубликована онлайн 25.12.2020

ISSN 1606-867X

eISSN 2687-0711

УДК 538.975

## Структурная перестройка пленок $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ при импульсном фотонном отжиге

© 2020 В. А. Терехов<sup>а</sup>, Е. И. Теруков<sup>б</sup>, Ю. К. Ундалов<sup>б</sup>, К. А. Барков<sup>а✉</sup>, И. Е. Занин<sup>а</sup>,  
О. В. Сербин<sup>а</sup>, И. Н. Трапезникова<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Воронежский государственный университет,  
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

<sup>б</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

### Аннотация

Аморфные пленки  $\text{SiO}_x$  с нанокластерами кремния представляют собой новый интересный материал как с точки зрения физики и технологии, так и возможных практических приложений, поскольку благодаря размерному квантованию такие пленки могут обладать фотолюминесценцией. При этом оптическими свойствами данных структур можно управлять, варьируя размеры и содержание нанокластеров кремния в пленке  $\text{SiO}_x$ , а также путем преобразования нанокластеров в нанокристаллы с помощью высокотемпературного отжига. Однако в процессе отжига нестехиометрического оксида кремния могут происходить значительные изменения фазового состава и структуры пленок. Результаты исследований кристаллизации нанокластеров кремния в матрице  $\text{SiO}_x$  показали, что даже при очень быстром способе отжига с помощью импульсного фотонного отжига происходит образование достаточно крупных кристаллитов кремния, при этом наблюдается кристаллизация, по крайней мере, части оксидной фазы в виде гидроксида кремния  $\text{H}_2\text{O}_7\text{Si}_2$ . Причем в пленках с исходным содержанием нанокластеров чистого кремния  $\leq 50\%$  при отжиге часть кремния уходит на формирование оксида, а часть на образование кристаллов кремния, а в пленке с исходной концентрацией нанокластеров кремния  $\geq 53\%$  наоборот при отжиге происходит частичный переход кремния из оксидной фазы в рост кристаллов Si.

**Ключевые слова:** нанокластеры кремния, нанокристаллы кремния, субоксиды кремния, импульсный фотонный отжиг, ИФО, ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия, УМРЭС.

**Источник финансирования:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90234.

Частично исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания FZGU-2020-0036.

**Для цитирования:** Терехов В. А., Теруков Е. И., Ундалов Ю. К., Барков К. А., Занин И. Е., Сербин О. В., Трапезникова И. Н. Структурная перестройка пленок  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  при импульсном фотонном отжиге. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(4): 489–495. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3119>

**For citation:** Terekhov V. A., Terukov E. I., Undalov Yu. K., Barkov K. A., Zanin I. E., Serbin O. V., Trapeznikova I. N. Structural rearrangement of  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  films with pulse photon annealing. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2020; 22(4): 489–495. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3119>

✉ Барков Константин Александрович, e-mail: [barkov@phys.vsu.ru](mailto:barkov@phys.vsu.ru)



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Диэлектрические пленки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с нанокластерами и нанокристаллами кремния вызывают большой интерес, т. к. благодаря размерному квантованию такие пленки могут обладать фото- и электролюминесценцией. При этом если при создании кремниевой структуры используются низкотемпературные процессы типа ионно-плазменных, плазмохимических и т. д., то можно формировать [1–4] пленки  $\text{SiO}_x\text{:H}$  с нанокластерами, от размеров которых будет зависеть область люминесценции. В случае использования высокотемпературных процессов при  $T \geq 1000$  °С, как это происходит при радиационном отжиге образцов ионно-имплантированных большими дозами кремния [5] или при отжигах нестехиометрического оксида [5–8], можно формировать нанокристаллы кремния в матрице пленки диэлектрика, размеры и концентрация которых также будут определять люминесцентные свойства этих пленок [9–11].

В работах [1, 3, 4] было показано, что используя модулированную плазму DS-магнетрона в камере, содержащей 80 % Ar + 20 %  $\text{SiH}_4$ , можно в широких пределах задавать количество нанокластеров  $ncl\text{-Si}$  в аморфных пленках  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ , и тем самым легко управлять оптическими свойствами пленок. Поэтому представляет интерес преобразовать аморфные пленки  $a\text{-SiO}_x$  с нанокластерами в пленки с нанокристаллами кремния путем высокотемпературного отжига. Однако при высокотемпературном отжиге пленок  $\text{SiO}_x$  происходит восстановление кремния из нестехиометрического оксида [8]. При этом появление в пленке  $a\text{-SiO}_x + ncl\text{-Si}$  избыточного кремния будет приводить к увеличению размеров нанокристаллов в результате их коалесценции, и, как следствие, к гашению фотолюминесценции. Поэтому в данной работе с целью формирования нанокристаллов кремния ( $nc\text{-Si}$ ) малых размеров предлагается провести кратковременный импульсный фотонный отжиг (ИФО) пленок  $a\text{-SiO}_x$  с нанокластерами кремния.

