

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 536.21
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-223-234>

Поступило в редакцию 17.09.2018
Received 17.09.2018

**Член-корреспондент П. С. Гринчук¹, Х. Абухимд², А. В. Акулич¹, М. В. Кияшко¹,
Д. В. Соловей¹, М. О. Степкин¹, В. В. Торопов¹, М. Д. Шашков¹, А. А. Хорт¹, М. Ю. Лях¹**

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Национальный нанотехнологический исследовательский центр, Эр-Рияд, Саудовская Аравия*

**ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНАЯ КАРБИДОКРЕМНИЕВАЯ КЕРАМИКА
ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ОПТИКИ**

Аннотация. Описаны важные аспекты разработанной технологии изготовления карбидокремниевых подложек для оптических зеркал, предназначенных для перспективного использования в космических приложениях. Показано, что получен материал с лучшим сочетанием теплофизических и механических свойств (критерий Максудова) среди известных аналогов, применяемых при создании астрономических зеркал. Описаны характеристики изготовленной из него облегченной подложки зеркала диаметром 205 мм, проведено сравнение с параметрами большинства известных зеркал, изготовленных из карбида кремния для различных космических миссий и в качестве опытных образцов. Показано, что изготовленная подложка характеризуется низкой удельной массой – 16,5 кг/м², что сопоставимо с показателями лучших мировых аналогов.

Ключевые слова: карбид кремния, оптическое зеркало, коэффициент теплопроводности, критерий Максудова

Для цитирования. Высокопроводящая карбидокремниевая керамика для крупногабаритной космической оптики / П. С. Гринчук [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 223–234. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-223-234>

**Corresponding Member Pavel S. Grinchuk¹, Hatem Abuhimad², Andrei V. Akulich¹, Mikhail V. Kiyashko¹,
Dmitry V. Solovei¹, Mikhail O. Stepkin¹, Victor V. Toropov¹, Mikhail D. Shashkov¹, Aleksandr A. Khort¹, Maria Yu. Liakh¹**

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

²*National Nanotechnology Research Center King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh, Saudi Arabia*

HIGH THERMAL CONDUCTIVITY SILICON-CARBIDE CERAMICS FOR LARGE-SIZE SPACE OPTICS

Abstract. The paper describes the important aspects of the developed technology for manufacturing silicon-carbide substrates for optical mirrors intended for future use in space applications. It is shown that the material with the best combination of thermophysical and mechanical properties (Maksutov's criterion) among the known analogs used for making astronomical mirrors is obtained. The characteristics of a mirror made of a lightweight mirror substrate with a diameter of 205 mm are described, compared with the parameters of most known mirrors made of silicon carbide for various space missions and as prototypes. It is shown that the produced substrate is characterized by a rather low specific gravity – 16.5 kg/m², which is comparable with the indicators of the best world analogues.

Keywords: silicon carbide, optical mirror, thermal conductivity coefficient, Maksutov's criterion

For citation: Grinchuk P. S., Abuhimad H., Akulich A. V., Kiyashko M. V., Solovei D. V., Stepkin M. O., Toropov V. V., Shashkov M. D., Khort A. A., Liakh M. Yu. High thermal conductivity silicon-carbide ceramics for large-size space optics. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 223–234 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-223-234>

Оптические телескопы с большой апертурой зеркал были и остаются ключевыми инструментами для изучения дальнего и ближнего космоса. Создание таких инструментов связано с потребностью подтверждения космологических теорий возникновения и эволюции Вселенной,

с прогрессом в понимании ее устройства. Характерным примером может служить недавнее обнаружение около трети недостающей барионной массы Вселенной в межгалактических облаках в форме газообразного кислорода при температуре около 1 млн градусов [1]. Это открытие было сделано в том числе с помощью одного из инструментов космического телескопа Хаббл. Основной помехой для астрономических наблюдений в видимой и инфракрасной области спектра является земная атмосфера. В настоящее время существует три основных способа решения данной проблемы: установка телескопов в высокогорных местах с хорошим астроклиматом для уменьшения влияния как атмосферной турбулентности, так и рассеяния и поглощения оптического излучения (пустыня Атакама в Чили, Канарские и Гавайские острова), применение адаптивной оптики либо запуск инструментов в космос. Наиболее известные из запущенных или планируемых к запуску космических телескопов – это телескоп имени Хаббла (1990 г., апертура 2,5 м, зеркало из кварцевого стекла), телескоп Гершеля (2009 г., 3,5 м, карбид кремния), телескоп имени Джеймса Уэбба (планируется к запуску в 2021 г., 6,5 м, бериллий).

Разработчики как космических, так и наземных телескопов стремятся к увеличению апертуры инструментов, которая, прежде всего, определяется диаметром главного зеркала. Ключевым моментом создания больших зеркал является возможность уменьшения массы зеркала при условии сохранения качества и формы поверхности [2]. Более тонкие и легкие зеркала позволяют уменьшить массу оправок и монтажных конструкций, как следствие – уменьшить стоимость всего инструмента. Одним из важнейших следствий уменьшения толщины зеркала является уменьшение его тепловой инерционности, что весьма положительно сказывается на качестве изображения [3].

Важным отличием зеркала космического телескопа от зеркала наземного телескопа является то, что оно изготавливается и контролируется в условиях силы тяготения, а эксплуатируется в условиях невесомости [2]. Ключевыми требованиями для выводимых на орбиту инструментов являются их масса и механическая прочность материалов, из которых они изготавливаются. С точки зрения технологии изготовления важна еще механическая обрабатываемость и хрупкость материала. Традиционные для зеркал больших оптических телескопов материалы – это ситалл СО-115М, церодур и их аналоги [2; 4]. Однако эти материалы уже не могут удовлетворить всем требованиям при создании крупногабаритных зеркал [3; 4]. Поэтому активно ведутся работы по применению новых материалов, наиболее перспективными из которых считаются карбид кремния и бериллий [4]. Отметим, что идея использования карбида кремния для изготовления зеркал была высказана и апробирована еще в середине 1970-х годов [5].

