НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ /
NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY

DOI: 10.17073/1609–3577j.met202310.564

УДК 621.315

Получение кремний–углеродных пленок методом плазмохимического осаждения с индукционным ассистированием

© *2024 г.* **А. А. Темиров[1,✉], И. В. Кубасов[1], А. В. Турутин[1], Т. С. Ильина[1], А. М. Кислюк[1], Д. А. Киселев[1], Е. А. Скрылева[1], Н. А. Соболев[1,2], И. В. Салимон[3], Н. В. Батрамеев[4], М. Д. Малинкович[1], Ю. Н. Пархоменко[1]**

[1] ***Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,*** *Ленинский просп., д. 4, стр. 1, 119049 Москва, Российская Федерация*

[2] ***Университет Авейру, Департамент Физики,*** *3810–193 Авейру, Португалия*

[3] ***Сколковский институт науки и технологий,*** *территория Инновационного Центра «Сколково», Большой б–р, д. 30, стр. 1, Москва, 121205, Российская Федерация*

[4] ***АО «Пьезо»,*** *ул. Буженинова, д. 16, Москва, 107023, Российская Федерация*

✉ *Автор для переписки: temirov.alex@yandex.ru*

Аннотация. Кремний–углеродные пленки вызывают большой интерес как алмазоподобные материалы, сочетающие уникальные свойства: высокую твердость, адгезию к широкому классу материалов, прочность на истирание, а также химическую стойкость, низкий коэффициент трения и биосовместимость. Наличие кремния в составе пленок позволяет существенно уменьшить внутренние механические напряжения в таких покрытиях по сравнению с алмазными. В современном производстве пленки применяют, прежде всего, в качестве твердых смазочных материалов и защитных покрытий. Существует большое количество методик получения кремний–углеродных пленок, среди которых наиболее распространены различные варианты парофазного химического осаждения. Предложен и опробован способ синтеза кремний–углеродных пленок, основанный на применении высокочастотного индуктора для получения плазмы паров кремний–углеродной жидкости, напускаемых в камеру из внешнего источника. На подложках ситалла были получены беспримесные кремний–углеродные пленки с содержанием атомов углерода с sp^3–гибридизацией орбиталей 63—65 %. Исследованы состав, шероховатость поверхности и коэффициент трения беспримесных кремний–углеродных пленок, полученных предложенным методом. Изучена возможность реализации резистивного переключения в тонких кремний–углеродных пленках в кроссбар–структурах с металлическими электродами.

Ключевые слова: кремний–углеродные пленки, алмазоподобные материалы, плазмохимическое осаждение; технологии тонких пленок

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21–19–00872, https://rscf.ru/project/21–19–00872/. Авторы выражают признательность Carlos Rosário за помощь в измерениях вольт–амперных характеристик.

© 2024 National University of Science and Technology “MISIS”.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Для цитирования: Темиров А.А., Кубасов И.В., Турутин А.В., Ильина Т.С., Кислюк А.М., Киселев Д.А., Скрылева Е.А., Соболев Н.А., Салимон И.В., Н.В. Батрамеев, М.Д. Малинкович, Ю.Н. Пархоменко. Получение кремний–углеродных пленок методом плазмохимического осаждения с индукционным ассистированием. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(1): 1—1. https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202310.564

Creattion of silicon–carbon films by induction assisted plasma chemical deposition

A. A. Temirov[1,✉], I. V. Kubasov[1], A. V. Turutin[1], T. S. Ilina[1], A. M. Kislyuk[1], D. A. Kiselev[1], E. A. Skryleva[1], N. A. Sobolev[1,2], I. A. Salimon[3], N. V. Batrameev[4], M. D. Malinkovich[1], Yu. N. Parkhomenko[1]

[1] ***National University of Science and Technology "MISIS",*** *4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

[2] ***Department of Physics, Universidade de Aveiro****, 3810–193 Aveiro, Portugal*

[3] ***Skolkovo Institute of Science and Technology, territory of the Innovation Center "Skolkovo",*** *30–1 Bolshoy Blvd, Moscow 121205, Russian Federation*

[4] ***JSC "Piezo",*** *16 Buzheninova Str., Moscow 107023, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: temirov.alex@yandex.ru*

Abstract. Silicon–carbon films are of great interest as diamond–like materials combining unique properties – high hardness, adhesion to a wide class of materials, abrasion resistance, as well as chemical resistance, low coefficient of friction and biocompatibility. The presence of silicon in the composition makes it possible to significantly reduce the internal mechanical stresses in such coatings compared to diamond ones. In modern production, films have been used primarily as solid lubricants and protective coatings. There are a large number of methods for producing silicon–carbon films, the most widespread among which are various variants of vapor–phase chemical deposition. In this paper, a method for the synthesis of silicon–carbon films was proposed and tested, based on the use of a high–frequency inductor to produce a plasma of vapors of silicon–carbon liquid injected into the chamber from an external source. Pure silicon–carbon films with a carbon atom content with sp^3–hybridized orbitals of 63–65 % were obtained on sitall substrates. The composition, surface roughness and coefficient of friction of unalloyed silicon–carbon films obtained by the proposed method were studied. The possibility of resistive switching in thin silicon carbon films in crossbar structures with metal electrodes was studied.

Keywords: silicon–carbon films, diamond–like materials, plasma chemical deposition, thin film technology

Acknowledgments: The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (grant No. 21–19–00872, https://rscf.ru/project/21–19–00872/). N.A.S. was supported by the project i3N (UIDB/50025/2020, UIDP/50025/2020 and LA/P/0037/2020) which was financed by national funds through the Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) and the Ministério da Educação e Ciência (MEC) of Portugal.
The authors are grateful to Carlos Rosário for his help in current–voltage characteristic measurements.