## 2. Эксперимент

В рамках данной работы были исследованы образцы пленок  $a\text{-SiO}_x\text{:H} + ncl\text{-Si}$  (толщиной 400 нм) трех составов с содержанием нанокластеров кремния около 15, 50 и 53 %. Исследуемые пленки были получены с помощью модулированной плазмы DC-магнетрона при температуре Si (100) подложки  $T_s = 265$  °С. В качестве рабочего газа использовалась смесь 80 % Ar + 20 %  $\text{SiH}_4$  с добавлением кислорода ~15.5 мол. %

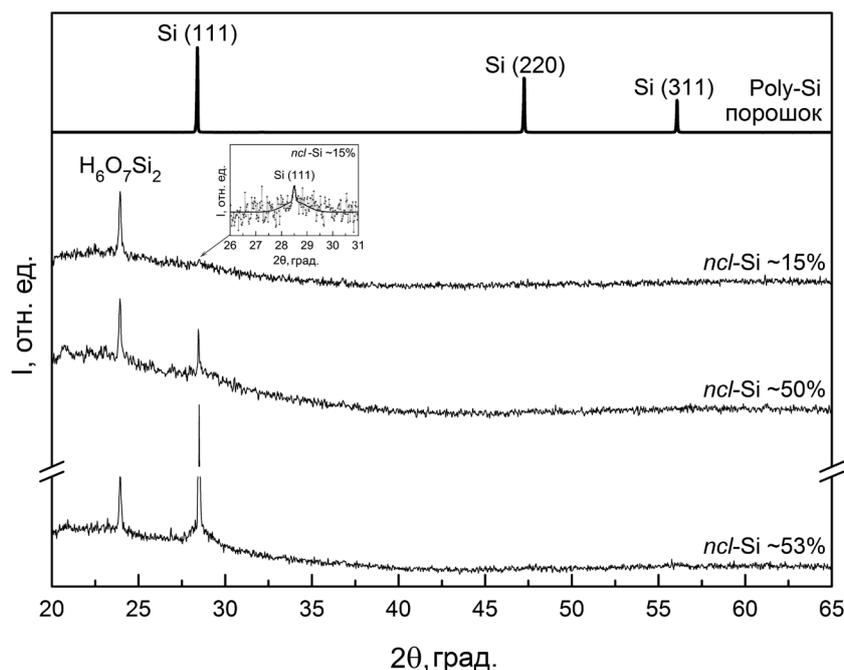
[4]. Эти образцы были отожжены в вакууме ( $10^{-5}$  Торр) с помощью ИФО [12]. Для ИФО использовалась установка УОЛП-1М, оснащенная тремя газоразрядными ксеноновыми лампами с рабочим диапазоном длин волн  $\lambda = 0.2\text{--}1.2$  мкм и работающая в импульсном режиме с длительностью импульса  $\sim 10^{-2}$  с. Отжиг образцов проводился со стороны подложки, т. к. оптическое излучение ксеноновой лампы проходит слой  $\text{SiO}_x$  почти без поглощения, и вся энергия поглощается в кремниевой подложке, что может привести к отщелкиванию пленки  $\text{SiO}_x$  в результате возникающих больших напряжений на границе пленка  $\text{SiO}_x$  – подложка  $c\text{-Si}$ .

Исследование возможности образования нанокристаллов кремния проводилось с помощью рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре PANalytical Empyrean B.V. с монохроматизированным  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучением в ЦКПНО ВГУ. Кроме того, для одновременного контроля как кристаллических, так и аморфных фаз на основе кремния, пленки анализировались с помощью ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) на спектрометре РСМ-500 [13, 14]. В этом случае пленка облучалась быстрыми электронами с энергией 3 кэВ, что соответствует глубине анализа 60 нм [15], и анализировалось характеристическое рентгеновское  $\text{Si } L_{2,3}$  излучение, возникающее в результате переходов электронов из валентной зоны на вакансию основного Si  $2p$  уровня. Таким образом, метод УМРЭС дает информацию об энергетическом распределении валентных электронов по всей валентной зоне, что позволяет обнаруживать наличие связей Si-Si или Si-O независимо от степени упорядоченности атомной структуры пленки [13–16].

