

**Механические и трибологические свойства а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленок, полученных плазмохимическим методом с использованием импульсного биполярного напряжения смещения подложки**

*А. С. Гренадёр, А. А. Соловьёв, К. В. Оскомов*

*Получены образцы а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленок на подложках из кремния, нержавеющей стали AISI 316L и сплава ВК-8 методом плазмохимического осаждения с использованием импульсного биполярного напряжения смещения подложки. Показана возможность нанесения а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленки толщиной более 7 мкм с твердостью около 15 ГПа, высокой адгезионной прочностью и низкими внутренними напряжениями (менее 0,5 ГПа). Трибологические испытания показали, что пленки обладают низким коэффициентом трения (менее 0,08) и низкой скоростью износа (~10<sup>-7</sup> мм<sup>3</sup>/Н·м).*

*Ключевые слова:* алмазоподобный углерод, а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленки, твердость, износостойкость.

**Ссылка:** Гренадёр А. С., Соловьёв А. А., Оскомов К. В. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 3. С. 216.

**Reference:** A. S. Grenadyorov, A. A. Solovyev, and K. V. Oskomov, Usp. Prikl. Fiz. **8** (3), 216 (2020).

**Введение**

Аморфные алмазоподобные пленки (а-С и а-С:Н) в зависимости от содержания sp<sup>3</sup> гибридных атомов углерода и водорода могут обладать уникальными механическими и трибологическими свойствами, в частности высокой твердостью, низким коэффициентом трения, низкой скоростью износа и т. д. [1–3]. Однако серьезным недостатком а-С:Н пленок являются высокие внутренние напряжения (до 10 ГПа), приводящие к отслаиванию пленок от подложки [4]. Поскольку внутренние напряжения увеличиваются с толщиной а-С:Н пленок, толщина последних, как правило, не

превышает 1 мкм. Такой толщины пленки может быть недостаточно для некоторых трибологических применений.

Известно, что допирование а-С:Н пленок кремнием или SiO<sub>x</sub> фазой приводит к снижению внутренних напряжений (до 1 ГПа и менее) [5], в то время как механические и трибологические свойства материала остаются на высоком уровне [6–8]. Для получения а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленок обычно используют метод ассистированного плазмой химического газофазного осаждения (PACVD) с возбуждением емкостного высокочастотного (RF) разряда, одним из электродов которого является подложкодержатель.

В работе [9] было показано, что а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленки, полученные методом RF PACVD имеют коэффициент трения в диапазоне от 0,025 до 0,04, модуль упругости 85–105 ГПа и твердость 8–10 ГПа. Аналогичная твердость а-С:Н:SiO<sub>x</sub> пленок (11 ГПа) была получена в работах [10, 11]. Ватуру с соавторами [12] показали, что механические свойства а-С:Н пленок, допированных кремнием и

**Гренадёр Александр Сергеевич**, н.с., к.т.н.  
**Соловьёв Андрей Александрович**, зав. лаб., к.т.н.  
**Оскомов Константин Владимирович**, с.н.с., к.ф.-м.н.  
Институт сильноточной электроники СО РАН.  
Россия, 634055, г. Томск, проспект Академический, 2/3.  
E-mail: 1711Sasha@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 19 мая 2020 г.*

© Гренадёр А. С., Соловьёв А. А., Оскомов К. В., 2020

кислородом, при нанесении методом RF PACVD зависят от содержания кремния и величины отрицательного напряжения самосмещения на подложке. Последнее определяет энергию, с которой ионы бомбардируют пленку в процессе ее роста. Внутренние напряжения полученных пленок находились в диапазоне 0,5–1,5 ГПа и имели минимальные значения при содержании кремния более 10 ат. %.

Kumag с соавторами [13] показали существование оптимального напряжения самосмещения подложки (–100 В), при котором формируется пленка с низким коэффициентом трения ( $< 0,05$ ) и высокой адгезионной прочностью за счет оптимального соотношения  $sp^2$ - и  $sp^3$ -гибридизированных атомов углерода. Максимальные значения твердости (20–28 ГПа) для а-C:H:SiO<sub>x</sub> пленок были получены в работе [14], где использовался PACVD метод осаждения с высокочастотным (1,76 МГц) напряжением смещения подложки амплитудой –400 В. Коэффициент трения пленок был около 0,07–0,08, а скорость износа порядка  $10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/Н м.