For citation: Temirov A.A., Kubasov I.V., Turutin A.V., Ilina T.S., Kislyuk A.M., Kiselev D.A., Skryleva E.A., Sobolev N.A., Salimon I.A., Batrameev N.V., Malinkovich M.D., Parkhomenko Yu.N. Creattion of silicon–carbon films by induction assisted plasma chemical deposition. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(1): 1—1. https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202310.564

Введение

Алмазоподобные кремний–углеродные пленки **(КУП)** обладают уникальным набором полезных свойств: высокая твердость и прочность, химическая и радиационная стойкость, биосовместимость и низкий коэффициент трения [1]. КУП представляют собой аморфные матрицы (плазменно полимеризованный полифенилметилсилоксан, **ПФМС**) [2], которые могут быть легированы металлическими или иными включениями в разных концентрациях, вплоть до 20 % (ат.), что позволяет управлять электрофизическими и механическими свойствами материала в широком диапазоне. Широкое применение пленки получили в современной промышленности, в основном, в качестве твердых смазочных материалов и защитных покрытий. Заслуживающей внимание является также возможность использования КУП в качестве функциональных слоев мемристорных структур. На сегодняшний день наблюдается необходимость в материалах, способных стать базой для создания нейроморфных вычислительных устройств и резистивной памяти **(RRAM)** и в то же время совместимых с технологическими процессами производства интегральных схем на основе комплементарных структур металл—оксид—полупроводник **(КМОП)** [3]. Удачным с этой точки зрения является отсутствие необходимости высокотемпературного нагрева подложки в процессе синтеза КУП [4]. В работах [5—7] описано получение структур с резистивным переключением на основе схожих материалов: аморфного окисленного углерода и графитоподобной (a–GCL) пленки. Однако высоких значений (в 10 раз) отношения сопротивлений в состояниях с высоким **(HRS)** и низким **(LRS)** сопротивлением авторы достигали только при температуре 80—150 К.

В составе пленок находятся как атомы углерода с sp^3–гибридизацией орбиталей (характерны для алмаза), так и с sp^2–гибридизацией (характерны для графита). Соотношение этих двух типов гибридизации влияет на свойства синтезируемых КУП. Содержание атомов углерода с *sp*–гибридизацией в алмазоподобных материалах мало, и чаще всего им пренебрегают [8, 9].

По сравнению с углеродными алмазоподобными пленками a–C : H и a–C, в составе которых нет кремния (*Diamond–Like Carbon*, **DLC**), КУП имеют меньшую твердость, а также меньшие внутренние механические напряжения, что позволяет наносить защитные покрытия толщиной до 100 мкм [10], в то время как DLC при толщине уже в 2 мкм разрушаются из–за внутренних напряжений. КУП также демонстрируют лучшую, чем у DLC, адгезию ко многим поверхностям, и могут иметь более низкий коэффициент трения, вплоть до 0,01 [11]. Кроме того, легированные кремнием DLC показывают более высокую термостабильность, чем углеродные пленки [12]. В работе [13] показано, что в кремний–углеродных покрытиях, а также в нанокомпозитах на их основе структурные изменения, выраженные в увеличении концентрации sp^2–гибридизованных связей углерода и связанные с деградацией материала, происходят при температуре 300—400 °C на воздухе, а в атмосфере аргона температура деградации повышается до 600 °C.

Существует большое количество методов осаждения КУП, среди которых наибольшее распространение получили различные варианты химического парофазного осаждения [8—10]. При этом используемые прекурсоры представляют собой или конденсированные вещества, содержащие углерод, кремний, кислород и водород (чаще всего силоксаны, силикаты и силаны), или смеси на основе этих веществ с газами (метан, ацетилен, кислород и т. д.) [17, 18]. Силоксановые жидкости предпочтительнее газовых смесей ввиду безопасности их хранения и использования. Кроме того, прекурсоры этого типа имеют невысокую стоимость, а использующие их технологии просты в реализации.

Основной применяемый в настоящее время метод получения КУП из силоксановых жидкостей предполагает использование массивного вольфрамового катода, нагретого до температур порядка 2000 °C [19, 20], что неизбежно приводит к загрязнению синтезируемых образцов фоновой примесью вольфрама. Кроме того, через катод требуется пропускать ток порядка 100 А от мощного источника, из–за чего ростовая камера сильно нагревается и возникает необходимость в соответствующей системе охлаждения.

Ниже предложен метод синтеза КУП, основанный на применении высокочастотного индуктора для получения плазмы паров кремний–углеродной жидкости, напускаемых в камеру от внешнего источника, и рассмотрены результаты исследования состава, шероховатости поверхности и коэффициента трения беспримесных КУП, полученных предложенным методом, а также возможность их применения в качестве функционального слоя для мемристорных структур.

Образцы и методы исследования

Образцы беспримесных КУП получали методом плазмохимического осаждения паров полифенилметилсилоксана **(ПФМС)** в универсальной вакуумной установке. Рабочее давление в камере устанавливали на уровне 10^{-3} торр.

В основе метода, использованного для синтеза образцов, лежит ионизация паров ПФМС, разогреваемых в специальном резервуаре из нержавеющей стали до температуры ~350 °C и по-

падающих в кварцевую трубку с индуктором с частотой 13,56 МГц и мощностью 500 Вт, а также осаждение образовавшейся плазмы на подложку с вытягивающим переменным потенциалом амплитудой 500 В и частотой 200 кГц. С целью упрощения многоэтапной фрагментации тяжелых молекул ПФМС и увеличения степени их ионизации в область индукционного воздействия помещали катод из вольфрамовой нити диаметром 300 мкм и длиной 100 мм, через который проходил ток 10 А, поэтому испарением вольфрама и нагревом камеры можно было пренебречь. Во время напыления подложкодержатель вращался со скоростью 2 об/мин для улучшения равномерности распределения осаждаемого вещества по поверхности подложки. В качестве подложек использовали пластины ситалла толщиной 250 мкм, предварительно нарезанные на прямоугольники размером 5×20 мм^2. Выбор таких диэлектрических подложек обусловлен низкой шероховатостью поверхности (порядка 2 нм) и их доступностью. Для предотвращения конденсации неионизированных паров ПФМС подложку в процессе синтеза нагревали в резистивной печи до температур, соответствующих кипению силоксановой жидкости (~200 °С). Для изучения влияния нагрева подложкодержателя на морфологию поверхности пленок был проведен синтез и при других температурах нагрева: 100, 150, 250 и 300 °С и комнатной. Длительность процесса синтеза составляла 60 мин. для каждой выбранной температуры.

