

Методика синтеза люминофора – оксикарбида кремния

Иван Энрике Гарсия Балдерас	¹	ivan.garciabal@alumno.buap.mx	 0000-0003-1004-9054
Вячеслав Ю. Долгонос	¹	dolgonosov@inbox.ru	 0009-0000-9962-6211
Анастасия Ю. Жалыбина	¹	nastya.zhalybina@ya.ru	 0009-0004-3667-8275
Виктор А. Род	¹	vikdor.andreevich@mail.ru	 0009-0008-8333-4749
Александр Н. Утехин	¹	alutekhin@ya.ru	 0009-0003-1681-8579
Валерий Ю. Конюхов	²	volkon_1@mail.ru	 0000-0002-6128-9413

1 Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия

2 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31 г. Москва, 115409, Россия

Аннотация. Настоящее исследование посвящено разработке лабораторной методики синтеза люминофора - оксикарбида кремния путем химического осаждения из газовой фазы с использованием горячей нити и изучению свойств люминофора в форме тонких пленок и дисперсий. Пленки оксикарбида кремния в настоящем исследовании охарактеризованы с использованием передовых аналитических методов. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) проводилась на микроскопе Auriga 3916-FESEM, работающем при напряжении 1 кВ, что обеспечивало высокое разрешение для получения изображений морфологии поверхности и структурных особенностей. Систематическое варьирование количества мезопористых гранул кремнезема МСМ-41 (масса гранул 5, 10 и 15 г) позволяет провести детальный анализ влияния соотношения прекурсоров на свойства тонких пленок. Энергодисперсионный рентгеновский анализ пленок, полученных из разных количеств тетраэтоксисилана (ТЕОС) и мезопористых гранул кремнезема МСМ-41 подтверждает наличие углерода, кислорода и кремния, что соответствует использованию дозированных количеств тетраэтоксисилан (ТЕОС) и кремнезема (МСМ-41). Сканирующий электронный микроскопический анализ выявляет различные морфологии в тонких пленках оксикарбида кремния: при использовании только тетраэтоксисилана наблюдается поверхность с компактными агрегатами, гетерогенно распределенными, в то время как введение как мезопористых гранул кремнезема ТЕОС, так и мезопористых гранул кремнезема МСМ-41 приводит к формированию пористых кластеров. Установлена усиленная фотолуминесценция в пленках, содержащих кремнезем МСМ-41. Исследование раскрывает синергетическое взаимодействие между ТЕОС и мезопористыми гранулами кремнезема МСМ-41, предоставляя ценные сведения для оптимизации тонких пленок оксикарбида кремния для множества применений – от микроэлектроники до оптоэлектроники.

Ключевые слова: оксикарбид кремния, пористые кластеры, тетраэтоксисилан, кремнезем, фотолуминесценция, сканирующая электронная микроскопия.

Method for synthesizing phosphor – silicon oxycarbide

Ivan Enrique Garcia Balderas	¹	ivan.garciabal@alumno.buap.mx	 0000-0003-1004-9054
Vyacheslav K. Dolgonosov	¹	dolgonosov@inbox.ru	 0009-0000-9962-6211
Anastasia Yu. Zhalybina	¹	nastya.zhalybina@ya.ru	 0009-0004-3667-8275
Viktor A. Rod	¹	vikdor.andreevich@mail.ru	 0009-0008-8333-4749
Aleksandr N. Utekhin	¹	alutekhin@ya.ru	 0009-0003-1681-8579
Valery Yu. Konyukhov	²	volkon_1@mail.ru	 0000-0002-6128-9413

1 Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russia

2 National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe shosse, 31 Moscow, 115409, Russia

Abstract. This research is development of a laboratory-scale method for synthesizing silicon oxycarbide phosphor via hot-filament chemical vapor deposition and the characterization of the phosphor's properties in the form of thin films and dispersions. Silicon oxycarbide films in this study were characterized using advanced analytical techniques. Scanning electron microscopy (SEM) was performed on an Auriga 3916-FESEM microscope operating at 1 kV, providing high resolution for imaging surface morphology and structural features. Systematic variation in the amount of MCM-41 mesoporous silica granules (granule weights of 5, 10, and 15 g) allows for a detailed analysis of the effect of precursor ratios on the properties of thin films. Energy-dispersive X-ray diffraction analysis of films prepared from varying amounts of tetraethoxysilane (TEOS) and mesoporous silica MCM-41 granules confirms the presence of carbon, oxygen, and silicon, consistent with the use of controlled amounts of tetraethoxysilane (TEOS) and silica (MCM-41). Scanning electron microscopy reveals distinct morphologies in thin silicon oxycarbide films: using only tetraethoxysilane, a surface with compact, heterogeneously distributed aggregates is observed, while the introduction of both mesoporous TEOS and mesoporous silica MCM-41 granules leads to the formation of porous clusters. Enhanced photoluminescence was observed in films containing MCM-41 silica. The study reveals the synergistic interaction between TEOS and mesoporous silica beads MCM-41, providing valuable insights for the optimization of silicon oxycarbide thin films for a variety of applications ranging from microelectronics to optoelectronics.