Использование высокочастотного разряда может быть приемлемо, когда конфигурацию электродов можно поддерживать постоянной, и нет необходимости масштабировать технологию, поскольку размер электродов определяет величину потенциала самосмещения на подложке [15]. Также недостатком RF разряда является трудность контролирования дугообразования из-за энергии, запасенной в устройстве согласования. Эти недостатки отсутствуют при среднечастотном (0–350 кГц) импульсном напряжении смещения подложки, которое часто используется для нанесения диэлектрических покрытий [16, 17].

Целью настоящей работы являлось исследование механических и трибологических свойств относительно толстых (толщиной около 7 мкм) а-C:H:SiO<sub>x</sub> пленок, наносимых плазмохимическим методом с использованием импульсного биполярного напряжения смещения подложки.

### Эксперимент и методики исследований

В настоящей работе в качестве подложек использовались пластины из монокристаллического кремния Si (100) толщиной 400 мкм,

а также образцы из нержавеющей стали AISI 316L размером 15×15×2 мм<sup>3</sup> и сплава ВК-8 размером 10×6×4 мм<sup>3</sup>. Подложки предварительно обрабатывались в ультразвуковой ванне в изопропиловом спирте, ацетоне и дистиллированной воде. В каждой жидкости подложки обрабатывались в течение 10 минут. После этого они закреплялись на стальном подложкодержателе, устанавливаемом в рабочую камеру, которая вакууммировалась до остаточного давления  $10^{-2}$  Па.

Нанесение а-C:H:SiO<sub>x</sub> пленки осуществлялось на вакуумной установке с турбомолекулярной системой откачки, конструкция которой, также как и метод осаждения, подробно описаны в [18]. Плазмогенератор на основе несамостоятельного дугового разряда с накальным катодом был установлен на боковом фланце вакуумной камеры. Осаждение пленки проводилось в смеси Ag и паров полифенилметилсилоксана (ПФМС) при давлении 0,1 Па. Держатель подложки был подключен к биполярному импульсному источнику питания (ООО «Прикладная электроника», Россия) [19]. Частота повторения импульсов составляла 100 кГц при длительности положительного импульса 4 мкс. Амплитуда отрицательных импульсов равнялась 300 В, а амплитуда положительных импульсов составляла 15–20 % от этого значения. Нанесение пленки производилось со скоростью  $19 \pm 2$  нм/мин. Итоговая толщина пленки составляла  $7,5 \pm 0,2$  мкм.

Толщина пленок измерялась методом калотеста на приборе Calotest CAT-S-0000 (CSEM, Швейцария) с использованием стального шарика диаметром 30 мм. Морфология поверхности полученных образцов исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа AFM Solver P47 (NT-MDT, Россия). Твердость и модуль упругости образцов измерялись методом наноиндентирования на приборе Nanotest 600 (Micro Materials Ltd., Великобритания) по методике Оливера-Фарра. Индентор Берковича представлял собой четырехгранную пирамидку с радиусом закругления 200 нм. При каждой нагрузке на индентор производилось 10 измерений, после чего полученные значения твердости усреднялись. Внутренние напряжения в пленке определялись по измерению кривизны поверхности кремниевого образца размером 20×2 мм<sup>2</sup> и толщиной 440 мкм до и после

нанесения пленки. Кривизна поверхности измерялась трехмерным бесконтактным профилометром Micro Measure 3D Station (STIL, Франция). Расчет внутренних напряжений производился по формуле Стоуни [20]. Элементный состав а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленки определялся с помощью энергодисперсионного анализа на приборе QUANTA 200 (FEI Company, США) при ускоряющем напряжении 10 кВ. Спектры комбинационного рассеяния были получены с использованием исследовательского комплекса Centaur U HR system (Nano Scan Tech., Россия) при длине волны лазерного возбуждения 532 нм. Адгезионная прочность пленки исследовалась методом скретч-теста на приборе Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 (CSEM, Швейцария). Максимальная нагрузка на алмазный индентор, имеющий радиус закругления 100 мкм, составляла 30 Н. Скорость перемещения индентора равнялась 2,45 мм/мин, а скорость нагружения – 5,35 Н/мин. Трибологические испытания проводились с использованием трибометра Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при комнатной температуре и относительной влажности 50 %. В качестве контртела использовался шарик из сплава ВК-8 диа-