Исследование топографии поверхности синтезированных образцов проводили методом сканирующей зондовой микроскопии **(СЗМ)** в полуконтактном режиме. Данные о среднеквадратичной шероховатости (rms) были получены при использовании программы Gwyddion по результатам обработки сканов размером 15×15 мкм^2.

Коэффициент трения и оценку износостойкости образца определяли с помощью универсального трибометра CETR при относительной влажности воздуха 40 % в режиме «стальной шарик на плоскости» отдельно для подложки из ситалла без пленки и подложки с нелегированной КУП. Металлический шарик диаметром 6,3 мм вдавливался в образец с силой 2 Н и совершал возвратно–поступательное движение на пути длиной 4 мм в течение 1500 с со средней скоростью 10 мм/с.

Элементный состав легированных и нелегированных КУП определяли с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии **(РФЭС)** на приборе PHI5500 VersaProbeII с монохроматизированным AlK_α–излучением ($h\nu$ = = 1486,6 эВ) и мощностью 50 Вт. Атомные концентрации определяли по обзорным спектрам методом факторов относительной элементной чувствительности. Для получения спектров по глубине осуществляли травление образцов ионами Ar^+ с энергией 2 кэВ с помощью ионной пушки. Скорость травления составляла порядка 20 нм/мин.

Для измерения электрофизических свойств пленок методами оптической литографии были получены кроссбар–структуры «подложка—электрод—пленка—электрод» [21], схематическое и оптическое изображения которых представлены на рис. 1. В качестве материала электрода для структур использовали никель, подложки — пластину сапфира. Толщина верхнего и нижнего электродов составляла 150 нм, КУП — 40 нм. Измерения проводили на стационарной зондовой станции при помощи источника–измерителя Keithley 2611A.

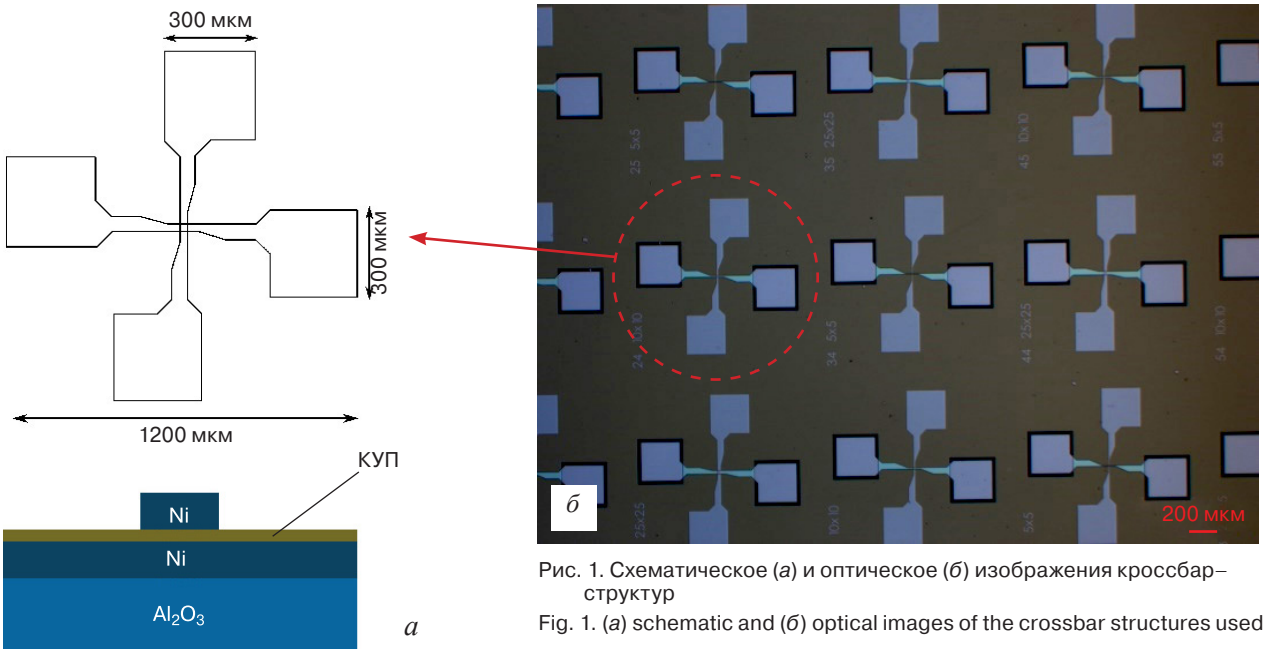

Рис. 1. Схематическое (*а*) и оптическое (*б*) изображения кроссбар–структур

Fig. 1. (*а*) schematic and (*б*) optical images of the crossbar structures used

Результаты и их обсуждение

Исследование методами СЗМ поверхности синтезированных КУП показало наличие дефектов (сконденсированных частиц ПФМС и дырок на поверхности) на всех образцах, полученных при температурах нагрева подложки ниже 150 °С включительно. Начиная с температуры нагрева подложки 200 °С, образцы КУП имели однородную сплошную поверхность. В целом, во всей серии образцов с повышением температуры наблюдалась тенденция к снижению количества загрязнений и дырок (рис. 2). На любом из СЗМ–сканов образца, синтезированного при комнатной температуре, всегда присутствовали дефекты.

Кроме снижения дефектности пленки, рост температуры подложки также уменьшает скорость роста КУП. Зависимость скорости роста КУП от температуры подложки представлена на рис. 3.