## 3. Результаты и их обсуждение

### 3.1. Рентгенодифрактометрические исследования

На рис. 1 приведены дифрактограммы пленок  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ , отожженных с помощью ИФО двумя дозами  $140 \text{ Дж/см}^2 + 180 \text{ Дж/см}^2$ . Отжиг в  $140 \text{ Дж/см}^2$  не привел к кристаллизации частиц в пленке. Дополнительный отжиг в  $180 \text{ Дж/см}^2$  привел к появлению двух рефлексов кристаллических фаз ( $c\text{-Si}$ ) при  $2\theta = 23.94$  и  $28.9^\circ$ . Рефлекс при  $28.9^\circ$  соответствует межплоскостному расстоянию  $d = 3.13 \text{ \AA}$ , а при  $23.94^\circ$  –  $d = 3.71 \text{ \AA}$ . Поиск по международной базе кристаллографических данных [17] показал, что если плоскость с  $d = 3.13 \text{ \AA}$  легко можно отнести к кристаллическому кремнию, и появление этого рефлекса связа-



**Рис. 1.** Дифрактограммы эталонного порошка poly-Si и образцов  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  после ИФО  $140+180 \text{ Дж/см}^2$  с содержанием  $ncl\text{-Si}$  – 15 %, 50 % и 53 %

но с кристаллизацией нанокластеров кремния, то рефлекс с  $d = 3.71 \text{ \AA}$  можно объяснить образованием гидроокиси кремния  $\text{H}_6\text{O}_7\text{Si}_2$  (рис. 1) [18]. Образование гидроокиси  $\text{H}_6\text{O}_7\text{Si}_2$  при отжиге можно объяснить тем, что исходные пленки  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ , полученные в магнетронной плазме, содержат большое количество водорода, который при нагреве легко вступает в реакцию с радикалами  $\text{SiO}_x$ .

Сопоставительный анализ дифрактограмм образцов с различным содержанием нанокластеров кремния от ~15 до 53 % обнаруживает, что изменение на дифрактограммах носят ожидаемый характер (рис. 1). В пленке с небольшим (~15 %) содержанием нанокластеров кремния наибо-

лее интенсивный рефлекс обусловлен гидроксидом кремния  $\text{H}_6\text{O}_7\text{Si}_2$ , а рефлекс от  $c\text{-Si}$  достаточно слабый (рис. 1). В образце с содержанием нанокластеров около 50 % интенсивность кремниевое ( $c\text{-Si}$ ) рефлекса Si (111) резко возрастает. Но интенсивность рефлекса от гидрооксида остается чуть более высокой. В образце с максимальной концентрацией кремниевых кластеров (53 %) после отжига рефлекс кристаллического кремния становится преобладающим (рис. 1). Таким образом, рост концентрации нанокластеров кремния в исходной пленке  $\text{SiO}_x$  при отжиге приводит к увеличению содержания  $c\text{-Si}$  так, что интенсивность рефлекса Si (111) возрастает примерно на порядок (табл. 1).

**Таблица 1.** Положение и интенсивности рефлексов на дифрактограммах пленок  $a\text{-SiO}_x$  с различным содержанием  $ncl\text{-Si}$

Образец	Принадлежность фазе	Положение дифракционной линии $2\theta$ , град.	Межплоскостное расстояние $d$ , $\text{\AA}$	Интенсивность, имп./с	Относительная интенсивность, %
$ncl\text{-Si}$ 15 %	$\text{H}_6\text{O}_7\text{Si}_2$ Si(111)	23.9366	3.71461	396	100.00
		28.4907	3.13035	45	11.52
$ncl\text{-Si}$ 50 %	$\text{H}_6\text{O}_7\text{Si}_2$ Si(111)	23.9323	3.71525	282	100.00
		28.4663	3.13297	222	78.84
$ncl\text{-Si}$ 53 %	$\text{H}_6\text{O}_7\text{Si}_2$ Si(111)	23.9406	3.71399	331	9.47
		28.4924	3.13016	3496	100.00
Poly-Si порошок (эталон)	Si(111)	28,4020	3,1399	23365	100.00
	Si(220)	47.2600	1.922	14749	63.12
	Si(311)	56.081	1.6386	8159	34.92