метром 6 мм. Скорость вращения диска составляла 25 мм/с при нагрузке 3 Н. Пройденная дистанция равнялась 400 м. Скорость износа пленки определялась по методике, описанной в [21]. Оптический микроскоп μVizo-MET-221 (ЛОМО, Россия) использовался для исследования поверхности пленки и получения снимков трека износа после проведения трибологических испытаний.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены изображения поверхности пленки на кремниевой подложке, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Поскольку в данном случае пленка была нанесена на полированную поверхность, то ее среднеквадратичная шероховатость  $R_q$  составила всего 0,4 нм. Алмазоподобные пленки, как правило, характеризуются низкой шероховатостью поверхности [22], что делает их незаменимыми для многих оптических, электронных и биомедицинских применений, требующих чрезвычайно гладкие поверхности.

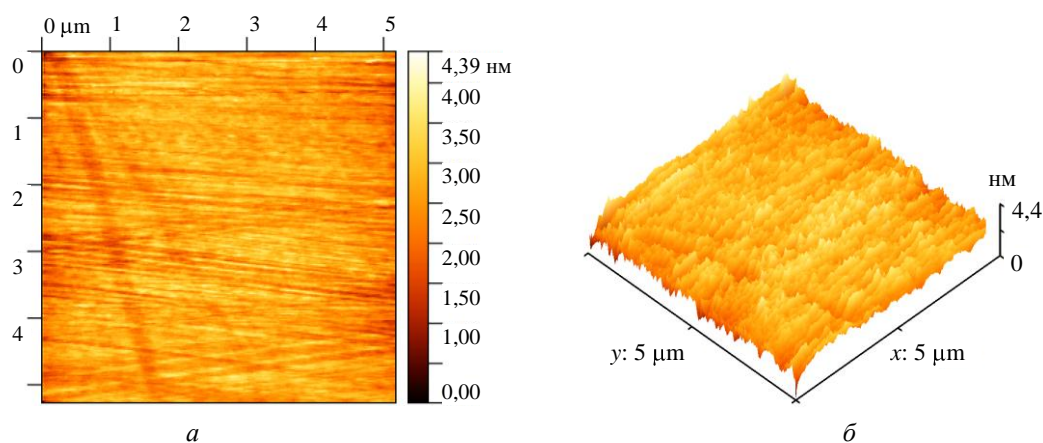


Рис. 1. Двухмерное (а) и трехмерное (б) АСМ изображения поверхности а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленки на Si подложке.

Результаты наноиндентирования а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленки на Si подложке представлены в табл. 1. Можно заметить, что при увеличении нагрузки на индентор с 10 до 100 мН твердость пленки увеличивается с 15,2 до 17,5 ГПа, модуль упругости снижается с 144,3 до 135,2 ГПа. Соответственно увеличивается индекс пластичности ( $H/E$ ) с 0,105 до 0,129 и сопротивление пластической деформации ( $H^3/E^2$ ) с 168 до 293 МПа. Следует отметить, что глубина

проникновения индентора ( $L$ ) при данных нагрузках не превышала 10 % от толщины пленки. Последнее условие необходимо для того, чтобы исключить влияние твердости подложки на результаты наноиндентирования [23]. Увеличение твердости пленки с увеличением глубины проникновения индентора, по видимому, говорит о том, что условия формирования пленки изменяются в процессе ее роста, приводя к изменению ее свойств. Также

был определен коэффициент упругого восстановления ( $W_e$ ), характеризующий эластичность поверхности и вязкость материала [24]. При нагрузке 10 мН коэффициент упругого восстановления а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленок составляет 82 %, что свидетельствует о высокой упругости поверхности. Увеличение нагрузки до 100 Н приводит к снижению  $W_e$  до 69 %. Измерение внутренних механических напряжений в а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленке на Si подложке показало, что пленка находится под действием сжимающих остаточных напряжений величиной ~ 0,5 ГПа. Это примерно в 6 раз меньше чем сжимающие напряжения, возникающие в а-С пленках при нанесении методом магнетронного распыления графита [25], несмотря на то что последние имели толщину около 1 мкм.