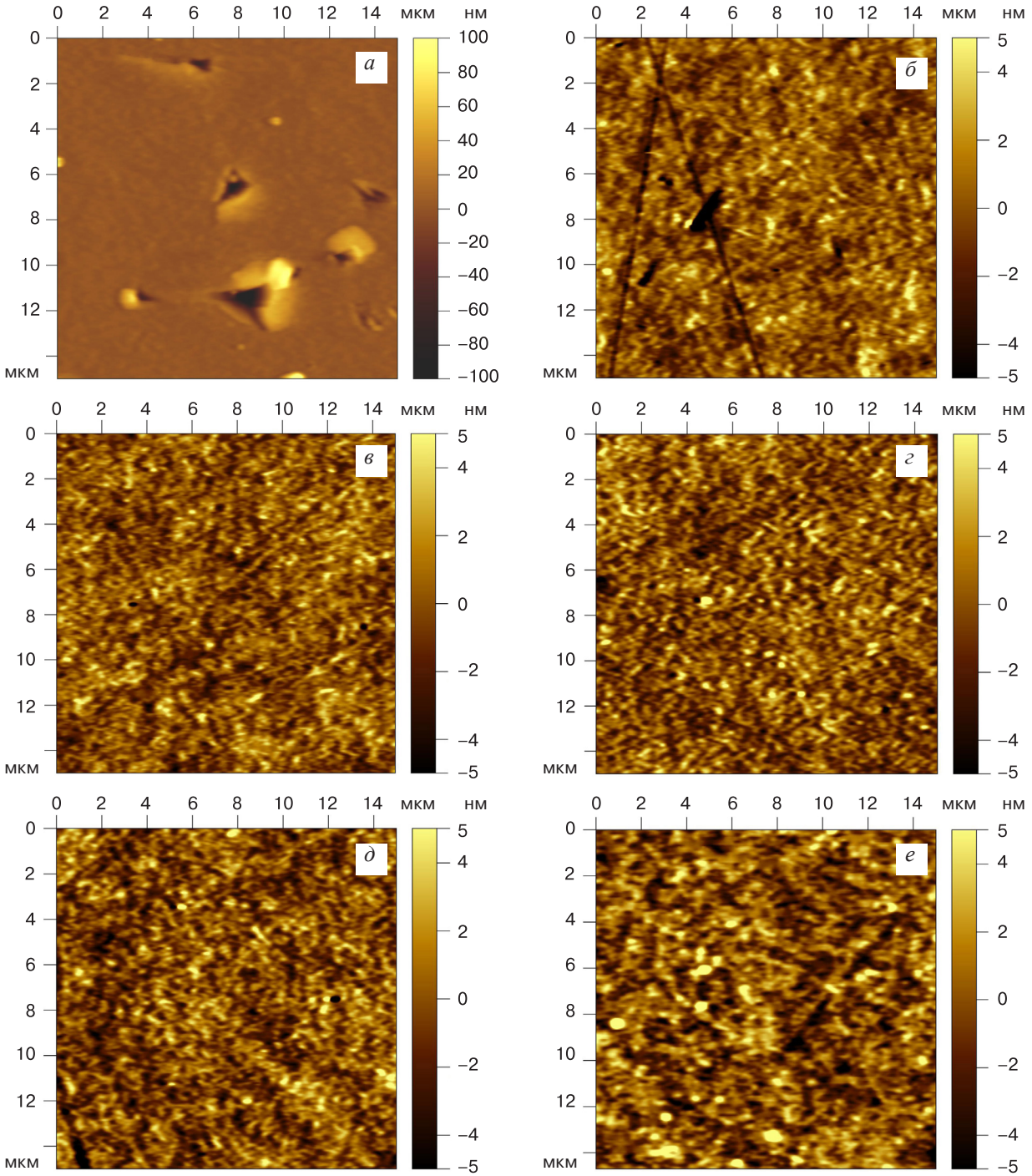

Рис. 2. Топография поверхности КУП, выращенных при различной температуре подложки:
а — комнатная; *б*—*е* — 100, 150, 200, 250 и 300 °С соответственно

Fig. 2. Surface images of SCFs grown at different substrate temperatures: (*а*) room, (*б*–*е*) 100, 150, 200, 250 and 300 °C, respectively

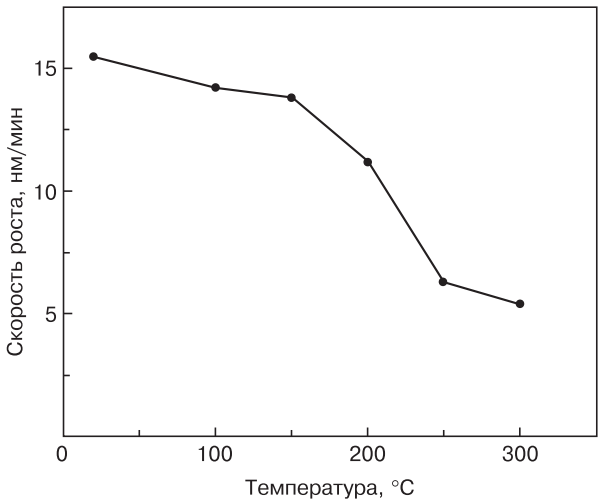

Рис. 3. Зависимость скорости осаждения КУП от температуры нагрева подложки

Fig. 3. SCF deposition rate as a function of substrate temperature

Так как нагрев подложки до 200 °C предотвращает появление дефектов на поверхности образцов, можно сделать вывод, что при этой температуре скорость роста КУП оптимальна. Дальнейшие измерения проводили на образцах, синтезированных при нагреве до 200 °C.

Формирование КУП способствует снижению шероховатости поверхности образца. Так, для пленки толщиной 670 нм шероховатость уменьшилась более чем в 2 раза: с 2,3 нм у исходной подложки до 1,1 нм у подложки с нанесенной КУП (рис. 4).

Измерения трибологических свойств показали, что коэффициент трения скольжения стального шарика по ситаллу с нанесенной КУП почти на порядок меньше, чем по подложке без КУП. На рис. 5 показано изменение этого трибологического параметра при измерении на исходной подложке (пластина ситалла) и на подложке с КУП.