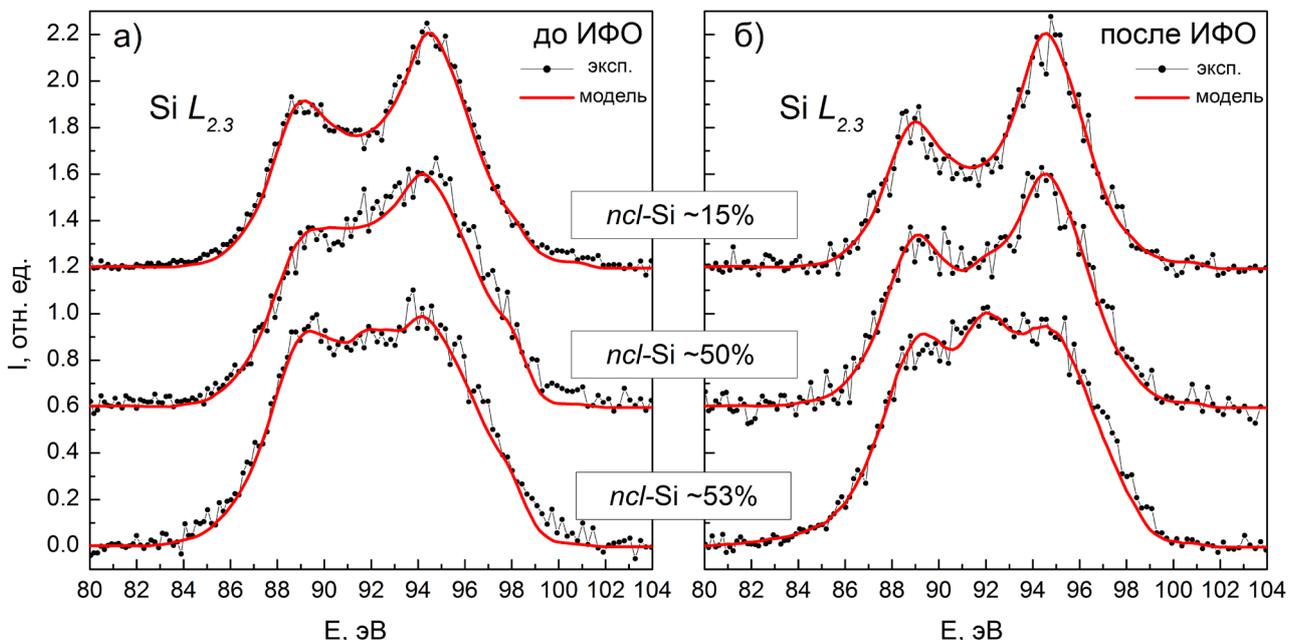
Однако резкий рост фазы кристаллического кремния нельзя объяснить только увеличением концентрации кремниевых кластеров в исходной пленке, т. к. это увеличение не велико (50 %  $\rightarrow$  53 %), поэтому далее нами были проведены исследования по оценке содержания не только кристаллических, но и аморфных кремниевых фаз в этих пленках методом УМРЭС [13–16].

### 3.2 Ультратонкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия

На рис. 2 приведены рентгеновские эмиссионные  $\text{Si } L_{2,3}$ -спектры исследуемых пленок до (а) и после ИФО (б), полученные при глубине анализа 60 нм (экспериментальные спектры изображены точками, спектры, смоделированные на основе эталонов, – сплошной линией), а на рис. 3 приведены  $\text{Si } L_{2,3}$  спектры эталонов  $c\text{-Si}$ ,  $a\text{-Si}$ ,  $\text{SiO}_{1.3}$ ,  $\text{SiO}_{1.7}$  и  $\text{SiO}_2$ .  $\text{Si } L_{2,3}$ -спектры субоксидов  $\text{SiO}_{1.3}$  и  $\text{SiO}_{1.7}$  взяты из работы [14]. Как видно из этого рисунка, спектры отожженных пленок, также как исходных, явно отличаются вкладом компонент тонкой структуры, обусловленной наличием связей Si-O (особенности при 89.5 и 94.5 эВ), а также связей Si-Si (максимум 92 и 89.6 эВ) (рис. 2). При этом в отожженной пленке с минимальным первоначальным количеством кремния ~15 % спектр близок к спектру чистого  $\text{SiO}_2$  (рис. 2 и 3). Сопоставление со спектром исходной пленки (рис. 2а) свидетельствует об