Keywords: silicon oxycarbide, porous clusters, tetraethoxysilane, silica, photoluminescence, scanning electron microscopy.

Для цитирования

Гарсия Балдерас И., Долгонос В.Ю., Жалыбина А.Ю., Род В.А., Утехин А.Н., Конюхов В.Ю. Методика синтеза люминофора – оксикарбида кремния // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 299–305. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-299-305

For citation

Garcia Balderas I., Dolgonosov V.Yu., Zhalybina A.Yu., Rod V.A., Utehin A.N., Konyukhov V.Yu. Method for synthesizing phosphor – silicon oxycarbide. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 299–305. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-299-305

Введение

Оксикарбид кремния (SiOC) включающий кремний, кислород и углерод является неорганическим люминофором, с универсальными свойствами и многочисленными применениями в электронике, оптике и сенсорике [1–3]. Его отличает сочетание механической прочности, термической стабильности и оптических свойств [4–6]. Тонкие пленки оксикарида кремния, синтезированные методом химического осаждения из газовой фазы с использованием т. н. горячей нити, представляют собой перспективный материал для последующего измельчения и использования в производстве полимерных композитов светотехнического назначения [10–12]. В синтезе пленок оксикарида кремния применяется тетраэтоксисилан (TEOS) в сочетании с мезопористыми гранулами кремнезема (MCM-41) [15, 16]. Цель экспериментального исследования – изучение синергетического взаимодействия MCM-41 и TEOS в процессе синтеза тонких пленок оксикарида кремния [7]. Поставленная цель достигнута путем систематического исследования соотношения этих прекурсоров: MCM-41 и TEOS с оценкой их сочетанного влияния на свойства получаемых тонких пленок SiOC [9].

Настоящее исследование предоставляет описание взаимодействия между TEOS и MCM-41 при осаждении тонких пленок оксикарида кремния. Полученные результаты имеют значение для оптимизации процесса осаждения, улучшения свойств тонких пленок и открытия новых возможностей для различных применений в технологиях передовых материалов и устройств. Эти выводы способствуют оптимизации тонких пленок оксикарида кремния для разнообразных технологических применений – от микроэлектроники до оптоэлектроники.

Материалы и методы

Тонкие пленки оксикарида кремния были синтезированы методом химического осаждения из газовой фазы с использованием горячей нити (HFCVD) с применением двух различных конфигураций реагентов: а) исключительно тетраэтоксисилан (TEOS) и б) комбинация TEOS и мезопористых гранул кремнезема MCM-41. Количество MCM-41, введенное в процесс осаждения, варьировалось в трех различных концентрациях. Процесс осаждения проводился в вакуумной камере при базовом давлении 14 кПа. Тонкие пленки осаждались на подложки из р-типа кремния толщиной 279 ± 20 мкм и удельным сопротивлением от 1 до 10 Ом×см [13,14].

Для осаждения в трехгорлую колбу, один патрубок которой соединен с баллоном водорода высокой чистоты помещали 25 мл TEOS. Газообразный водород проходил через колбу, барботируясь сквозь жидкий TEOS. Полученная смесь паров TEOS и водорода – поступала в реакционную камеру с нагретой вольфрамовой нитью (катализатор). Температура нити накаливания – 1800 °С. Схема реакционной камеры представлена на рис. 1. В газовой фазе молекулы TEOS подвергались термодеструкции на вольфрамовой нити, что в присутствии водорода приводило к образованию частиц оксида кремния. Размещенные на расстоянии 4 мм от нити гранулы MCM-41 подвергались воздействию свободных атомов водорода и способствовали повышению содержания SiO_x в химическом составе полученных пленок оксикарида кремния (SiOC).

Пленки измельчались в шаровой мельнице с получением неоднородной дисперсии (рисунок 2).

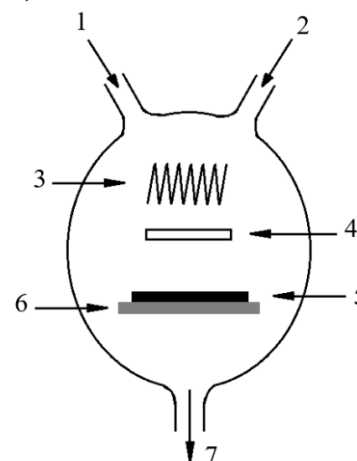


Рисунок 1. Схема компонентов внутри реакционной камеры системы HFCVD: 1 – подача водорода, 2 – подача тетраэтоксисилана, 3 – вольфрамовая нить, 4 – гранулы мезопористого кремнезема (MCM-41), 5 – подложка, 6 – основание подложки, 7 – выход газа

Figure 1. Diagram of the components inside the reaction chamber of the HFCVD system: 1 – hydrogen input, 2 – tetraethyl orthosilicate (TEOS) input, 3 – filament, 4 – mesoporous silica (MCM-41) granules, 5 – substrate, 6 – substrate holder, 7 – gases output