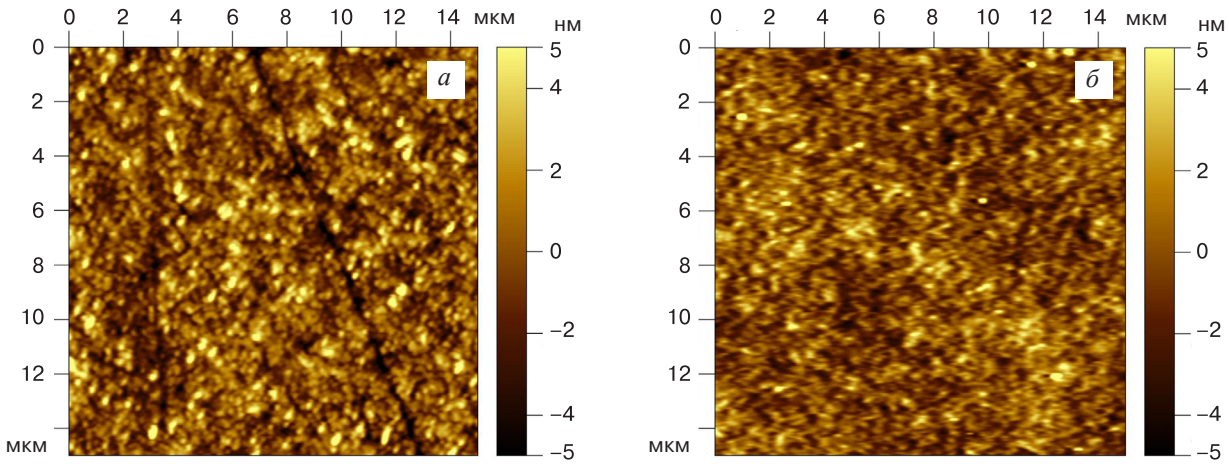

Рис. 4. Изображения топографии поверхности подложки ситалла (*а*) и синтезированной КУП (*б*)

Fig. 4. Surface roughness of (*а*) Sitall substrate and (*б*) synthesized SCF

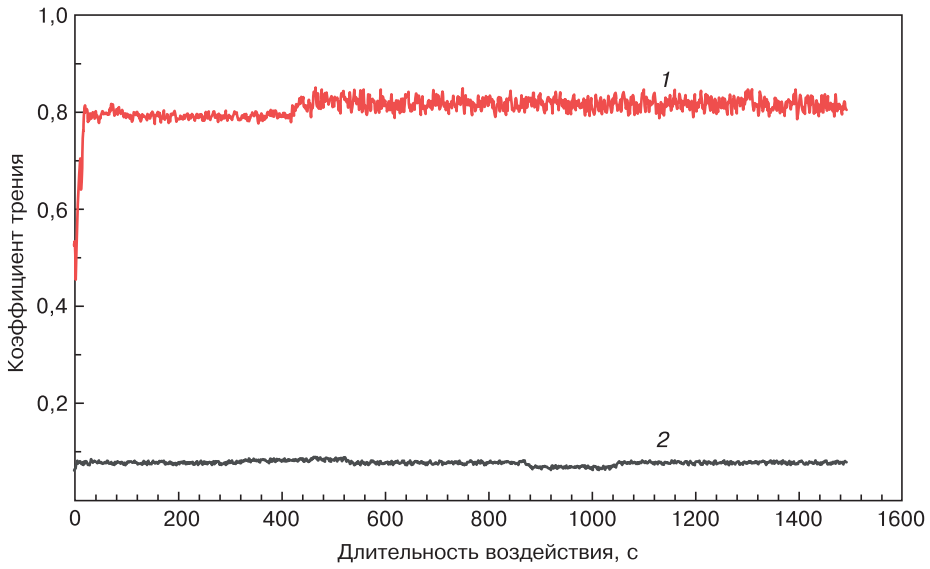

Рис. 5. Результаты измерения коэффициента трения скольжения на поверхности подложки ситалла (*1*) и на подложке с напыленной КУП (*2*)

Fig. 5. Sliding friction coefficients for (*1*) uncoated Sitall substrate and (*2*) SCF–coated substrate

Для любой из полированных подложек из ситалла было характерно увеличение коэффициента трения в первые 30—40 с работы трибометра. Подобное изменение может обуславливаться деградацией поверхности подложки в процессе измерений. Появление царапин и сколов нарушает верхний полированный слой ситалла и ведет к значительному повышению (почти в два раза) коэффициента трения с 0,45 до 0,8. После 400 с (~500 циклов возвратно–поступательных движений) работы трибометра область эрозии, содержащая царапины, увеличивается, а значение коэффициента трения поднимается еще выше и остается неизменным до конца измерений.

Коэффициент трения подложки с КУП составил 0,084, при этом какой–либо деградации поверхности пленки при испытаниях обнаружено не было, внешне поверхность пленки оставалась неизменной. На протяжении 1500 с (1875 циклов возвратно–поступательных движений) коэффициент трения практически не изменялся. Это позволяет судить о существенном повышении износостойкости материала после нанесения на него КУП. Отметим, что, кроме механических свойств самой пленки, одной из причин уменьшения коэффициента трения является снижение шероховатости поверхности по сравнению с ситалловой подложкой без КУП.

Исследование элементного состава синтезированных образцов показало наличие трех элементов: углерода, кремния и кислорода. Фоновых примесей, в том числе вольфрама, обнаружено не было. Соотношение концентраций углерода и кремния оказалось выше, чем в исходном прекурсоре ПФМС, и составило ~ 25 : 1 на поверхности и 21 : 1 после травления. Предполагается, что часть атомов Si, связанная с кислородом и образующая с ним заряженные молекулярные комплексы, не попала в область действия подложкодержателя. Результаты измерений представлены на рис. 6. В табл. 1 показаны концентрации элементов в КУП, рассчитанные по обзорным спектрам.

Общее время травления образцов составило 5 мин, но уже после первой минуты состав материала практически не менялся. Небольшие концентрации (до 0,1 %) аргона не были включены в итоговую таблицу состава КУП, так как их наличие объяснялось использованием для травления ионной пушки, с помощью которой проводили обработку поверхности образца ионами Ar^+. Отдельно для оценки концентрации атомов с sp^3–гибридизацией орбиталей исследовали спектры углерода. Результаты измерений до и после аппроксимации показаны на рис. 7.