уменьшении интенсивности в области 92 эВ, т. е. в области главного максимума спектра в  $c\text{-Si}$ , что говорит об уменьшении содержания элементарного кремния в пленке после отжига. Причем анализ фазового состава пленок по результатам моделирования  $\text{Si } L_{2,3}$ -спектров (табл. 2) в пределах погрешности ~5 % кремний кристаллический не обнаруживает, что и следовало ожидать по характеру  $\text{Si } L_{2,3}$ -спектра пленки  $\text{SiO}_x$  ( $ncl\text{-Si}$  15 %) после отжига. В то же время рентгеновская дифракция обнаруживает небольшое количество кристаллов Si в пленке  $\text{SiO}_2$  (рис. 1). В образце с большим содержанием кремния ~50 %, если сравнивать с исходной пленкой (рис. 2а и б), отжиг также приводит к уменьшению вклада тонкой структуры, обусловленной элементарным кремнием, т. е. к уменьшению доли фазы кремния в композитной пленке по сравнению с исходной аморфной пленкой.

В то же время в пленке с максимальным содержанием нанокластеров кремния (~53 %) отжиг приводит к другому характеру изменений в соотношении оксидных фаз и элементарного кремния, а именно в  $\text{Si } L_{2,3}$ -спектре после отжига основным максимумом становится максимум от  $c\text{-Si}$  при 92 эВ (рис. 2б), и вклад оксидной фазы уменьшается. Фазовый анализ с помощью компьютерного моделирования спектров (моделированные спектры приведены на рис. 3а и б сплошной линией), результаты которого при-



**Рис. 2.** Рентгеновские эмиссионные  $\text{Si } L_{2,3}$ -спектры пленок  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  с различным содержанием нанокластеров кремния до ИФО(а) [4] и после ИФО (б). Экспериментальные спектры изображены точками, спектры смоделированные на основе эталонов – сплошной линией

**Таблица 2.** Фазовый состав пленок  $\text{SiO}_x$  с различным содержанием  $ncl\text{-Si}$  после ИФО по данным УМРЭС

Номер образца	$c\text{-Si}$ , %	$\text{SiO}_{1.7}$ , %	$\text{SiO}_2$ , %	Погрешность, %
$ncl\text{-Si} \sim 15\%$	–	30	70	~10
$ncl\text{-Si} \sim 50\%$	25	15	60	
$ncl\text{-Si} \sim 53\%$	60	–	40	

ведены в табл. 2, подтверждает наши качественные рассуждения.

Эти результаты делают понятными необычный резкий рост интенсивности рефлекса кремния после отжига пленки с исходным содержанием нанокластеров  $ncl\text{-Si} \sim 53\%$ . Т. е., если в пленках с содержанием  $ncl\text{-Si} < 50\%$  при отжиге часть кремния окисляется и не участвует в образовании кристаллов кремния, а при содержании  $ncl\text{-Si} \geq 53\%$ , т. е. когда в структурной сетке преобладают атомы кремния, часть атомов кремния восстанавливаются из  $\text{SiO}_x$ , т. е.  $\text{SiO}_x$  распадается  $\text{SiO}_x \xrightarrow{t^\circ} \text{Si} + \text{O}_2$  и участвует в образовании кристаллов кремния [8]. Поэтому мы и наблюдаем резкий рост интенсивности рефлекса кремния на дифрактограммах пленок  $\text{SiO}_x$  с большим исходным содержанием  $ncl\text{-Si}$ .