Материалы и методы

Исследования пленок и дисперсий оксикарида кремния проводили с помощью следующих методов. Морфологию полученных поверхностей и их структурные особенности изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Auriga 3916-FESEM, работающем при напряжении 1 кВ. Это обеспечивало высокое разрешение полученных изображений. Спектры энергодисперсионного рентгеновского анализа (ЭДР) для элементного

анализа получали на том же микроскопе Auriga 3916-FESEM, но с ускоряющим напряжением в интервале 1–3 кВ. Оптические свойства поверхностей изучали на флуоресцентном спектрофотометре Fluoromax-3, оснащённом ксеноновой лампой мощностью 150 Вт и фотоумножителем R928P в качестве детектора сигнала. Анализ проводился при 20 °С на волне возбуждения 330 нм с фильтром 370 нм.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 представлены энергодисперсионные рентгеновские спектры (EDX) тонких пленок оксикарбида кремния, синтезированных из чистого TEOS (1) и его комбинации с 15 г. MCM-41. Установленный элементный состав пленок: углерод (C), кислород (O) и кремний (Si) подтверждает образование искомого оксикарбида кремния из приведенных прекурсоров.

Наличие углерода в пленках обусловлено его содержанием в кремнийорганическом TEOS. В ходе реакции этоксигруппы (OC_2H_5) [17], входящие в состав TEOS, разлагаются и формируют Si-O-C – цепи в пленках SiOC [10].

Наличие кислорода в пленках обусловлено его содержанием как в молекулах TEOS, так и в мезопористых гранулах кремнезема. Химические взаимодействия, происходящие в процессе HFCVD, приводят к образованию в пленках цепочек Si-O-Si и Si-O-C и вхождению кислорода в состав SiOC. Существование указанных связей отражает ключевую роль кислорода в формировании химической структуры тонких пленок оксикарбида кремния.



Рисунок 2. СЭМ изображение дисперсии оксикарбида кремния (SiOC)

Figure 2. Silicon oxycarbide dispersion (SiOC)

На рисунке 2 представлены растровые электронные микрофотографии описанных выше пленок SiOC, полученные с помощью полевого эмиссионного электронного микроскопа (ПЭ-СЭМ).

Из фотографий видно, что пленки сформированы из компактных агломератов

оксикарбида кремния, неравномерно распределенных по поверхности. Образование агломератов

является следствием взаимодействия TEOS с горячей нитью вольфрама при температуре 1800 °С. В ходе этого взаимодействия возникают реакционноспособные частицы, которые конденсируются на поверхности подложки, образуя агломераты оксикарбида кремния

Компактность и гетерогенное распределение агрегатов обусловлены вариациями скоростей зародышеобразования и роста в процессе осаждения. Локальная концентрация молекул TEOS на поверхности подложки, зависящая от таких факторов, как температура, давление и скорости газового потока, приводит к неоднородному зародышеобразованию и последующему росту агрегатов оксикарбида кремния.

Кроме того, взаимодействие между молекулами TEOS и поверхностью подложки, а также газофазные реакции в процессе химического осаждения из паров, способствуют наблюдаемой морфологии поверхности. Вариации в адсорбции прекурсоров, поверхностной диффузии и кинетике реакций приводят к образованию агломератов различного размера и распределения по подложке.

Рисунок 4(а1) представляет увеличенное изображение рисунка 4(а) с увеличением 50,00 КХ, подчеркивающее детали. Этот усиленный вид позволяет наблюдать микроструктуры, неровности поверхности и возможные вариации толщины тонких пленок. Кроме того, он обеспечивает более детальное изучение морфологии поверхности и расположения кластеров в тонкой пленке оксикарбида кремния. Неравномерное распределение компактных агрегатов, происходящее из продуктов разложения TEOS, способствует формированию наблюдаемой поверхности.

На рисунке 4(б) показано появление характерных кластеров в матрице тонкой пленки оксикарбида кремния, обусловленное совместным использованием тетраэтоксисилана и MCM-41 в качестве реагентов в процессе химического осаждения из газовой фазы с использованием горячей нити. Кластеры обладают пористой структурой – характерной особенностью, обусловленной присутствием MCM-41 в процессе осаждения. Включение мезопористых гранул кремнезема приводит к образованию изолированных групп на поверхности пленки, что и определяет наблюдаемую морфологию пористых кластеров [11].

Пористые кластеры возникают из-за пространственного расположения мезопористых гранул кремнезема, вызывающего

неравномерное распределение на подложке. В результате тонкая пленка оксикарида кремния демонстрирует уникальную морфологию кластеров

с пористой структурой, увеличивающую общую площадь поверхности. Эта структурная вариация способна влиять на механические, оптические и электронные свойства пленки [7,8].

Рисунок 4(b1) представляет усиленное изображение рисунка 4(b) с увеличением 50,00 КХ, фокусируясь на деталях кластеров в тонкой пленке SiOC. Эта микрофотография подчеркивает наличие пористых агрегатов, прикрепленных к поверхности более крупных кластеров.