Два основных пика, представленных на рис. 7, *б*, относятся к атомам углерода с sp^2– и sp^3–гибридизацией орбиталей. Концентрация последнего составляла 63—65 % и соответствовала

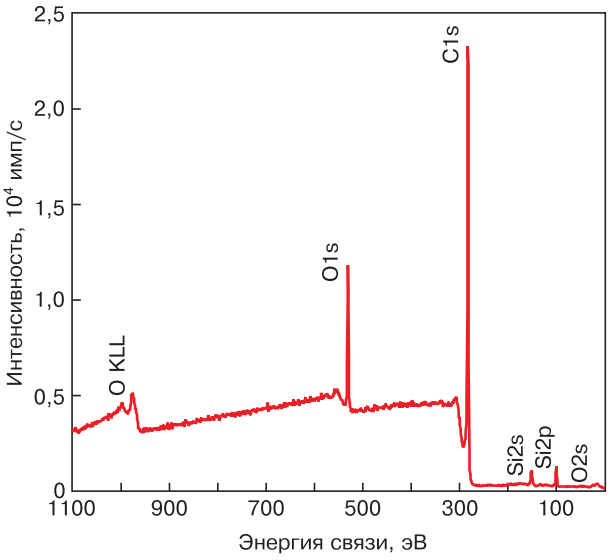

Рис. 6. Обзорный РФЭС–спектр КУП
Fig. 6. Survey XPS spectrum of SCF

Таблица 1 / Table 1

Элементный состав кремний–углеродной пленки до и после травления
Elemental composition of silicon–carbon film before and after etching

Время травления, мин.	Концентрация, % (ат.)			
	C	O	Si	C/Si
0	87,1	9,5	3,4	25,6
1	91,2	4,6	4,2	21,7
5	92,8	3,5	4,3	21,8

концентрации в алмазоподобных материалах, описанных в работе [22].

Результаты измерений электрофизических свойств КУП представлены на рис. 8.

Обнаруженный мемристивный эффект достаточно четко выражен: в среднем соотношение между двумя состояниями проводимости для каждой измеренной структуры составляло порядка 170. Переключение с LRS на HRS униполярное, т. е. реализуется при помощи напряжения одной и той же полярности.

Заключение

Разработана и опробована методика получения беспримесных КУП из ПФМС методом плазмохимического осаждения с использованием высокочастотного индуктора, позволившая синтезировать образцы, свободные от фоновых примесей. Определена оптимальная температура нагрева подложки в процессе осаждения пленок (200 °C). Использование аморфной КУП позволи-

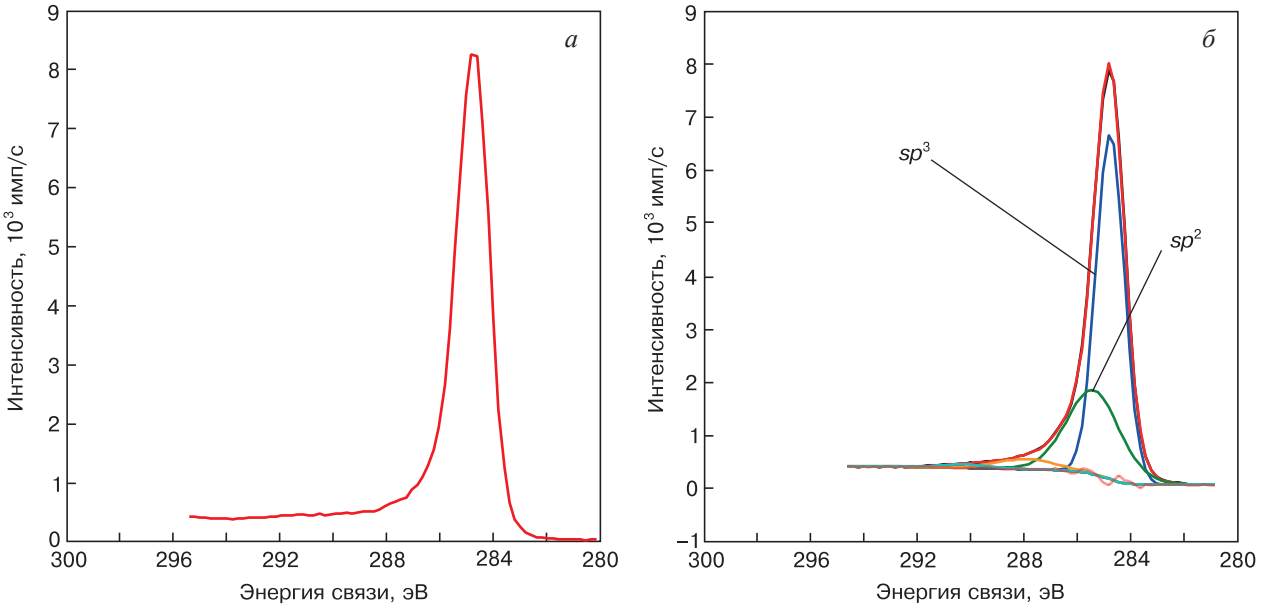

Рис. 7. РФЭС–спектры углерода в КУП до (*а*) и после (*б*) аппроксимации
Fig. 7. XPS spectra of carbon in SCF (*а*) before and (*б*) after approximation

ло уменьшить коэффициент трения скольжения стального шарика почти на порядок — с 0,8 на поверхности ситалла до 0,084 на поверхности КУП. Качественная оценка износостойкости также показала существенное повышение этого параметра. Среднеквадратичная шероховатость поверхности подложки после нанесения КУП уменьшилась более чем в два раза. Содержание атомов углерода с sp^3–гибридизацией орбиталей составило 63—65 %. Обнаружен мемристивный эффект. Показано наличие униполярного резистивного переключения в КУП с отношением LRS к HRS, равным 170.

Библиографический список / References

1. Meškinis Š., Tamulevičienė A. Structure, properties and applications of diamond like nanocomposite (SiO_x containing DLC) films: A review. *Materials Science*. 2011; 17(4): 358—370. https://doi.org/10.5755/j01.ms.17.4.770

2. Горшунов Б.П., Шупегин М.Л., Иванов В.Ю., Прохоров А.С., Спектор И.Е., Волков А.А. Инфракрасная спектроскопия алмазоподобных кремний–углеродных пленок. *Журнал технической физики*. 2008; 78(5): 111—116.

Gorshunov B.P., Shupegin M.L., Ivanov V.Yu., Prokhorov A.S., Spektor I.E., Volkov A.A. IR spectroscopy of diamondlike silicon–carbon films. *Technical Physics*. 2008; 53(5): 641—645.