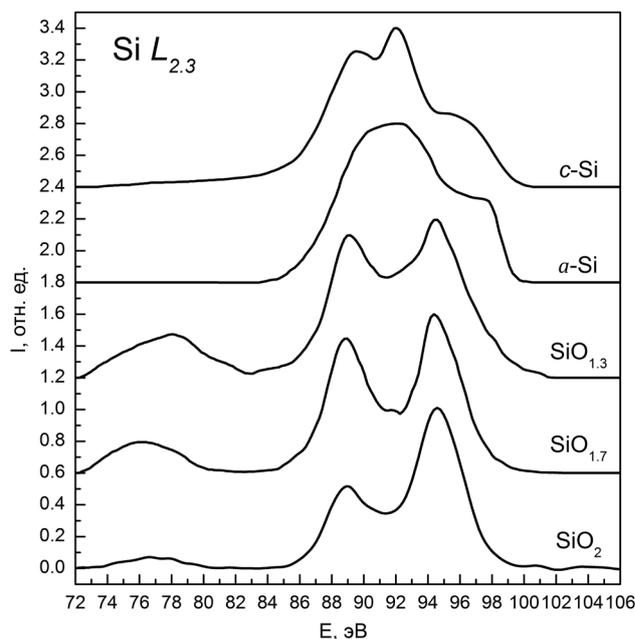
#### 4. Заключение

Таким образом, результаты исследований по кристаллизации нанокластеров кремния в матрице  $\text{SiO}_x$  показали, что даже при очень быстром способе отжига с помощью ИФО происходит образование достаточно крупных кристаллитов кремния, при этом наблюдается кристаллизация, по крайней мере, части оксидной фазы в виде гидроокиси кремния  $\text{H}_6\text{O}_7\text{Si}_2$ . Причем в пленках с исходным содержанием нанокластеров чистого кремния  $\leq 50\%$  при отжиге часть кремния уходит на формирование оксида, а часть на образование кристаллов кремния, а в пленке с исходной концентрацией нанокластеров кремния  $\geq 53\%$ , наоборот при отжиге происходит частичный переход кремния из оксидной фазы в рост кристаллов  $\text{Si}$ .

#### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90234.

Частично исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания FZGU-2020-0036.



**Рис. 3.** Рентгеновские эмиссионные  $\text{Si } L_{2,3}$ -спектры в кристаллическом кремнии  $c\text{-Si}$ , в пленке аморфного кремния  $a\text{-Si}$ , в нестехиометрических оксидах кремния  $\text{SiO}_{1.3}$  и  $\text{SiO}_{1.7}$  [14] и в диоксиде кремния  $\text{SiO}_2$

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

#### Список литературы

1. Undalov Y. K., Terukov E. I., Silicon nanoclusters  $ncl\text{-Si}$  in a hydrogenated amorphous silicon suboxide matrix  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  ( $0 < x < 2$ ). *Semiconductors*. 2015;49(7): 867–878. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782615070222>
2. Kim K. H., Johnson E. V., Kazanskii A. G., Khenkin M. V., Roca P. Unravelling a simple method for the low temperature synthesis of silicon nanocrystals and monolithic nanocrystalline thin films. *Scientific Reports*. 2017;7(1) DOI: <https://doi.org/10.1038/srep40553>
3. Undalov Y. K., Terukov E. I., Trapeznikova I. N. Formation of  $ncl\text{-Si}$  in the amorphous matrix  $a\text{-SiO}_x$

:H located near the anode and on the cathode, using a time-modulated DC plasma with the  $(\text{SiH}_4\text{-Ar-O}_2)$  gas phase ( $\text{Co}_2 = 21.5 \text{ mol}\%$ ). *Semiconductors*. 2019;53(11): 1514–1523. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782619110228>

4. Terekhov V. A., Terukov E. I., Undalov Y. K., Parinova E. V., Spirin D. E., Seredin P. V., Minakov D. A., Domashevskaya E. P. Composition and optical properties of amorphous  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  films with silicon nanoclusters. *Semiconductors*. 2016;50(2): 212–216. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782616020251>

5. Terekhov V. A., Turishchev S. Y., Kashkarov V. M., Domashevskaya E. P., Mikhailov A. N., Tetel'baum D. I. Silicon nanocrystals in  $\text{SiO}_2$  matrix obtained by ion implantation under cyclic dose accumulation. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2007;38(1-2): 16–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2006.12.030>

6. Terekhov V. A., Turishchev S. Y., Pankov K. N., Zanin I. E., Domashevskaya E. P., Tetelbaum D. I., Mikhailov A. N., Belov A. I., Nikolichiev D. E., Zubkov S. Y. XANES, USXES and XPS investigations of electron energy and atomic structure peculiarities of the silicon suboxide thin film surface layers containing Si nanocrystals. *Surface and Interface Analysis*. 2010;42(6-7): 891–896. DOI: <https://doi.org/10.1002/sia.3338>

7. Terekhov V. A., Turishchev S. Y., Pankov K. N., Zanin I. E., Domashevskaya E. P., Tetelbaum, Mikhailov A. N., Belov A. I., Nikolichiev D. E. Synchrotron investigations of electronic and atomic-structure peculiarities for silicon-oxide films' surface layers containing silicon nanocrystals. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2011;5(5): 958–967. DOI: <https://doi.org/10.1134/S102745101110020X>