Наблюдение пористых агрегатов на рисунке 3(b1) побуждает рассмотреть их потенциальное влияние на оптические свойства тонких пленок SiOC. Пористая природа этих агрегатов способствует увеличению площади поверхности, потенциально облегчая более интенсивное взаимодействие с падающим светом. Сеть пор внутри агрегатов служит местами локализации заряда, вводя вариации в электронную структуру, которые могут влиять на характеристики излучения тонкой пленки SiOC [19,20].

Наличие пор в агрегатах вводит дополнительную сложность в электронную среду, потенциально приводя к эффектам локального квантового ограничения. Эти эффекты, возникающие из пространственного ограничения носителей заряда в наноразмерных структурах, могут существенно влиять на зонную структуру и, следовательно, на длины волн излучения.

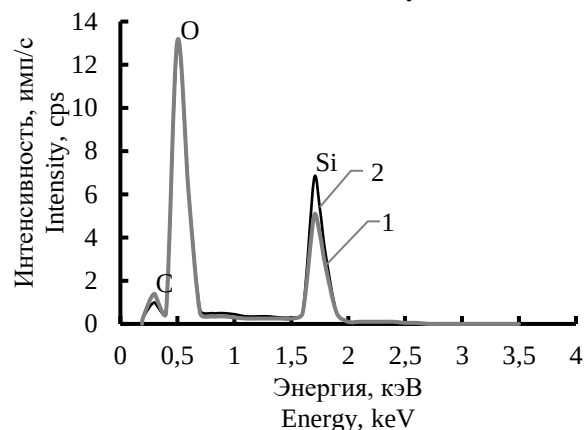


Рисунок 3. ЭДС-спектры тонких пленок оксикарида кремния, полученных с использованием: 1 – только TEOS, 2 – TEOS и MCM-41 в качестве реагентов

Figure 3. EDS spectra of silicon oxycarbide thin films using: 1 – only TEOS, 2 – TEOS and MCM-41 as reactants

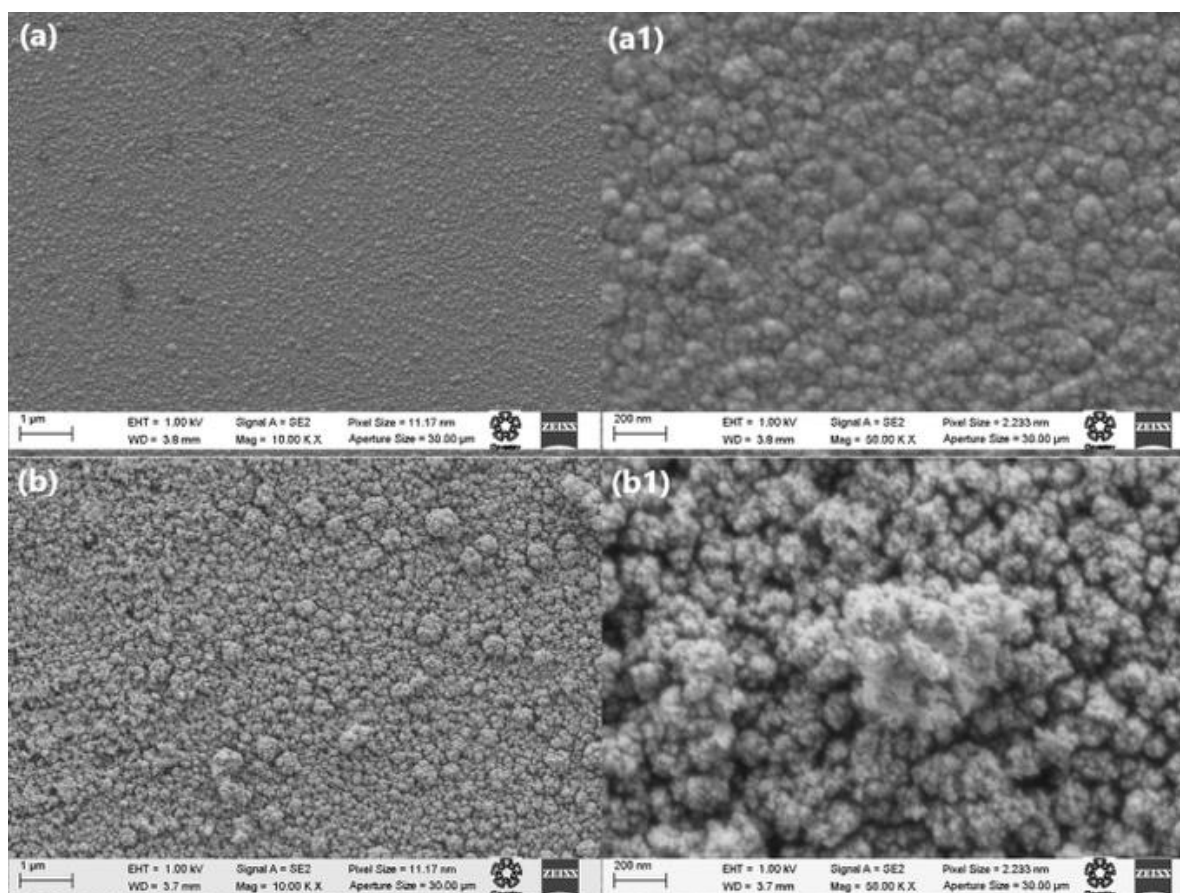


Рисунок 4. ПЭ-СЭМ микрофотографии тонких пленок оксикарида кремния, полученных методом HFCVD с использованием а) только TEOS и б) TEOS и MCM-41 в качестве реагентов