Существует несколько критериев выбора материала для изготовления крупногабаритных зеркал для пассивных оптических систем. Основными из них являются удельная жесткость $\Psi_1 = E / \rho$ (иногда используется термин «механическая добротность») и тепловая добротность $\Psi_2 = \lambda / \alpha \rho C_p$ [4]. Здесь ρ – плотность материала, кг/м³; E – модуль упругости, ГПа; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); α – температурный коэффициент линейного расширения, К⁻¹ (ТКЛР); C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К). Чем выше эти критерии, тем лучше подходит материал для применения в качестве основы зеркала. Еще в конце 1950-х годов известный ученый-оптик, разработчик менисковой оптической системы, носящей его имя, Дмитрий Дмитриевич Максудов ввел более общий критерий [6]. Этот критерий позволяет более точно охарактеризовать применимость материала для оптических зеркал и активно используется в оптическом приборостроении. С учетом указанных параметров традиционные оптические материалы типа церодур или астроситалл (ряд стран имеет аналоги данных материалов, известные под различными торговыми марками) заметно уступают новым материалам – карбиду кремния и бериллию. Детальное сравнение материалов будет приведено ниже. Наилучшим соотношением прочностных свойств и плотности обладает бериллий. Однако он имеет большой ТКЛР, что в случае космической оптики приводит к необходимости создания сложной системы терморегулирования. Помимо этого, недостатком бериллия является его токсичность, что затрудняет изготовление зеркала. Хорошим сочетанием физико-механических свойств обладает именно карбид кремния. Однако до последнего времени его широкое применение сдерживала сложность механической обработки, поскольку карбид кремния принадлежит к одним из наиболее твердых материалов в природе [4].

В настоящей работе представлены результаты исследований по получению облегченных подложек для оптических зеркал на основе карбида кремния. Авторам удалось решить ряд ключевых проблем, в том числе и проблему механической обработки, и получить как материал с уникальным для оптических приложений сочетанием свойств, так и разработать методики облегчения подложек, позволившие достигнуть удельных массогабаритных параметров зеркала, сопоставимых с лучшими мировыми аналогами.

Разработанная технология изготовления подложки для зеркала из карбидокремниевой керамики основана на методе шликерного литья. Принципиальный выбор в пользу данного метода формирования подложки зеркала обусловлен рядом факторов, важнейшими из которых являются возможность управления в процессе изготовления количеством и качеством углерода в материале, пористостью материала перед процессом реакционного спекания и, как следствие, управление процессом силицирования (насыщения заготовки кремнием), возможность относительно простого масштабирования изделия, выполнения сложной механической обработки изделия после определенных технологических стадий. Разработанная технология получения карбидокремниевой подложки для зеркала состоит более чем из 20 технологических операций [7–10]. Вначале с использованием первичных микропорошков карбида кремния (85–87 мас. %) и термопластичного связующего путем шликерного литья формируется заготовка. Затем термопластичная связка из детали удаляется термическим способом, в результате чего заготовка становится пористой. Полученная карбидокремниевая матрица пропитывается жидкой фенолформальдегидной смолой, подвергается сушке и последующему низкотемпературному пиролизу и высокотемпературной карбонизации, в результате чего поровое пространство SiC-матрицы частично заполняется углеродом. При этом операции пропитки, сушки, пиролиза и карбонизации могут повторяться несколько раз до достижения требуемого содержания углерода в исходной пористой матрице. В результате такой обработки в матрице образуется наноструктурированный графит с характерной толщиной чешуек в 20–30 нм [11–13]. Финальной стадией формирования подложки является реакционное спекание, когда при нагреве по специально разработанному температурно-временному режиму до температур 1800–1900 °С расплавленный кремний и пары кремния проникают в пористую матрицу и, взаимодействуя с углеродом, образуют вторичный карбид кремния в объеме пор [9]. Именно вторичный карбид кремния связывает в монолитную поликристаллическую структуру получаемый материал. Оставшееся пространство, не занятое карбидом кремния, заполняется свободным кремнием. Одной из основных задач при производстве такого двухкомпонентного Si/SiC композита является получение керамики с высокой плотностью, а также с минимальными пористостью и остаточным содержанием свободного кремния. Подробно технология описана в [7–13], поэтому здесь мы остановимся только на кратком обсуждении ключевых проблем, требовавших решения при создании и совершенствовании данной технологии.

Одна из проблем связана с получением высокоплотной керамики. Для увеличения плотности конечной керамики необходимо подобрать такие фракции коммерчески доступных исходных порошков карбида кремния, которые бы обеспечили наиболее плотную упаковку микрочастиц. Данная задача решалась с помощью предварительного компьютерного моделирования на основе методов молекулярной динамики. В данном случае каждая частица порошка рассматривалась как отдельная «молекула» и вводился модельный потенциал взаимодействия между частицами. После случайного набрасывания необходимого набора частиц в область, имитирующую макроскопический объем материала, решалась задача эволюции совокупности частиц, в результате которой достигалось состояние системы частиц, в котором они не пересекались друг с другом. Для определения наиболее плотной упаковки частиц было выполнено статистическое моделирование, позволившее определить ее параметры (рис. 1). Эти данные были использованы для подготовки шликерной массы.

Другой нетривиальной задачей является удаление парафиновой связки из заготовки после ее отливки. Даже небольшой остаток парафина негативно влияет на последующие операции и качество конечного продукта. Полное термическое удаление связки, осуществленное в защитной атмосфере, приводит к интенсивному осыпанию порошка с поверхности заготовки. Более того, основные дефекты изделия в виде вздутий и трещин возникают именно на этой стадии [9].