Элементный состав полученных пленок исследовался с помощью энергодисперсионного анализа. Было показано, что в полученных пленках содержится ~ 83 ат. % углерода, ~ 12 ат. % кремния, ~ 1,5 ат. % кислорода и ~ 3,5 ат. % аргона. Наличие аргона в пленке объясняется его внедрением в процессе ее роста, поскольку процесс нанесения осуществляется в смеси аргона и паров полифенилметилсилоксана. Содержание углерода и кремния в пленке совпадает с результатами других исследователей, которые получали аналогичные пленки с использованием полифенилметилсилоксана в качестве прекурсора [26, 27].

Полученные пленки были исследованы с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния. Этот метод позволяет качественно оценить содержание sp<sup>3</sup>- и sp<sup>2</sup>-гибридизированных атомов углерода в пленке по интен-

сивности, расположению и соотношению площадей D и G пиков [28]. Для алмазоподобных углеродных плёнок, в том числе содержащих кремний и кислород, на Рамановских спектрах выделяют широкую полосу в районе 1000–1700 см<sup>-1</sup> [7]. Характерная полоса наблюдалась для полученных в работе а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленок. Максимумы D и G пиков соответствуют волновым числам 1379 см<sup>-1</sup> и 1527 см<sup>-1</sup>, а отношение площадей D и G пиков  $I_D/I_G$  равно 2,2.

Для пленок с большим содержанием sp<sup>3</sup>-гибридизированного углерода отношение  $I_D/I_G$ , как правило, меньше единицы [28]. У пленок с преобладающим содержанием sp<sup>2</sup> углерода значения  $I_D/I_G$  находятся в диапазоне от 1 до 3,5. Углеродные пленки, содержащие в структуре кремний, так же характеризуются высокими отношениями  $I_D/I_G$  (больше единицы). Например, у Santra с соавторами [29] для а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленок, нанесенных методом RF PACVD, значения  $I_D/I_G$  находились в интервале от 1,55 до 1,9 в зависимости от химического состава используемого прекурсора.

На рис. 2 представлены результаты скретч-теста а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленки, в частности снимки отдельных частей царапины и соответствующие им нагрузки на индентор. Видно, что а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленка выдерживает нагрузку примерно 15 Н, а повышение нагрузки до 17 Н приводит к разрушению подложки. Данные значения критической нагрузки, при которой происходит разрушение покрытия, говорят о достаточно хорошей адгезии пленки, несмотря на ее относительно большую толщину.

Таблица 1

Механические и упруго-пластические свойства а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленок на Si подложках

$P$ , мН	$L$ , нм	$H$ , ГПа	$E$ , ГПа	$H/E$	$H^3/E^2$ , МПа	$W_e$ , %	$\sigma$ , МПа
10	149	15,2	144,3	0,105	168	82	490 ± 50
40	349	17,3	141,0	0,123	260	77	
100	604	17,5	135,2	0,129	293	69	

Здесь  $P$  – нагрузка на индентор;  $L$  – максимальная глубина проникновения индентора;  $H$  – твердость;  $E$  – модуль упругости;  $H/E$  – индекс пластичности;  $H^3/E^2$  – сопротивление пластической деформации;  $W_e$  – коэффициент упругого восстановления;  $\sigma$  – внутренние напряжения.

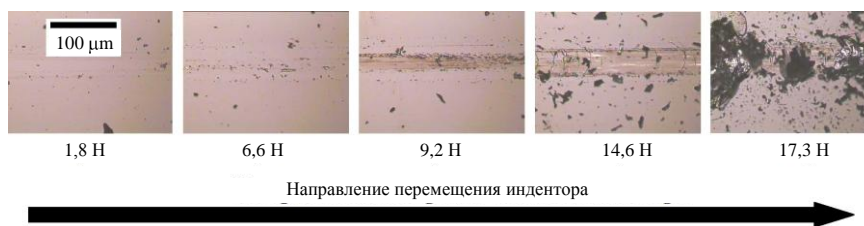


Рис. 2. Результаты скретч-теста  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленки на кремнии.