Figure 4. FE-SEM micrographs of silicon oxycarbide thin films prepared by HFCVD using a) only TEOS and b) TEOS and MCM-41 as reactants

На рисунке 5 представлены спектры фотолюминесценции тонких пленок SiOC, синтезированных методом химического осаждения из газовой фазы с использованием горячей нити. Были использованы два различных подхода к синтезу: (1) применение только тетраэтоксисилана (TEOS) и (2–4) использование TEOS в комбинации с различным количеством MCM-41 – 5, 10 и 15 г. – в качестве прекурсоров. Для устранения влияния толщины пленки на анализ интенсивность каждого спектра фотолюминесценции была нормирована путем деления абсолютной интенсивности PL на соответствующую толщину пленки.

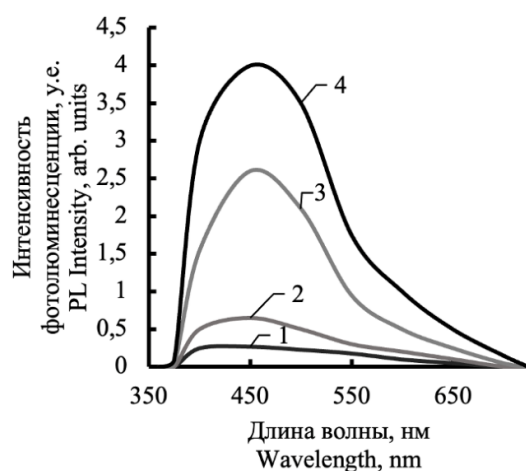


Рисунок 5. Спектры фотолюминесценции тонких пленок оксикарида кремния, полученных методом HFCVD с использованием ТЭОС и МСМ-41 в качестве реагентов: 1 – только ТЭОС, 2 – ТЭОС и 5 г МСМ-41, 3 – ТЭОС и 10 г МСМ-41, 4 – ТЭОС и 15 г МСМ-41

Figure 5. Photoluminescence spectra of silicon oxycarbide thin films prepared by HFCVD using TEOS and MCM-41 as reactants: 1 – only TEOS, 2 – TEOS and 5 g MCM-41, 3 – TEOS and 10 g MCM-41, 4 – TEOS and 15 g MCM-41

Основная особенность спектров – широкая полоса фотолюминесценции в диапазоне от 375 до 725 нм. Примечательно, что образец, приготовленный с наибольшим содержанием МСМ-41, продемонстрировал наивысшую интенсивность фотолюминесценции среди исследованных условий. Этот пик в диапазоне 375–725 нм обусловлен эффектами квантового ограничения, возникающими при радиационной рекомбинации фото возбужденных носителей в состояниях запрещенной зоны, связанных с группами связей C-Si/Si-O-C [21,22].

В соответствии с полученными результатами наблюдается прямая корреляция между интегрированной интенсивностью флуоресценции и плотностью связей Si-O. Увеличение интенсивности флуоресценции тонких пленок SiOC можно объяснить наличием более высокой плотности частиц SiOx [23]. Это явление обусловлено использованием мезопористых гранул кремнезема и TEOS в качестве реагентов в процессе HFCVD [18]. По сути, включение МСМ-41 в смесь прекурсоров повышает плотность связей Si-O, что приводит к более выраженным эффектам квантового ограничения и, следовательно, к усилению фотолюминесценции в синтезированных тонких пленках SiOC.

Заключение

Согласно результатам ПЭ-СЭМ, контролируемое осаждение TEOS в газовой фазе привело к образованию поверхности с компактными агрегатами, неравномерно распределенными. Совместное использование TEOS и МСМ-41 привело к формированию пористых кластеров, увеличивающих общую площадь поверхности и вносящих потенциальные вариации в оптические свойства.

Установленный с помощью энергодисперсионного рентгеновского спектра элементный состав полученных пленок: углерод (C), кислород (O) и кремний (Si) подтвердил образование искомого оксикарида кремния из приведенных прекурсоров.

Спектры фотолюминесценции продемонстрировали широкую полосу излучения от 375 до 725 нм, причем образец с наибольшим содержанием МСМ-41 показал наивысшую интенсивность фотолюминесценции.

Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию взаимодействия между TEOS и МСМ-41 при синтезе тонких пленок оксикарида кремния. Итоги исследования имеют значение для оптимизации процесса осаждения, настройки свойств тонких пленок и исследования новых возможностей применения в технологиях передовых материалов и устройств. Данное исследование открывает новые перспективы для дальнейших разработок в разнообразных технологических приложениях – от микроэлектроники до оптоэлектроники.