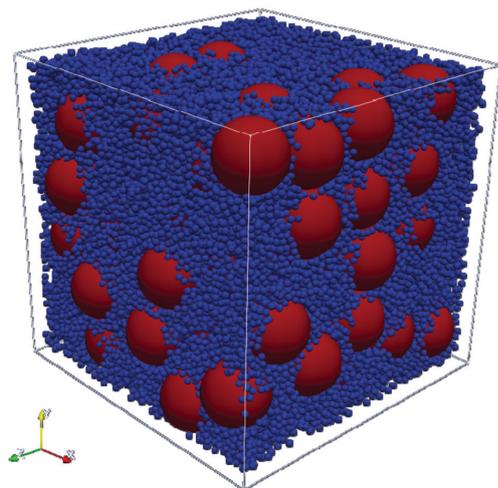


Рис. 1. Пример смоделированной плотной упаковки бинарной смеси монодисперсных микропорошков, состоящих из сферических частиц. Размеры области: $50 \times 50 \times 50$ (относительных единиц). Общее количество частиц 49321. Общая степень заполнения 55 об. %. Соотношение крупных и мелких частиц 1 : 10, соотношение объемных долей фракций 1 : 1,67

Fig. 1. An example of a simulated close packing of a binary mixture of monodisperse micropowders consisting of spherical particles. Dimensions of the area: $50 \times 50 \times 50$ (relative units). The total number of particles is 49321. The total degree of filling is 55 vol. %. The ratio of large and small particles is 1 : 10, the ratio of volume fractions is 1 : 1.67

Проблема была решена также благодаря проведению предварительного математического моделирования нагрева детали в засыпке из минерального мелкодисперсного порошка и определению допустимых скоростей нагрева. Для выполнения такого моделирования потребовались конкретные теплофизические свойства шликерной массы, которые были измерены экспериментально. Связность и механическая целостность детали после процесса удаления связки была достигнута благодаря нагреву детали в окислительной атмосфере. При этом была подобрана такая температура выдержки (600–700 °С), при которой уже начинался процесс поверхностного окисления частиц карбида кремния, но которой еще не было достаточно для образования оксидного слоя заметной толщины. Имеются достаточные основания полагать, что появление тонкого слоя диоксида кремния, выступающего в качестве связующего элемента, обеспечивало сохранность формы и удерживало деталь от рассыпания в конце операции.

Как уже отмечалось выше, важной характеристикой материала для оптических приложений является критерий Максудова, определяемый сочетанием свойств материала. С точки зрения данного критерия лучший для оптических приложений материал должен обладать максимальным коэффициентом теплопроводности и минимальным ТКЛР.

Для целенаправленного улучшения этих теплофизических свойств были предприняты следующие действия. Первый фактор, влияющий на указанные свойства, связан с размерами зерен. С точки зрения процессов теплопереноса наличие более крупных зерен SiC и меньшее количество межзеренных границ должны интенсифицировать процессы теплопереноса. Поэтому при получении шликера использовалась крупная фракция первичного порошка карбида кремния (средний размер 50 мкм, 60–65 мас. %) с небольшим добавлением мелкой фракции (5 мкм, 35–40 мас. %). Размер крупной фракции выбирался как базовый из указанных соображений интенсификации теплопереноса, а размер мелкой фракции и долевое соотношение фракций определялось на основе описанного выше компьютерного моделирования.

Второй фактор связан с межфазными границами. В настоящее время известно, что наличие даже небольшого количества кислорода на межфазных границах в поликристаллическом карбиде кремния приводит к резкому уменьшению макроскопического коэффициента теплопроводности [14]. Так, увеличение концентрации кислорода с 2000 до 3000 ppm в поликристаллической карбидокремниевой керамике уменьшает коэффициент теплопроводности в три раза: со средней величины 200 Вт/(м · К) до 70–80 Вт/(м · К) [15]. Этот эффект объясняется тем фактом, что кислород в поликристаллическом карбиде кремния находится в виде оксидов (прежде всего SiO₂) на границах кристаллов. Оксидные фазы, как правило, обладают низкой теплопроводностью. Поэтому наличие большего количества кислорода создает большее количество тепловых барьеров на границах зерен и, тем самым, замедляет теплоперенос. Развиваемый технологический подход для создания карбидокремниевой керамики позволил учесть и этот фактор. Заготовка в виде пористой матрицы, сформированной первичными частицами карбида кремния, до трех раз пропитывалась фенолформальдегидной смолой и затем подвергалась пиролизу и карбонизации. Пер-

вичный пиролиз проводился при температуре 700 °С в газовой защитной атмосфере (удаление основных летучих компонентов), а высокотемпературная карбонизация при температуре 1200–1800 °С в вакууме. В этих условиях образующийся в порах наноструктурированный углерод является хорошим восстановителем для оксидных структур на границах зерен, а высокая температура, продолжительность процесса (несколько часов) и количество операций обработки способствуют высокой степени восстановления оксидов.

Третий фактор, который влияет на теплопроводность рассматриваемого материала – это соотношение α - и β -фазы карбида кремния в конечном продукте. Известно, что коэффициент теплопроводности β -фазы монокристаллического карбида при комнатных температурах составляет 70–200 Вт/(м · К), в то время как для α -фазы он может достигать 490 Вт/(м · К). β -фаза растет и является более стабильной до температур порядка 2000 °С, α -фаза – при более высоких температурах. Однако четко температурная граница данного перехода между фазами не определена. Поэтому при прочих равных условиях для роста более теплопроводной фазы в материале необходимо увеличить как температуру реакционного спекания, так и длительность выдержки при этой температуре. Это способствует и росту зерен материала, и тем самым также увеличивает интенсивность теплопереноса. В наших экспериментах температура реакционного спекания варьировалась в пределах от 1500 до 1850 °С, а время выдержки при этой температуре достигало 2 ч.

На основе описанной методики были получены как образцы карбидокремниевых материалов, так и карбидокремниевые подложки для зеркал. Характеристики полученного материала приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристики полученного материала Si/SiC

T a b l e 1. Characteristics of the obtained Si/SiC material

Характеристики подложки			Композиционные характеристики			Теплофизические свойства при 20 °С			Механические свойства		
Макс. диаметр, мм	Толщина, мм	Средняя масса на единицу площади, кг/м ²	ρ , г/см ³	Содержание свободного кремния, об. %	Макс. остаточная пористость, %	λ , Вт/(м · К)	α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	C, Дж/(кг · К)	E, ГПа	Микротвердость Н, ГПа	Трещиностойкость K _{IC} , МПа·м ^{1/2}
205	7–14	16,5	3,08–3,13	15–20	2	200	2,1	743	400–440	36	2,9

Результаты рентгенофазного анализа представлены на рис. 2, а зависимость теплофизических свойств материала от температуры – на рис. 3.