Для исследования трибологических характеристик  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленка наносилась на подложки из сплава ВК-8 и нержавеющей стали AISI 316L. В табл. 2 представлены результаты проведенных измерений. На обеих подложках наблюдаются низкие значения коэффициента трения и скорости износа. Наилучшие результаты были получены на подложках из сплава ВК-8, т. е. более твердых подложках. Тем не менее, на обоих образцах канавка износа очень узкая и неглубокая, что свидетельствует о высокой износостойкости  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленки. Близкие результаты трибологических испытаний были получены нами для  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленок на титановой подложке [30].

На рис. 3, а представлены зависимости коэффициента трения полученных образцов от пройденной дистанции. Из рисунка видно, что колебания коэффициента трения для пленки на сплаве ВК-8 менее выражены,

а среднее значение  $\mu$  в 1,5 раза меньше. На рис. 3, б и 3, в представлены снимки участка канавки износа, полученные с помощью оптической микроскопии. Видно, что ширина канавки на обоих образцах очень узкая. Механизм износа не включает в себя перенос материала из одной области в другую.

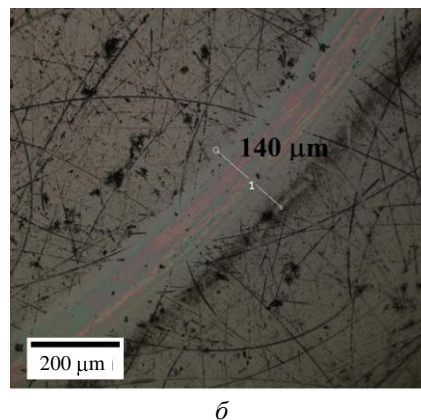
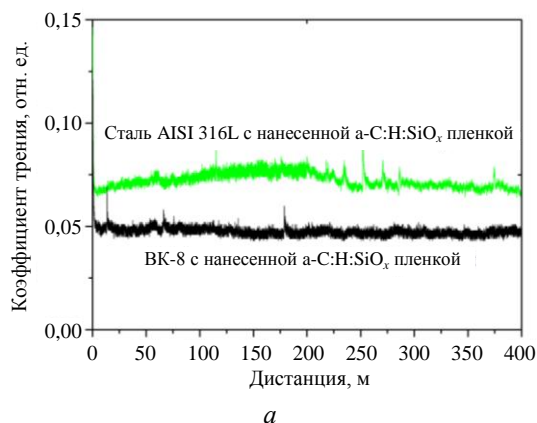
Следует отметить, что аналогичные пленки, полученные нами ранее [31] с использованием высокочастотного напряжения смещения подложки, характеризовались значительно большими значениями коэффициента трения (0,16) и скорости износа ( $1,3 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н м}$ ). Таким образом, показано, что использование импульсного биполярного напряжения смещения подложки в процессе нанесения  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленки по эффективности не уступает высокочастотному аналогу, но, при этом более перспективно с точки зрения масштабирования технологии на подложки большой площади.

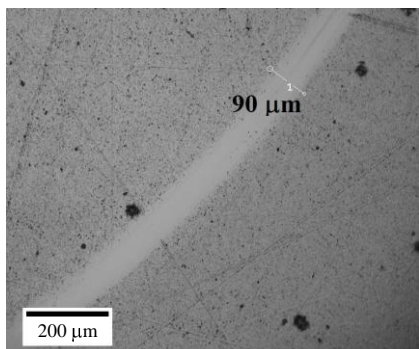
Таблица 2

Результаты трибологических испытаний образцов с  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленкой

Образец	$\mu$	$a$ , мкм	$b$ , мкм	$A$ , мкм <sup>2</sup>	$V$ , мм <sup>3</sup> /Н м
316L + $a\text{-C:H:SiO}_x$	0,074	0,56	140	50,1	$7,9 \times 10^{-7}$
ВК-8 + $a\text{-C:H:SiO}_x$	0,049	0,35	90	34,2	$5,3 \times 10^{-7}$

Здесь  $\mu$  – коэффициент трения;  $a$  – глубина лунки;  $b$  – ширина лунки;  $A$  – площадь поперечного сечения канавки износа;  $V$  – скорость износа.