Литература

- 1 Colombo P., Hellmann J.R., Shelleman D.L. Mechanical Properties of Silicon Oxycarbide Ceramic Foams // Journal of the American Ceramic Society. 2001. V. 84. № 10. P. 2245–2251. doi: 10.1111/j.1151-2916.2001.tb00996.x
- 2 Ivanova Y.Y., Vueva Y.E. Silicon Oxycarbide Glasses from Gel Hybrid Structures // Advanced Materials Research. 2008. V. 39–40. P. 77–80. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.39-40.77
- 3 Renlund G.M., Prochazka S., Doremus R.H. Silicon oxycarbide glasses: Part II. Structure and properties // Journal of Materials Research. 1991. V. 6. № 12. P. 2723–2734. doi: 10.1557/jmr.1991.2723

- 4 Liao N., Zheng B., Zhou H., Xue W. Effect of carbon content on the structure and electronic properties of silicon oxycarbide anodes for lithium-ion batteries: a first-principles study // *Journal of Materials Chemistry A*. 2015. V. 3. № 9. P. 5067–5071. doi: 10.1039/C4TA06932C
- 5 Liao N., Zhou H., Zheng B., Xue W. Silicon Oxycarbide-Derived Carbon as Potential NO₂ Gas Sensor: A First Principles' Study // *IEEE Electron Device Letters*. 2018. V. 39. № 11. P. 1760–1763. doi: 10.1109/LED.2018.2869158
- 6 Sorarù G.D., Dallapiccola E., D'Andrea G. Mechanical Characterization of Sol–Gel-Derived Silicon Oxycarbide Glasses // *Journal of the American Ceramic Society*. 1996. V. 79. № 8. P. 2074–2080. doi: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb08939.x
- 7 Yu X., Yin L., Lu H. et al. Third-order optical nonlinearity in silicon oxycarbide films // *Optical Materials*. 2020. V. 104. P. 109945. doi: 10.1016/j.optmat.2020.109945
- 8 Bois L., Maquet J., Babonneau F., Bahloul D. Structural Characterization of Sol-Gel Derived Oxycarbide Glasses. 2. Study of the Thermal Stability of the Silicon Oxycarbide Phase // *Chemistry of Materials*. 1995. V. 7. № 5. P. 975–981. doi: 10.1021/cm00053a025
- 9 Miyazaki H. Structure and Optical Properties of Silicon Oxycarbide Films Deposited by Reactive RF Magnetron Sputtering Using a SiC Target // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2008. V. 47. № 11R. P. 8287. doi: 10.1143/JJAP.47.8287
- 10 Mazo M.A., Nistal A., Caballero A.C. et al. Influence of processing conditions in TEOS/PDMS derived silicon oxycarbide materials. Part 1: Microstructure and properties // *Journal of the European Ceramic Society*. 2013. V. 33. № 6. P. 1195–1205. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2012.11.022
- 11 Qin J., Li B. Synthesis, Characterization and Catalytic Performance of Well-ordered Crystalline Heteroatom Mesoporous MCM-41. Preprints. 2016. doi: 10.20944/preprints201612.0094.v1
- 12 Deshpande S.V., Dupuie J.L., Gulari E. Hot filament assisted deposition of silicon nitride thin films // *Applied Physics Letters*. 1992. V. 61. № 12. P. 1420–1422. doi: 10.1063/1.107557
- 13 Itano M., Kezuka T. Particle Adhesion and Removal on Wafer Surfaces in RCA Cleaning // *Ultraclean Surface Processing of Silicon Wafers*. 1998. P. 115–136. doi: 10.1007/978-3-662-03535-1_10
- 14 Hattori T. Trends in Wafer Cleaning Technology // *Ultraclean Surface Processing of Silicon Wafers*. 1998. P. 437–450. doi: 10.1007/978-3-662-03535-1_32
- 15 Bruhanova Y.A., Menshakov A.I., Skorynina P.A. Synthesis of SiAlCO Coatings by Thermal Anodic Evaporation of Al and Decomposition of Tetraethoxysilane in an Arc Discharge with a Sectional Anode // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2024. V. 18. Suppl. 1. P. S100–S105. doi: 10.1134/S1027451024701500
- 16 Zhao X.S., Lu G.Q., Hu X. Characterization of the structural and surface properties of chemically modified MCM-41 material // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2000. V. 41. № 1–3. P. 37–47. doi: 10.1016/S1387-1811(00)00262-6
- 17 Kusuda Y., Asai Y., Miyashita T., Nishinaka H. Plasma-enhanced chemical vapor deposition of SiO₂ films at 400 kHz and 100°C using tetraethyl orthosilicate with oxygen and SiH₄ with nitrous oxide // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2025. V. 64. № 4. P. 04SP48. doi: 10.35848/1347-4065/adb989
- 18 Wang Z., Zhao Q., Wang D., Cui C. Synthesis and characterization of ordered mesoporous MCM-41 from natural chlorite and its application in methylene blue adsorption // *Clays and Clay Minerals*. 2021. V. 69. № 2. P. 217–231. doi: 10.1007/s42860-021-00123-5
- 19 Marchewka J., Jeleń P., Rutkowska I. et al. Chemical structure and microstructure characterization of ladder-like silsesquioxanes derived porous silicon oxycarbide materials // *Materials*. 2021. V. 14. № 6. P. 1340. doi: 10.3390/ma14061340
- 20 Gongalsky M.B., Tsurikova U.Y.A., Gonchar K.A. et al. Quantum-confinement effect in silicon nanocrystals during their dissolution in model biological fluids // *Semiconductors*. 2021. V. 55. № 1. P. 61–65. doi: 10.1134/S1063782621010067
- 21 Lu Z.H., Lockwood D.J., Baribeau J.M. Quantum confinement and light emission in SiO₂/Si superlattices // *Nature*. 1995. V. 378. № 6554. P. 258–260. doi: 10.1038/378258a0
- 22 Hansda S., Sarkar D., Kundu S. et al. Structural and optical properties of silicon oxycarbide thin films using silane based precursors via sol-gel process // *Thin Solid Films*. 2024. V. 791. P. 140226. doi: 10.1016/j.tsf.2024.140226
- 23 Ramazanov M.A., Shirinova H.A., Nuriyeva S.G. et al. Structure and optic properties of the nanocomposites based on polypropylene and amorphous silica nanoparticles // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2023. V. 36. № 4. P. 1762–1774. doi: 10.1177/08927057211064222