Температуропроводность и теплоемкость керамики изучали методом лазерной вспышки на установке LFA-457 Micro Flash фирмы NETZSCH (Германия) в атмосфере аргона в импульсном режиме. Результаты измерений обрабатывали при помощи программного средства Netzsch Proteus LFA Analysis с применением модели Кейпа–Лемона с коррекцией. Данные для ТКЛР были получены на dilatометре DIL 402 Expedis SELECT NETZSCH (Германия) в сканирующем режиме с применением коррективки по стабилизированному кварцу. Микротвердость материала измерялась с помощью наноиндентора Hysitron TI750 Ubi с использованием пирамиды Берковича. Трещиностойкость с помощью микротвердомера ПМТ-3М (ЛОМО, Россия) с использованием наконечника Виккерса (ГОСТ 9377–81) и атомно-силового микроскопа Dimension FastScan (Bruker, США). Модуль упругости измерялся методом динамического индентирования с помощью индентора ИСУМ-1 (ИПФ НАН Беларуси). Рентгенофазный анализ выполнялся на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV (излучение Cu-K α). Плотность материала определялась методом гидростатического взвешивания.

Отметим, что отдельные работы по материалам на основе карбида кремния проводились в Республике Беларусь и ранее [16–21]. Эти работы относятся как к получению порошков карбида кремния [17], так и монокристаллических [16; 20] и пористых [18] материалов на его основе, композитов с добавлением мелкодисперсных алмазов [19]. Характерный размер образцов монокристаллических материалов, полученных в [16; 20], не превышает 15 мм. В [21] рассматривалось создание стеклокерамической подложки для зеркала, в состав которой входил карбид кремния. Авторами [21] предложено припаивать к поверхности карбидокремниевой подложки лист боросиликатного стекла Vогоfloat-33 толщиной в 2 мм для устранения проблем с пористостью поверхности карбидокремниевой

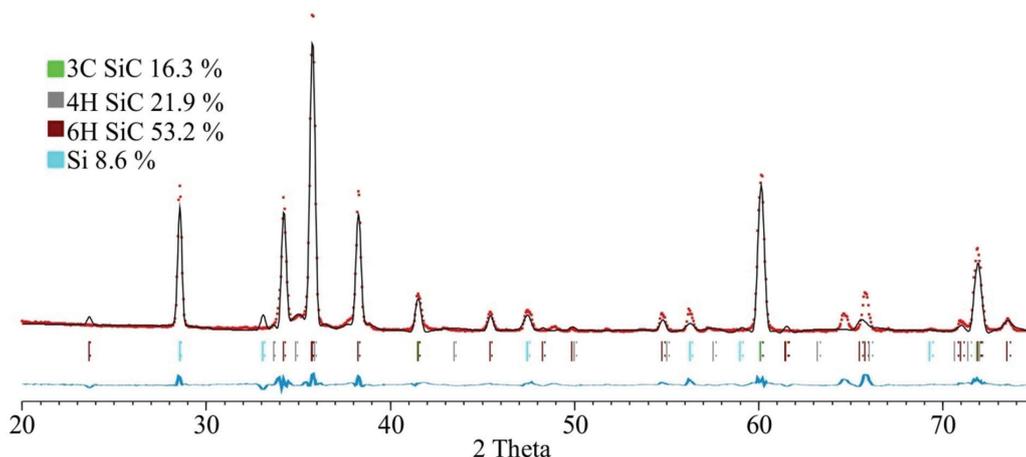


Рис. 2. Данные рентгеновской дифракции (излучение Cu-K α) полученного в работе керамического материала Si/SiC керамика (образец после трех пропиток)

Fig. 2. X-ray diffraction data (Cu-K α radiation) of ceramic material Si/SiC ceramic (sample after 3 impregnations)

подложки. По нашему мнению, в этом случае многие преимущества, которые дает карбид кремния, просто теряются. Например, при размере подложки в 200 мм, перепаде температуры в 50 °C и фактической разнице ТКЛР между стеклом и карбидом кремния $\Delta\alpha \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ относительная деформация двух слоев составит 20 мкм, или около 30 длин волн. При современных требованиях к среднеквадратическому отклонению формы поверхности зеркала, не превышающему 1/80 длины волны, данная разница (3 порядка величины) не позволит использовать такие комбинированные подложки для создания высокоточных зеркал.

Сравнение полученного авторами материала для подложек оптических зеркал с зарубежными и отечественными аналогами приведено в табл. 2. Можно видеть, что карбид кремния существенно превосходит другие оптические материалы по ряду характеристик. Прежде всего, речь идет о традиционных для телескопостроения материалах типа стеклокерамики церодур, астроситалл, Clear-Ceram, характеризующихся крайне низким температурным коэффициентом линейного расширения. Обладая сравнимой с бериллием удельной жесткостью, карбид кремния превос-