8. Sato K., Izumi T., Iwase M., Show Y., Morisaki H., Yaguchi T., Kamino T. Nucleation and growth of nanocrystalline silicon studied by TEM, XPS and ESR. *Applied Surface Science*. 2003;216(1-4): 376–381. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00445-8](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00445-8)

9. Ledoux G., Gong J., Huisken F., Guillois O., Reynaud C. Photoluminescence of size-separated silicon nanocrystals: Confirmation of quantum confinement. *Applied Physics Letters*. 2002;80(25): 4834–4836. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1485302>

10. Patrone L., Nelson D., Safarov V. I., Sentis M., Marine W., Giorgio S. Photoluminescence of silicon nanoclusters with reduced size dispersion produced by laser ablation. *Journal of Applied Physics*. 2000;87(8): 3829–3837. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.372421>

11. Takeoka S., Fujii M., Hayashi S. Size-dependent photoluminescence from surface-oxidized Si nanocrystals in a weak confinement regime. *Physical Review B*. 2000;62(24): 16820–16825. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.16820>

12. Ievlev V. M. Activation of solid-phase processes by radiation of gas-discharge lamps, *Russian Chem-*

*ical Reviews*. 2013;82(9): 815–834. DOI: <https://doi.org/10.1070/rc2013v082n09abeh004357>

13. Zimkina T. M., Fomichev V. A. *Ultrasoft X-Ray spectroscopy*. Leningrad: Leningrad State University Publ.; 1971. 132 p.

14. Wiech G., Feldhütter H. O., Šimůnek A. Electronic structure of amorphous  $\text{SiO}_x\text{:H}$  alloy films studied by X-ray emission spectroscopy: Si K, Si L, and O K emission bands. *Physical Review B*. 1993;47(12): 6981–6989. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.6981>

15. Domashevskaya E. P., Peshkov Y. A., Terekhov V. A., Yurakov Y. A., Barkov K. A., Phase composition of the buried silicon interlayers in the amorphous multilayer nanostructures  $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})/a\text{-Si:H}]_{41}$  and  $[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{35}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{65}/a\text{-Si:H}]_{41}$ . *Surface and Interface Analysis*. 2018;50(12-13): 1265–1270. DOI: <https://doi.org/10.1002/sia.6515>

16. Terekhov V. A., Kashkarov V. M., Manukovskii E. Yu., Schukarev A. V., Domashevskaya E. P. Determination of the phase composition of surface layers of porous silicon by ultrasoft X-ray spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy techniques. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2001;114–116: 895–900. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0368-2048\(00\)00393-5](https://doi.org/10.1016/S0368-2048(00)00393-5)

17. JCPDS-International Centre for Diffraction Data ICDD PDF-2, (n.d.) card No 01-077-2110.

18. JCPDS-International Centre for Diffraction Data ICDD PDF-2, (n.d.) card No 00-050-0438.

### Информация об авторах

Терехов Владимир Андреевич, д. ф.-м. н., профессор, кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: [ftt@phys.vsu.ru](mailto:ftt@phys.vsu.ru). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0668-4138>.

Теруков Евгений Иванович, д. т. н., руководитель лаборатории физико-химических свойств полупроводников, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: [Eug.Terukov@mail.ioffe.ru](mailto:Eug.Terukov@mail.ioffe.ru). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4818-4924>.

Ундалов Юрий Константинович, к. т. н., с. н. с. лаборатории «Физико-химические свойства полупроводников», Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: [undalov@mail.ioffe.ru](mailto:undalov@mail.ioffe.ru).

Барков Константин Александрович, аспирант, заведующий лабораторией кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Феде-

рация; e-mail: barkov@phys.vsu.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8290-1088>.

*Занин Игорь Евгеньевич*, к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: [iezan@mail.ru](mailto:iezan@mail.ru).

*Сербин Олег Викторович*, к. ф.-м. н., доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет,

Воронеж, Российская Федерация; e-mail: [deanery@chem.vsu.ru](mailto:deanery@chem.vsu.ru). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2407-1183>.

*Трапезникова Ирина Николаевна*, д. ф.-м. н., профессор, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: [trapez@mail.ioffe.ru](mailto:trapez@mail.ioffe.ru). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2244-8370>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.