3. Yu S. Neuro–inspired computing with emerging nonvolatile memorys. *Proceedings of the IEEE*. 2018; 106(2): 260—285. https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2790840

4. Wan J.Z., Pollak F.H., Dorfman B.F. Micro–Raman study of diamondlike atomic–scale composite films modified by continuous wave laser annealing. *Journal of Applied Physics*. 1997; 81(9): 6407—6414. https://doi.org/10.1063/1.364421

5. Gao X., Zhang X., Wan C., Wang J., Tan X., Zeng D. Temperature–dependent resistive switching of amorphous carbon/silicon heterojunctions. *Diamond and Related*

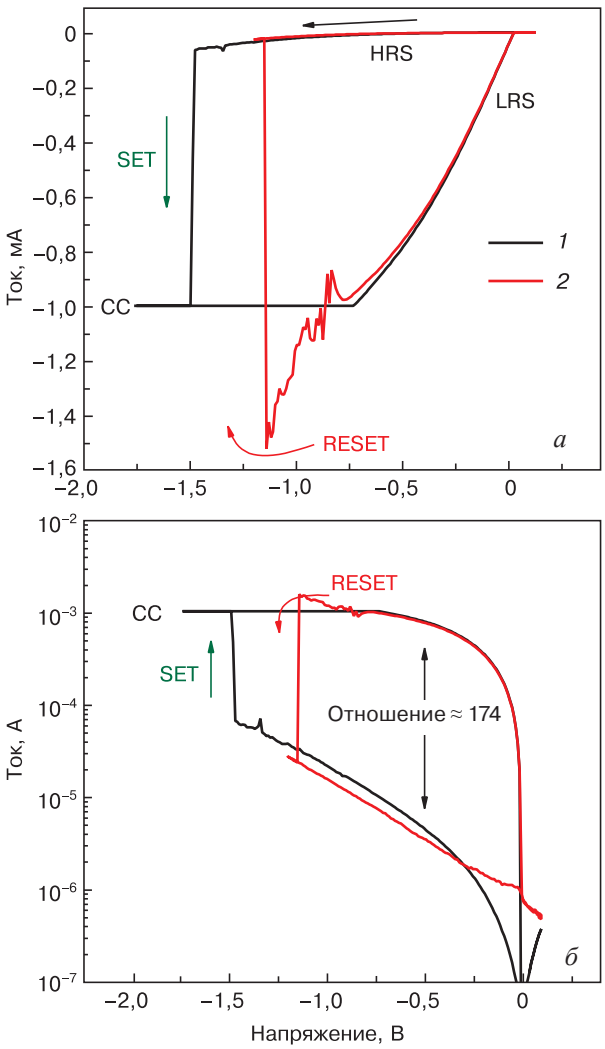

Рис. 8. Вольт–амперные характеристики КУП в стандартных (*а*) и полулогарифмических (*б*) координатах
Fig. 8. Current–voltage characteristics of SCFs: (*а*) standard and (*б*) semi–logarithmic coordinates

Materials. 2012; 22: 37—41. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.12.012

6. Ren B., Wang L., Wang Lin., Huang J., Tang Ke, Lou Y., Yuan D., Pan Zh., Xia Y. Investigation of resistive switching in graphite–like carbon thin film for non–volatile memory applications. *Vacuum*. 2014; 107: 1—5. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.03.021

7. Santini C.A., Sebastian A., Marchiori Ch., Jonnalagadda V.P., Dellmann L., Koelmans W.W., Rossell M.D., Rossel Ch.P., Eleftheriou Ev. Oxygenated amorphous carbon for resistive memory applications. *Nature Communications*. 2015; 6(1): 8600. https://doi.org/10.1038/ncomms9600

8. Liao Y.–Y., Liao W.–B., Jaing C.–C., Chang Y.–C., Lee C.–C., Kuo C.–C. Optical properties of transparent diamond–like carbon thin films. In: *Optical Interference Coatings 2016. Tucson, Arizona United States 19–24 June 2016*. Washington, D.C.: OSA; 2016. P. TD.10. https://doi.org/10.1364/OIC.2016.TD.10

9. Grill A. Diamond–like carbon: state of the art. *Diamond and Related Materials*. 199; 8(2–5): 428—434. https://doi.org/10.1016/S0925-9635(98)00262-3

10. Белогорохов А.И., Додонов А.М., Малинкович М.Д., Пархоменко Ю.Н., Смирнов А.П., Шупегин М.Л. Исследование молекулярной структуры матрицы алмазоподобных кремний–углеродных нанокомпозитов. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2007; 1: 69—71.

Belogorokhov A.I., Dodonov A.M., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Smirnov A.P., Shupegin M.L. Studying of molecular structure of matrix of diamond–like silicon–carbon nanocomposites. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2007; 1: 69—71. (In Russ.)

11. Jana S., Das S., Gangopadhyay U., Mondal A., Ghosh P. A clue to understand environmental influence on friction and wear of diamond–like nanocomposite thin film. *Advances in Tribology*. 2013; (1–4): 1—7. https://doi.org/10.1155/2013/352387

12. Hofmann D., Kunkel S., Bewilogua K., Wittorf R. From DLC to Si–DLC based layer systems with optimized properties for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*. 2013; 215: 357—363. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.094

13. Venkatraman C., Brodbeck C., Lei R. Tribological properties of diamond–like nanocomposite coatings at high temperatures. *Surface and Coatings Technology*. 1999; 115(2–3): 215—221. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00241-8

14. Barve S.A., Chopade S., Kar R., Chand N., Deo M.N., Biswas A., Patel N., Rao G.M., Patil D.S., Sinha S. SiO_x containing diamond like carbon coatings: Effect of substrate bias during deposition. *Diamond and Related Materials*. 2017; 71: 63—72. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2016.12.003

15. Nakazawa H., Kamata R., Miura S., Okuno S. Effects of frequency of pulsed substrate bias on structure and properties of silicon–doped diamond–like carbon films by plasma deposition. *Thin Solid Films*. 2015; 574: 93—98. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.078