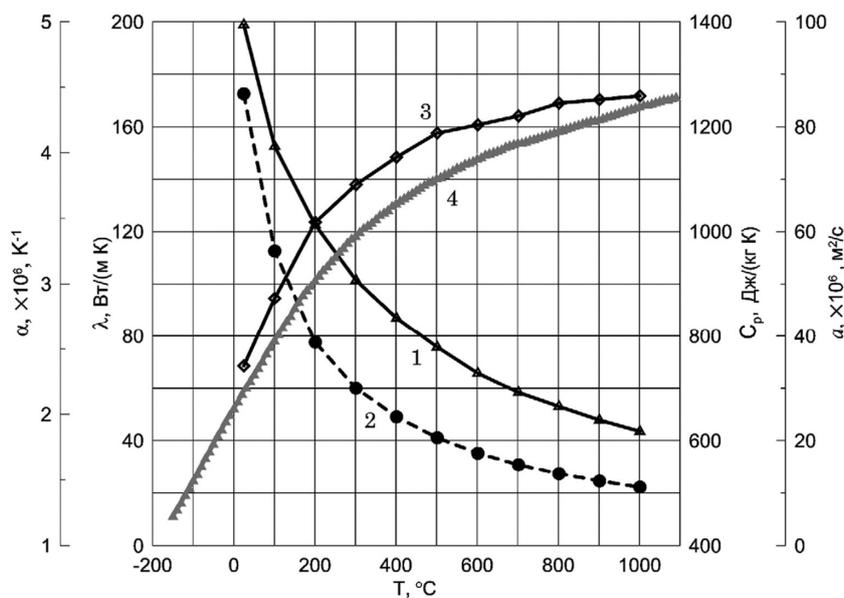


Рис. 3. Зависимость теплофизических свойств полученного материала SiC от температуры: 1 – коэффициент теплопроводности (λ , Вт/(м · К)); 2 – коэффициент температуропроводности (α , м²/с); 3 – теплоемкость (C_p , Дж/(кг · К)); 4 – ТКЛР (α , К⁻¹)

Fig. 3. Dependence of thermophysical properties of the obtained SiC material on temperature: 1 – coefficient of thermal conductivity (λ , W/(m · K)); 2 – coefficient of thermal diffusivity (α , m²/s); 3 – heat capacity (C_p , J/(kg · K)); 4 – CTE (α , K⁻¹)

ходит бериллий почти на порядок по совокупности физико-механических характеристик (критерий Максудова). Наиболее показательно, на наш взгляд, сравнение свойств полученного в данной работе карбидокремниевое материала с аналогичными материалами, получаемыми другими исследовательскими центрами и группами. Как можно видеть, наш материал по механическим характеристикам сопоставим с материалами-аналогами, а по теплофизическим характеристикам превосходит их. По критерию Максудова, который характеризует совокупность механических и теплофизических свойств, полученный материал на ~10 % превосходит материал компании Mersen Boostec (Франция), использовавшийся при создании зеркал миссии Гершель (бюджет 1,4 млрд евро) и Гея (бюджет 1,0 млрд евро), почти в два раза другие зарубежные аналоги и почти в три раза отечественный аналог.

Т а б л и ц а 2. Сравнение свойств полученного карбидокремниевое материала с другими материалами, используемыми для изготовления подложек оптических зеркал

Table 2. Comparison of the properties of the obtained silicon carbide material with other materials used for the production of optical mirror substrates

Параметр	Стеклокерамика Clear-Ceram-Z (Япония)	Бериллий (материал зеркал JWST)	Карбидокремниевая керамика					
			Данная работа, ИТМО-КАССТ SiC/Si	Франция [22]	США [5]	КНР [14]	Япония [23]	Беларусь, ИПМ [21]
ρ , г/см ³	2,55	1,85	3,08–3,13	3,15	3,2	3,09	3,02	2,99
λ (при 25 °С), Вт/(м · К)	1,5	190÷216	200	180	180	161	130	109
α (при 25 °С), $\times 10^{-6}$ К ⁻¹	~ 0,1	11,4	2,1	2,2	4,3	3,5	3,9	4,3
C_p (при 25 °С), Дж/(кг · К)	780	1925	743	700*	700*	594	680	587**
E , ГПа	91	287–303	400–440	420	493	362	400	383–409
E / ρ , $\times 10^6$, Па · м ³ /кг	35	155–164	128–143	133	154	117	132	128–137
Критерий Максудова, Ψ_3 , $\times 10^{12}$, Па · м ² · К/с	0,68	1,6	17,3	15,6	9,2	9,1	6,5	5,9

П р и м е ч а н и я: * – в работе не приведены данные для теплоемкости материала. Поэтому для оценки взято характерное значение для карбида кремния согласно справочной литературы; ** – в [21] приведено, очевидно, некорректное значение теплоемкости, соответствующее 11300 Дж/(кг · К). Оценка получена на основе приведенных в [21] данных о температуропроводности и теплопроводности.

Notes: * – the work has no data on the heat capacity of material. Therefore to estimate, the characteristic value of silicon carbide is taken according to the reference literature; ** – reference [21] contains an incorrect heat capacity value corresponding to 11300 J/(kg · K). The estimate is obtained on the basis of the data on thermal diffusivity and thermal conductivity [21].

Данная работа не была ограничена только получением материала из карбида кремния. Из этого материала были созданы полноценные подложки для зеркала диаметром 205 мм (рис. 4). Отметим, что такой же размер зеркала (208 мм) из карбида кремния использовался в камере LORRY (LONg-Range Reconnaissance Imager) миссии New Horizons, которая в 2017 г. с рекордно близкого расстояния исследовала Плутон и в настоящее время направляется к поясу Койпера. Важно, что предложенный подход позволил проводить механическую обработку полуфабриката подложки на определенных стадиях до реакционного спекания, когда материал имел достаточную механическую прочность для обработки на станке ЧПУ, и в то же время его твердость не была чрезмерной для применения алмазного инструмента. Разработанная технология позволила обрабатывать подложку таким образом, что толщина стенок для ребер структуры облегчения на тыльной части подложки составила всего 2 мм, в отдельных местах ребер структуры облегчения – 1,8 мм (рис. 4, *b*), а толщина основной рабочей поверхности зеркала 3 мм. Это соответствует параметрам обработки лучших мировых аналогов: телескоп Гершеля – толщина стенок 2,5 мм; вторичное зеркало телескопа SOFIA – 2 мм; зеркало фирмы NEC Space Technology – 3 мм [23]. Возможности разработанной технологии в части механической обработки изделий из карбида кремния достаточно наглядно продемонстрированы на рис. 4, *d*. Достигнутые авторами в данной работе точность обработки и свойства полученного материала позволили создать зеркало с удельной массой 16,5 кг/м² (рис. 4, *b*, *c*). Это в настоящее время является одним из лучших мировых показателей по удельной массе зеркал из карбида кремния и характеризует не только и не столько само зеркало, сколько разработанную технологию получения зеркал.