References

- 1 Colombo P., Hellmann J.R., Shelleman D.L. Mechanical Properties of Silicon Oxycarbide Ceramic Foams. *Journal of the American Ceramic Society*. 2001. vol. 84. no. 10. pp. 2245–2251. doi: 10.1111/j.1151-2916.2001.tb00996.x.
- 2 Ivanova Y.Y., Vueva Y.E. Silicon Oxycarbide Glasses from Gel Hybrid Structures. *Advanced Materials Research*. 2008. vol. 39–40. pp. 77–80. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.39-40.77.
- 3 Renlund G.M., Prochazka S., Doremus R.H. Silicon oxycarbide glasses: Part II. Structure and properties. *Journal of Materials Research*. 1991. vol. 6. no. 12. pp. 2723–2734. doi: 10.1557/jmr.1991.2723.
- 4 Liao N., Zheng B., Zhou H., Xue W. Effect of carbon content on the structure and electronic properties of silicon oxycarbide anodes for lithium-ion batteries: a first-principles study. *Journal of Materials Chemistry A*. 2015. vol. 3. pp. 5067–5071. doi: 10.1039/C4TA06932C.
- 5 Liao N., Zhou H., Zheng B., Xue W. Silicon Oxycarbide-Derived Carbon as Potential NO₂ Gas Sensor: A First Principles' Study. *IEEE Electron Device Letters*. 2018. vol. 39. no. 11. pp. 1760–1763. doi: 10.1109/LED.2018.2869158.
- 6 Sorarù G.D., Dallapiccola E., D'Andrea G. Mechanical Characterization of Sol–Gel-Derived Silicon Oxycarbide Glasses. *Journal of the American Ceramic Society*. 1996. vol. 79. no. 8. pp. 2074–2080. doi: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb08939.x.
- 7 Yu X., Yin L., Lu H. et al. Third-order optical nonlinearity in silicon oxycarbide films. *Optical Materials*. 2020. vol. 104. article 109945. doi: 10.1016/j.optmat.2020.109945.
- 8 Bois L., Maquet J., Babonneau F., Bahloul D. Structural Characterization of Sol-Gel Derived Oxycarbide Glasses. 2. Study of the Thermal Stability of the Silicon Oxycarbide Phase. *Chemistry of Materials*. 1995. vol. 7. no. 5. pp. 975–981. doi: 10.1021/cm00053a025.
- 9 Miyazaki H. Structure and Optical Properties of Silicon Oxycarbide Films Deposited by Reactive RF Magnetron Sputtering Using a SiC Target. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2008. vol. 47. no. 11R. pp. 8287–8290. doi: 10.1143/JJAP.47.8287.
- 10 Mazo M.A., Nistal A., Caballero A.C. et al. Influence of processing conditions in TEOS/PDMS derived silicon oxycarbide materials. Part 1: Microstructure and properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2013. vol. 33. no. 6. pp. 1195–1205. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2012.11.022.
- 11 Qin J., Li B. Synthesis, Characterization and Catalytic Performance of Well-ordered Crystalline Heteroatom Mesoporous MCM-41. Preprints. 2016. [Online first]. doi: 10.20944/preprints201612.0094.v1.
- 12 Deshpande S.V., Dupuie J.L., Gulari E. Hot filament assisted deposition of silicon nitride thin films. *Applied Physics Letters*. 1992. vol. 61. no. 12. pp. 1420–1422. doi: 10.1063/1.107557.