16. Batory D., Jedrzejczak A., Kaczorowski W., Kolodziejczyk L., Burnat B. The effect of Si incorporation on the corrosion resistance of a–C:H:SiO_x coatings. *Diamond and Related Materials*. 2016; 67: 1—7. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.12.002

17. Lazauskas A., Grigaliunas V., Guobienė A., Puišo J., Prosyčevas I., Baltrusaitis J. Polyvinylpyrrolidone surface modification with SiO_x containing amorphous hydrogenated carbon (a–C:H/SiO_x) and nitrogen–doped a–C:H/SiO_x films using Hall–type closed drift ion beam source. *Thin Solid Films*. 2013; 538: 25—31. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.11.109

18. Santra T.S., Bhattacharyya T.K., Patel P., Tseng F.G., Barik T.K. Structural and tribological properties of diamond–like nanocomposite thin films. *Surface and Coatings Technology*. 2011; 206(2–3): 228—233. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.057

19. Dorfman B.F. Stabilized sp^2/sp^3 carbon and metal–carbon composites of atomic scale as interface and surface–controlling dielectric and conducting materials. In: *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials*. 2001; 1(8): 447—508. https://doi.org/10.1016/B978-012513910-6/50015-3

20. Yang W.J., Sekino T., Shim K.B., Niihara K., Auh K.H. Microstructure and tribological properties of SiO_x/DLC films grown by PECVD. *Surface and Coatings Technology*. 2005; 194(1): 128—135. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.05.023

21. Lanza M., Philip Wong H.–S., Pop E., Ielmini D., Strukov D., Regan B.C., Larcher L., Villena M.A., Yang J.J., Goux L., Belmonte A., Yang Y., Puglisi F.M., Kang J., Magyari–Kope B., Yalon E., Kenyon A., Buckwell M., Mehonic A., Shluger A.L., Li H., Hou T.–H. A., Hudec B., Akinwande D., Ge R., Ambrogio S., Roldan J.B., Miranda E., Sune J., Pey K.L., Wu X., Raghavan N., Wu E., Lu W.D., Navarro G., Zhang W., Wu H., Li R., Holleitner A., Wurstbauer U., Lemme M.Ch., Liu M., Long Sh., Liu Q., Lv H., Padovani A., Pavan P., Valov Il., Jing X., Han T., Zhu K., Chen Sh., Hui F., Shi Y. Recommended methods to study resistive switching devices. *Advanced Electronic Materials*. 2019; 5(1): 1800143. https://doi.org/10.1002/aelm.201800143

22. Robertson J. Diamond–like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2002; 37(4–6): 129—281. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0

Информация об авторах / Information about the authors

Темиров Александр Анатольевич — научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9965-1046; e–mail: temirov.alex@yandex.ru

Alexander A. Temirov — Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9965-1046; e–mail: temirov.alex@yandex.ru

Кубасов Илья Викторович — канд. физ.–мат. наук, старший научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6569-466X; e–mail: ilya.kubasov@misis.ru

Ilya V. Kubasov — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6569-466X; e–mail: kubasov.ilya@gmail.com

Турутин Андрей Владимирович — канд. физ.–мат. наук, старший научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1090-3441; e–mail: aturutin92@gmail.com

Andrei V. Turutin — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1090-3441; e–mail: aturutin92@gmail.com

Ильина Татьяна Сергеевна — научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1641-1731; e–mail: iltany94@mail.ru

Tatiana S. Ilina — Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1641-1731; e–mail: iltany94@mail.ru

Кислюк Александр Михайлович — научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7185-8715; e–mail: akislyuk94@gmail.com

Alexander M. Kislyuk — Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7185-8715; e–mail: akislyuk94@gmail.com

Киселев Дмитрий Александрович — канд. физ.–мат. наук, заведующий лабораторией, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1047-3007; e–mail: dm.kiselev@gmail.com

Dmitry A. Kiselev — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Head of the Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1047-3007; e–mail: dm.kiselev@gmail.com

Скрылева Елена Александровна — научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; e–mail: easkryleva@gmail.com

Elena A. Skryleva — Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e–mail: easkryleva@gmail.com

Соболев Николай Андреевич — канд. физ.–мат. наук, научный сотрудник, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, лаборатория ФНС, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; доктор естественных наук, профессор, Университет Авейру, 3810–193 Авейру, Португалия; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9420-8130; e–mail: niksob@gmail.com

Nikolai A. Sobolev — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Researcher, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; PhD, Professor Jubilado, Department of Physics; Universidade de Aveiro, 3810–193 Aveiro, Portugal; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9420-8130; e–mail: niksob@gmail.com

Салимон Игорь Алексеевич — аспирант, Center for Photonic Science and Engineering, Сколковский институт науки и технологий, территория Инновационного Центра «Сколково», Большой б–р, д. 30, стр. 1, Москва, 121205, Российская Федерация; e–mail: salimon252@yandex.ru

Igor A. Salimon — Postgraduate Student, Center for Photonic Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology, Territory of the Innovation Center “Skolkovo”, 30–1 Bolshoy Blvd, Moscow 121205, Russian Federation; e–mail: salimon252@yandex.ru

Батрамеев Николай Владимирович — инженер, АО «Пьезо», ул. Буженинова, д. 16, Москва, 107023, Российская Федерация; e–mail: batrameev1989@mail.ru

Nikolai V. Batrameev — Engineer, JSC "Piezo", 16 Buzheninova Str., Moscow 107023, Russian Federation; e–mail: batrameev1989@mail.ru

Малинкович Михаил Давыдовыч — канд. физ.–мат. наук, доцент, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9531-6072; e–mail: malinkovich@yandex.ru

Mikhail D. Malinkovich — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9531-6072; e–mail: malinkovich@yandex.ru

Пархоменко Юрий Николаевич — доктор физ.–мат. наук, профессор, научный руководитель, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1970-9867; e–mail: parkh@rambler.r

Yuri N. Parkhomenko — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Scientific Consultant, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1970-9867; e–mail: parkh@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023; поступила после доработки 23.11.2023; принята к публикации 15.01.2024
Received 19 October 2023; Revised 23 November 2023; Accepted 15 January 2024