Представляет интерес сравнение характеристик зеркал как различных космических миссий, запущенных в космос, так и созданных в рамках наземной отработки технологии изготовления.

Результаты такого сравнения приведены на рис. 5. Данное сравнение не претендует на абсолютную полноту, но, тем не менее, охватывает большинство значимых проектов в области космического телескопостроения с использованием карбида кремния.

Знаковым и легендарным проектом для рассматриваемой предметной области является миссия телескопа Хаббл. Его главное зеркало, изготовленное еще в 1981 г. из кварцевого стекла, имело массу 828 кг при диаметре 2,4 м (184 кг/м^2). Миссия телескопа имени Уильяма Гершеля, которая стартовала почти через 30 лет, в 2009 г., имела уже телескоп с главным зеркалом из карбида кремния, которое при диаметре 3,5 м характеризовалось массой всего в 260 кг (27 кг/м^2). Использование карбида кремния позволило на порядок уменьшить удельную массу зеркала и совершить тем самым небольшую революцию в создании оптики космического базирования. Технологии создания зеркал на основе оптических стекол продолжали совершенствоваться. Несколько лет назад российской компанией Швабе были изготовлены зеркала из астроситалла метрового размера с удельной массой 50–60 кг/м^2 (рис. 5). Возможно, эти параметры уже близки к предельным характеристикам для данного класса материалов. Поскольку зеркала из астроситалла заметно дешевле сопоставимых по размерам зеркал из карбида кремния, мы полагаем, что в ближайшей перспективе практический интерес будут представлять ультраоблегченные зеркала из карбида кремния с удельной массой менее 30 кг/м^2 .

Для ряда телескопов нам не удалось найти достоверной информации о массе и характеристиках их зеркал из карбида кремния, а именно для зеркала камеры LORRY миссии New Horizons (0,208 м, судя по доступным фотографиям, это зеркало достаточно массивное), для 1,2 м зеркала и самого большого, диаметром 4,03 м, зеркала из созданных в настоящее время (производство Института оптики города Чаньчун, КНР), а также для зеркал миссии ROSETTA и ROCSAT2 (диаметр 0,6 м). Отметим, что на фотографиях самого большого монолитного зеркала как его структура облегчения, так и толщина ребер выглядят заметно массивнее соответствующих структур зеркала телескопа Гершеля.

Свой анализ мы построили на сравнении диаметров и удельных масс зеркал (рис. 5), поскольку удельная масса является интегральным показателем качества материала и уровня технологии его изготовления, и эти характеристики доступны в открытых литературных источниках для большинства созданных зеркал. Приведенные данные позволяют отследить интересную

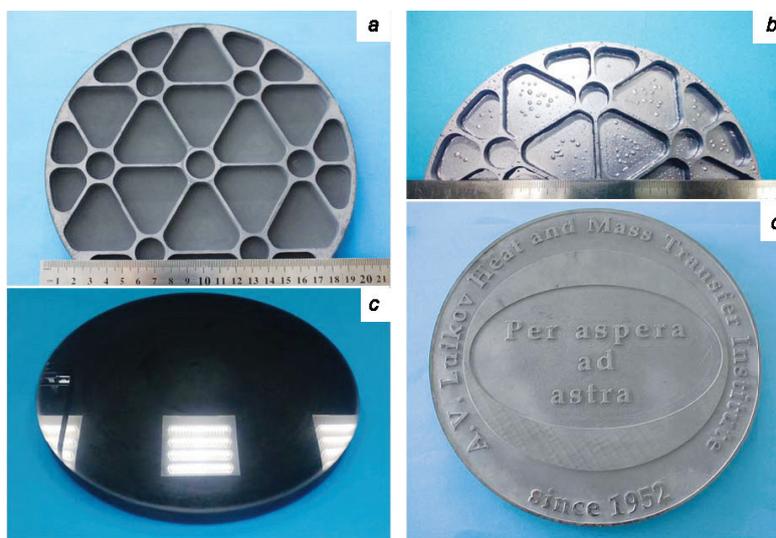


Рис. 4. Образцы полученных подложек зеркал на основе карбида кремния. Диаметр подложки зеркала 205 мм: *a* – вариант структуры облегчения зеркала (тыльная сторона подложки); *b* – структура облегчения непосредственно после реакционного спекания с толщиной ребер 2 мм; *c* – плоская поверхность подложки зеркала после предварительной полировки; *d* – демонстрация возможностей разработанной технологии в части мелкомасштабной механической обработки деталей из карбида кремния

Fig. 4. Samples of the obtained substrates of mirrors based on silicon carbide. The diameter of the mirror substrate is 205 mm: *a* – a version of the structure of the mirror relief (the back side of the substrate); *b* – the structure of relief immediately after reaction sintering with a rib thickness of 2 mm; *c* – flat surface of the mirror substrate after preliminary polishing; *d* – demonstration of the capabilities of the developed technology in terms of small-scale machining of silicon carbide parts

тенденцию. Детальный анализ позволил с определенной степенью условности выделить три группы зеркал из карбида кремния, характеризуемые разной удельной массой зеркал. В группе, обозначенной цифрой 3 на рис. 5, к которой, по нашему мнению, можно отнести зеркала ЛОМО, ALADIN, Gaia, Aperture Os, Harbin Institute of Technology, удельная масса μ (кг/м²) зеркал в зависимости от их диаметра D (мм) приблизительно аппроксимируется степенной зависимостью вида (пунктирная прямая 3)

$$\mu_3 \approx 3,2D^{0,4}.$$

Вторая группа (ALADIN, AKARI, SOFIA, NEC Space Technology) имеет несколько лучшие характеристики, которые могут быть аппроксимированы аналогичной функциональной зависимостью, но уже с другими коэффициентами:

$$\mu_2 \approx 4,6D^{0,3}.$$

Наконец первая группа (Herschel, NEC Space Technology, Changchun Institute of Optics, ECM, ИТМО-КАССТ) обладает наиболее совершенными удельными характеристиками (удельная масса ~ 20 кг/м² и менее при субметровом размере, менее 30 кг/м² при больших размерах). Для этой группы

$$\mu_1 \approx 3,9D^{0,2}.$$

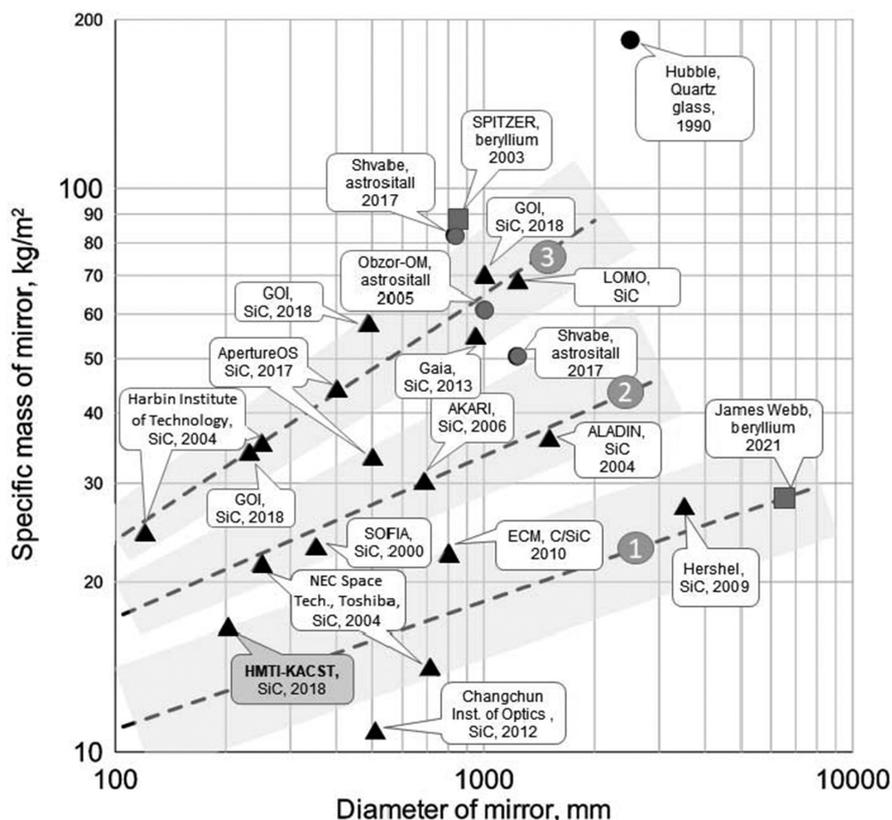


Рис. 5. Сравнение характеристик зеркал для оптики космического базирования, изготовленных в различное время различными компаниями из кварцевого стекла или астроситалла (●), карбида кремния (▲) и бериллия (■). В сравнении представлены зеркала телескопа Гершель; телескопа Хаббл; телескопа Дж. Уэбб; производства компании ECM (Германия, Япония); NEC Space Technology, Toshiba [23]; телескопов аппаратов SOFIA, AKARI (ASTRO-F), ALADIN и миссии Gaia; производства компаний Aperture OS, Швабе, ЛОМО, Государственного оптического института им. С. И. Вавилова; макета спутника Обзор-ОМ; телескопа аппарата Spitzer; производства Технологического института г. Харбин и Института оптики г. Чаньчуня [24]

Fig. 5. Comparison of the characteristics of mirrors for space-based optics, manufactured at different times by various companies of quartz glass or astrosital (●), silicon carbide (▲) and beryllium (■). In comparison, the mirrors of the Herschel telescope are presented; the Hubble telescope; the telescope of J. Webb; manufactured by ECM (Germany, Japan); NEC Space Technology, Toshiba [23]; telescopes of SOFIA, AKARI (ASTRO-F), ALADIN and Gaia missions; production companies Aperture OS, Schwabe, LOMO, State Optical Institute S. I. Vavilov; mock-up of the satellite Obzor-OM; telescope apparatus Spitzer; production of the Harbin Institute of Technology and the Chanchun Institute of Optics [24]

Указанное различие может быть обусловлено рядом факторов. Но определяющими, вполне вероятно, являются технические требования, предъявляемые к каждому конкретному зеркалу, и собственно уровень технологии изготовления. При диаметре зеркал порядка 100 мм, являющимся нижним пределом практически значимого применения, для третьей из обозначенных групп зеркал экстраполяция дает величину удельной массы порядка 23–24 кг/м², для второй – 17–18 кг/м², для первой – 11–12 кг/м². Можно предположить, что последнее значение является оценкой предельной характеристики удельной массы для зеркал из карбида кремния, обусловленной как физическими свойствами материала, так и техническими требованиями, предъявляемыми к зеркалам. Полагаем, что данные зависимости могут быть использованы для оценок при разработке новых проектов карбидокремниевых зеркал.

Таким образом, в данном сообщении изложены результаты разработки технологии создания зеркал на основе карбида кремния. Разработанная технология позволила создать один из лучших материалов для оптических приложений, характеризуемый максимальным из известных в научной и технической литературе, значением критерия Максудова, а также создать подложку для карбидокремниевоего зеркала с одним из лучших показателей по удельной массе, что критически важно для космических приложений.

Благодарности. Авторы выражают благодарность канд. техн. наук С. М. Даниловой-Третьяк за помощь в определении теплофизических свойств материалов, канд. техн. наук Т. А. Кузнецовой за помощь в измерениях микротвердости и коэффициента трещиностойкости материала, а также д-ру техн. наук А. П. Креню и научному сотруднику Т. А. Протасене (ИПФ НАН Беларуси) за помощь в определении модуля упругости материалов и д-ру физ.-мат. наук В. В. Углову (БГУ) за помощь в выполнении рентгенофазного анализа. Работа выполнена при поддержке Научно-технологического центра имени короля Абдул-Азиза (Саудовская Аравия).