- 13 Itano M., Kezuka T. Particle Adhesion and Removal on Wafer Surfaces in RCA Cleaning. In: Ultraclean Surface Processing of Silicon Wafers. 1998. pp. 115–136. doi: 10.1007/978-3-662-03535-1_10.
- 14 Hattori T. Trends in Wafer Cleaning Technology. In: Ultraclean Surface Processing of Silicon Wafers. 1998. pp. 437–450. doi: 10.1007/978-3-662-03535-1_32.
- 15 Bruhanova Y.A., Menshakov A.I., Skorynina P.A. Synthesis of SiAlCO Coatings by Thermal Anodic Evaporation of Al and Decomposition of Tetraethoxysilane in an Arc Discharge with a Sectional Anode. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2024. vol. 18. suppl. 1. pp. S100–S105. doi: 10.1134/S1027451024701500.
- 16 Zhao X.S., Lu G.Q., Hu X. Characterization of the structural and surface properties of chemically modified MCM-41 material. Microporous and Mesoporous Materials. 2000. vol. 41. no. 1–3. pp. 37–47. doi: 10.1016/S1387-1811(00)00262-6.
- 17 Kusuda Y., Asai Y., Miyashita T., Nishinaka H. Plasma-enhanced chemical vapor deposition of SiO₂ films at 400 kHz and 100°C using tetraethyl orthosilicate with oxygen and SiH₄ with nitrous oxide. Japanese Journal of Applied Physics. 2025. vol. 64. no. 4. article 04SP48. doi: 10.35848/1347-4065/adb989.
- 18 Wang Z., Zhao Q., Wang D., Cui C. Synthesis and characterization of ordered mesoporous MCM-41 from natural chlorite and its application in methylene blue adsorption. Clays and Clay Minerals. 2021. vol. 69. no. 2. pp. 217–231. doi: 10.1007/s42860-021-00123-5.
- 19 Marchewka J., Jeleń P., Rutkowska I. et al. Chemical structure and microstructure characterization of ladder-like silsesquioxanes derived porous silicon oxycarbide materials. Materials. 2021. vol. 14. no. 6. article 1340. doi: 10.3390/ma14061340.
- 20 Gongalsky M.B., Tsurikova U.Y.A., Gonchar K.A. et al. Quantum-confinement effect in silicon nanocrystals during their dissolution in model biological fluids. Semiconductors. 2021. vol. 55. no. 1. pp. 61–65. doi: 10.1134/S1063782621010067.
- 21 Lu Z.H., Lockwood D.J., Baribeau J.M. Quantum confinement and light emission in SiO₂/Si superlattices. Nature. 1995. vol. 378. no. 6554. pp. 258–260. doi: 10.1038/378258a0.
- 22 Hansda S., Sarkar D., Kundu S. et al. Structural and optical properties of silicon oxycarbide thin films using silane based precursors via sol-gel process. Thin Solid Films. 2024. vol. 791. article 140226. doi: 10.1016/j.tsf.2024.140226.
- 23 Ramazanov M.A., Shirinova H.A., Nuriyeva S.G. et al. Structure and optic properties of the nanocomposites based on polypropylene and amorphous silica nanoparticles. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2023. vol. 36. no. 4. pp. 1762–1774. doi: 10.1177/08927057211064222.

Сведения об авторах

Иван Энрике Гарсия Балдерас аспирант, полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, ivan.garciabal@alumno.buap.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-1004-9054>

Вячеслав Ю. Долгонос аспирант, полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, dolgonosov@inbox.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9962-6211>

Анастасия Ю. Жалыбина студент, полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, nastya.zhalybina@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0004-3667-8275>

Виктор А. Род заведующий лабораторией материаловедения, полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, vikdor.andreevich@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-8333-4749>

Александр Н. Утехин д.х.н., полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, alutekhin@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0003-1681-8579>

Валерий Ю. Конюхов д.х.н., профессор, кафедра общей химии (№19) института общей профессиональной подготовки, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31, г. Москва, 115409, Россия, volkon_1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6128-9413>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Ivan Enrique Garcia Balderas graduate student, polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, ivan.garciabal@alumno.buap.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-1004-9054>

Vyacheslav K. Dolgonosov graduate student, polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, dolgonosov@inbox.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9962-6211>

Anastasia Yu. Zhalybina student, polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, nastya.zhalybina@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0004-3667-8275>

Viktor A. Rod head of the materials science laboratory, polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, vikdor.andreevich@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-8333-4749>

Aleksandr N. Utekhin Dr. Sci. (Chem.), polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, alutekhin@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0003-1681-8579>

Valery Yu. Konyukhov Dr. Sci. (Chem.), professor, department of General Chemistry (No. 19) of the Institute of General Professional Training, National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe shosse, 31 Moscow, 115409, Russia, volkon_1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6128-9413>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/12/2025	После редакции 08/01/2026	Принята в печать 20/01/2026
Received 11/12/2025	Accepted in revised 08/01/2026	Accepted 20/01/2026