6

*Рис. 3. Коэффициент трения (а) и оптические изображения канавки износа  $a\text{-C:H:SiO}_x$  пленки, нанесенной на сталь марки 316L (б) и на сплав ВК-8 (в).*

## Заключение

В настоящей работе обсуждаются результаты исследования структуры, механических и трибологических свойств а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленок, наносимых плазмохимическим методом с использованием импульсного биполярного напряжения смещения подложки. Нанесение а-С:H:SiO<sub>x</sub> пленки как на твердые материалы (сплав ВК-8), так и на более мягкие (например, сталь AISI 316L) обеспечивает снижение коэффициента трения и повышение износостойкости этих материалов. Поскольку пленка имеет низкие внутренние напряжения (менее 0,5 ГПа), то возможно нанесение относительно толстых пленок, толщиной до 7 мкм. Такие пленки характеризуются высокой твердостью (15–17 ГПа) и высокой адгезионной прочностью (критическая нагрузка, измеренная с помощью скретч-теста, не менее 15 Н). Пленка на нержавеющей стали марки 316L и сплаве ВК-8 обладает низким коэффициентом трения 0,074 и 0,049, а также низкой скоростью износа  $7,9 \times 10^{-7}$  и  $5,3 \times 10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/(Н м), соответственно.

*Авторы выражают благодарности Томскому региональному научному центру коллективного пользования ТНЦ СО РАН за предоставленный наноиндентор NanoTest 600. Кроме этого, выражаем благодарность научному сотруднику Института сильноточной электроники Крысиной О. В. за помощь в работе на оптическом микроскопе и проведении трибологических испытаний.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации, проект МК-1234.2020.8.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ankit Tyagi, Walia R. S., Qasim Murtaza, Shailesh M. Pandey, Pawan K. Tyagi, Bharat Bajaj // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. Vol. 78. P. 107.
2. Feng Wen, Jiaqi Liu, Jianlu Xue // Colloid and Surface Science. 2017. Vol. 2. P. 81.
3. Ferreira F., Aijaz A., Kubart T., Cavaleiro A., Oliveira J. // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 336. P. 92.

4. Constantinou M., Pervolaraki M., Koutsokeras L. // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 330. P. 185.
5. Randeniya L. K., Bendavis A., Martin P. J. // Diamond & Related Materials. 2009. Vol. 18. P. 1167.
6. Meskinis S., Tamuleviciene A. // Materials science. 2011. Vol. 17. № 4. P. 358.
7. Barve S. A., Chopade S. S., Kar R., Chand N. // Diamond and Related Materials. 2017. Vol. 71. P. 63.
8. Kumar N., Barve S. A., Chopade S. S., Rajib K. // Tribology International. 2015. Vol. 84. P. 124.
9. Santra T. S., Bhattacharyya T. K., Patel P., Tseng F. G., Barik T. K. // Surface & Coatings Technology. 2011. Vol. 206. P. 228.
10. Bociaga D., Sobczyk-Guzenda A., Szymanski W. // Applied Surface Science. 2017. Vol. 417. P. 23.
11. Bociaga D., Kaminska M., Sobczyk-Guzenda A. // Diamond and Related Materials. 2016. Vol. 67. P. 41.
12. Batory D., Jedrzejczak A., Szymanski W. // Thin Solid Films. 2015. Vol. 590. P. 299.
13. Kumar N., Barve S. A., Chopade S. S., Rajib K. // Tribology International. 2015. Vol. 84. P. 124.
14. Zavedeev E. V., Zilova O. S., Barinov A. D., Shupegin M. L., Arutyunyan N. R., Jaeggi B., Neuenschwander B., Pimenov S. M. // Diamond and Related Materials. 2017. Vol. 74. P. 45.
15. Hashmi S., Batalha G. F., Van Tyne C. J., Yilbas B. S. Comprehensive Materials Processing. – Amsterdam: Elsevier, 2014.
16. Kelly P. J., Hall R., O'Brien J., Bradley J. W., Roche G., Arnell R. D. // Surface and Coatings Technology. 2001. Vol. 635-641. P. 142.
17. Oskirko V. O., Sochugov N. S., Pavlov A. P. // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Vol. 57. № 5. P. 594.
18. Grenadyorov A. S., Solovyev A. A., Oskomov K. V., Oskirko V. O. // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2019. Vol. 37. Art. 061512.
19. Sochugov N. S., Oskirko V. O., Spirin R. E. // Instruments and Experimental Techniques. 2013. Vol. 56. № 2. P. 178.
20. Cai J. B., Wang X. L., Bai W. Q., Zhao X. Y., Wang T. Q., Tu J. P. // Applied Surface Science. 2013. Vol. 279. P. 450.
21. Lepicka M., Gradzka-Dahlke M., Pieniak D., Paserbiewicz K., Niewczas A. // Wear. 2017. Vol. 382-383. P. 62.
22. Peng X. L., Barber Z. H., Clyne T. W. // Surf. Coat. Technol. 2001. Vol. 138. P. 23.
23. Lotfian S., Mayer C., Chawla N., Llorca J., Misra A., Baldwin J. K., Molina-Aldareguia J. M. // Thin Solid Films. 2014. Vol. 571. P. 260.
24. Zhang S., Yan M., Yang Y., Zhang Y., Yan F., Li H. // Carbon. 2019. Vol. 151. P. 136.
25. Оскомов К. В., Соцугов Н. С., Соловьев А. А., Работкин С. В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 19. С. 20.
26. Lazauskas A., Grigaliūnas V., Meškinis Š., Ecarla F., Baltrusaitis J. // Appl. Surf. Sci. 2013. Vol. 276. P. 543.
27. Zavedeev E. V., Jaeggi B., Zuercher J., Neuenschwander B., Zilova O. S., Shupegin M. L., Presnia-

*kov M. Yu., Pimenov S. M. // Wear. 2018. Vol. 416–417. P. 1.*

28. *Ferrari A. C., Robertson J. // Physical Review B. 2000. Vol. 61. № 20. P. 14095.*

29. *Santra T. S., Liu C. H., Bhattacharyya T. K., Patel P., Barik T. K. // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107. Art. 124320.*

30. *Grenadyorov A. S., Solovyev A. A., Oskomov K. V., Onischenko S. A., Chernyavskiy A. M., Zhulkov M. O., Kaichev V. V. // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 381. Art. 125113.*

31. *Гренадеров А. С., Оскомов К. В., Соловьев А. А., Работкин С. В. // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 5. С. 51.*

PACS: 62.20.Qp, 68.37.–d

## **Investigation of mechanical and tribological properties of a-C:H:SiO<sub>x</sub> films deposited by PACVD using impulse bipolar bias voltage of the substrate**

*A. S. Grenadyorov, A. A. Solovyev, and K. V. Oskomov*

Institute of High Current Electronics SB RAS  
2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russia

*Received May 19, 2020*

***The a-C:H:SiO<sub>x</sub> films were deposited on silicon, stainless steel AISI 316L and WC-8%Co alloy substrates by PACVD using a bipolar pulsed bias voltage applied to the substrate. The possibility of deposition of high adhesive 7 μm thick a-C:H:SiO<sub>x</sub> films with a hardness of about 15–17 GPa and low internal stresses (less than 0.5 GPa) is shown. Tribological tests showed that the films have a low coefficient of friction (less than 0.08) and a low wear rate ( $\sim 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/N m).***

***Keywords:*** diamond-like carbon, a-C:H:SiO<sub>x</sub> films, hardness, wear resistance.

### REFERENCES

1. Tyagi Ankit, R. S. Walia, Qasim Murtaza, Shailesh M. Pandey, Pawan K. Tyagi, and Bharat Bajaj, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials **78**, 107 (2019).

2. Feng Wen, Jiaqi Liu, and Jianlu Xue, Colloid and Surface Science **2**, 81 (2017).

3. F. Ferreira, A. Aijaz, T. Kubart, A. Cavaleiro, and J. Oliveira, Surface and Coatings Technology **336**, 92 (2018).

4. M. Constantinou, M. Pervolaraki, and L. Koutsokeras, Surface and Coatings Technology **330**, 185 (2017).

5. L. K. Randeniya, A. Bendavis, and P. J. Martin, Diamond & Related Materials **18**, 1167 (2009).

6. S. Meskinis and A. Tamuleviciene, Materials science **17** (4), 358 (2011).

7. S. A. Barve, S. S. Chopade, R. Kar, and N. Chand, Diamond and Related Materials **71**, 63 (2017).

8. N. Kumar, S. A. Barve, S. S. Chopade, and K. Rajib, Tribology International **84**, 124 (2015).

9. T. S. Santra, T. K. Bhattacharyya, P. Patel, F. G. Tseng, and T. K. Barik, Surface & Coatings Technology **206**, 228 (2011).

10. D. Bociaga, A. Sobczyk-Guzenda, and W. Szymanski, Applied Surface Science **417**, 23 (2017).

11. D. Bociaga, M. Kaminska, and A. Sobczyk-Guzenda, Diamond and Related Materials **67**, 41 (2016).

12. D. Batory, A. Jedrzejczak, and W. Szymanski, Thin Solid Films **590**, 299 (2015).

13. N. Kumar, S. A. Barve, S. S. Chopade, and K. Rajib, Tribology International **84**, 124 (2015).

14. E. V. Zavedeev, O. S. Zilova, A. D. Barinov, M. L. Shupegin, N. R. Arutyunyan, B. Jaeggi, B. Neuenschwander, and S. M. Pimenov, Diamond and Related Materials **74**, 45 (2017).

15. S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, and B. S. Yilbas, *Comprehensive Materials Processing* (Elsevier, Amsterdam, 2014).



16. P. J. Kelly, R. Hall, J. O'Brien, J. W. Bradley, G. Roche, and R. D. Arnell, *Surf. Coat. Technol.* **635-641**, 142 (2001).
17. V. O. Oskirko, N. S. Sochugov, and A. P. Pavlov, *Instruments and Experimental Techniques.* **57** (5), 594 (2014).
18. A. S. Grenadyorov, A. A. Solovyev, K. V. Oskomov, and V. O. Oskirko, *J. of Vac. Sci. & Tech. A.* **37**, 061512 (2019).
19. N. S. Sochugov, V. O. Oskirko, and R. E. Spirin, *Instruments and Experimental Techniques.* **56** (2), 178 (2013).
20. J. B. Cai, X. L. Wang, W. Q. Bai, X. Y. Zhao, T. Q. Wang, and J. P. Tu, *Applied Surface Science* **279**, 450 (2013).
21. M. Lepicka, M. Gradzka-Dahlke, D. Pieniak, K. Paserbiewicz, and A. Niewczas, *Wear.* **382-383**, 62 (2017).
22. X. L. Peng, Z. H. Barber, and T. W. Clyne, *Surf. Coat. Technol.* **138**, 23 (2001).
23. S. Lotfian, C. Mayer, N. Chawla, J. Llorca, A. Misra, J. K. Baldwin, and J. M. Molina-Aldareguía, *Thin Solid Films.* **571**, 260 (2014).
24. S. Zhang, M. Yan, Y. Yang, Y. Zhang, F. Yan, and H. Li, *Carbon.* **151**, 136 (2019).
25. K. V. Oskomov, N. S. Sochugov, A. A. Solovyev, and S. V. Rabotkin, *Technical Physics Letters*, No. 19, 35 (2009).
26. A. Lazauskas, V. Grigaliūnas, Š. Meškiniš, F. Ecarla, and J. Baltrusaitis, *Appl. Surf. Sci.* **276**, 543 (2013).
27. E. V. Zavedeev, B. Jaeggi, J. Zuercher, B. Neuenschwander, O. S. Zilova, M. L. Shupegin, M. Yu. Presniakov, and S. M. Pimenov, *Wear.* **416-417**, 1 (2018).
28. A. C. Ferrari and J. Robertson, *Physical Review B.* **61** (20), 14095 (2000).
29. T. S. Santra, C. H. Liu, T. K. Bhattacharyya, P. Patel, and T. K. Barik, *J. Appl. Phys.* **107**, 124320 (2010).
30. A. S. Grenadyorov, A. A. Solovyev, K. V. Oskomov, S. A. Onischenko, A. M. Chernyavskiy, M. O. Zhul'kov, and V. V. Kaichev, *Surf. Coat. Technol.* **381**, 125113 (2020).
31. A. S. Grenadyorov, K. V. Oskomov, A. A. Solovyev, and S. V. Rabotkin, *Tech. Phys.*, No. 5, 86 (2016).