Acknowledgements. The authors are grateful to Ph. D. (Engineering) S. M. Danilova-Tretiyak for assistance in determining the thermophysical properties of materials and Ph. D. (Engineering) T. A. Kuznetsova for assistance in measuring microhardness and the coefficient of fracture strength of materials as well as to D. Sc. (Engineering) A. P. Kren and Researcher T. A. Protaseny (Institute of Applied Physics of NAS of Belarus) for assistance in determining the elasticity modulus and D. Sc. (Physics and Mathematics) V. V. Uglov (Belarusian State University) for assistance in making the X-ray phase analysis. The work was supported by the King Abdul-Aziz Scientific and Technological Center (Saudi Arabia).

Список использованных источников

1. Fang, T. Missing matter found in the cosmic web / T. Fang // *Nature*. – 2018. – Vol. 558, N 7710. – P. 375–376. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05432-2>
2. Савицкий, А. М. Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов / А. М. Савицкий, И. М. Соколов // *Оптический журн.* – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 94–98.
3. Теребиж, В. Ю. Современные оптические телескопы / В. Ю. Теребиж. – М., 2005. – 80 с.
4. Bely, P. The design and construction of large optical telescopes / P. Bely. – Springer Science & Business Media, 2006.
5. Choyke, W. J. SiC, a new material for mirrors. 1: High power lasers; 2: VUV applications / W. J. Choyke, R. F. Farich, R. A. Hoffman // *Applied Optics*. – 1976. – Vol. 15, N 9. – P. 2006–2007. <https://doi.org/10.1364/ao.15.002006>
6. Максудов, Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики / Д. Д. Максудов – 2-е изд. – М., 1984. – 272 с.
7. Получение плотной реакционно-связанной керамики на основе карбида кремния / П. С. Гринчук [и др.] // *Тепло- и массоперенос-2017*. – Минск, 2018. – С. 56–68.
8. Effect of technological parameters on densification of reaction bonded Si/SiC ceramics / P. S. Grinchuk [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2018. – Vol. 38, N 15. – P. 4815–4823. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.014>
9. Growth of Silicon Carbide Nanolayers on Contact of Porous Carbon with Molten Silicon / P. S. Grinchuk [et al.] // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2017. – Vol. 90, N 5. – P. 1102–1106. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1663-1>
10. Multistage Technology for Production of Reaction-Sintered Dense Silicon Carbide (Invited Lecture) / P. S. Grinchuk [et al.] // *International Symposium on Innovation in Materials Processing. ISIMP 2017*. – Phoenix Jeju, 2017. – P. 11–12.
11. Synthesis of reaction-sintered silicon carbide ceramics by a two-stage siliconizing method / H. M. Abuhimd [et al.] // *15th Conference & Exhibition of the European Ceramic Society ECerS 2017, July 9–13, 2017*. – Budapest, 2017. – P. 125.
12. Pyrolysis of various carbon precursors inside of porous silicon carbide matrix for reaction-sintered SiC substrates / H. M. Abuhimd [et al.] // *European Advanced Materials Congress EAMC-2017*. – Stockholm; Helsinki, 2017.
13. Formation of the Silicon Carbide Nanographite Ceramic Matrix Composite / P. S. Grinchuk, [et al.] // *The 15th International Symposium on Novel and Nano Materials. ISNNM-2018*. – Lisbon, 2018. – P. 252.
14. Fabrication and test of reaction bond silicon carbide for optical applications / Wang Yao [et al.] // *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. – 2006. – Vol. 16, N 2. – P. 409–413. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(06\)60070-8](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(06)60070-8)
15. Cho, T. Y. Effect of grain growth on the thermal conductivity of liquid-phase sintered silicon carbide ceramics / T. Y. Cho, Y. W. Kim // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2017. – Vol. 37, N 11. – P. 3475–3481. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.050>

16. Monolithic nanocrystalline SiC ceramics / B. Matovic [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2016. – Vol. 36, N 12. – P. 3005–3010. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.10.031>
17. Синтез карбида кремния в электротермическом реакторе с кипящим слоем углеродных частиц / В. А. Боро- дуля [и др.] // *Горение и плазмохимия*. – 2015. – Т. 13, № 2. – С. 92–102.
18. Evaluation of SiC-porcelain ceramics as the material for monolithic catalyst supports / O. Smorygo [et al.] // *Journal of Advanced Ceramics*. – 2014. – Vol. 3, N 3. – P. 230–239. <https://doi.org/10.1007/s40145-014-0114-0>
19. Ковалевский, В. Н. Структурообразование карбидокремниевой матрицы при создании композиции алмаз- карбид кремния / В. Н. Ковалевский // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2005. – № 5. – С. 8–14.
20. Влияние режимов получения реакционно-спеченной керамики на ее структуру и свойства / А. Ф. Ильющенко [и др.] // *Докл. НАН Беларуси*. – 2017. – Т. 61, № 3. – С. 108–115.
21. Оптические зеркала из композиционных материалов керамика-стекло. Физико-механические и функцио- нальные свойства / А. Ф. Ильющенко [и др.] // *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композици- онные материалы, защитные покрытия, сварка. Материалы 13-й междунар. науч.-техн. конф.* – Минск, 2018. – С. 38–41.
22. Bougoin, M. From Herschel to Gaia: 3-meter class SiC space optics / M. Bougoin, J. Lavenac // *Optical Manufacturing and Testing IX: International Society for Optics and Photonics*. – 2011. – Vol. 8126. – P. 81260V.
23. Tsuno, K. Reaction-sintered silicon carbide: newly developed material for lightweight mirrors / K. Tsuno // *5th International Conference on Space Optics: Proc. of SPIE*. – Toulouse, 2004. – Vol. 10568. – P. F-2–F-6.
24. Design and finite element analysis of $\Phi 510$ mm SiC ultra-lightweight mirror / Y. Y. Zhang [et al.] // *Optics and Pre- cision Engineering*. – 2012. – Vol. 20, N 8. – P. 1718–1724. <https://doi.org/10.3788/ope.20122008.1718>

References

1. Fang T. Missing matter found in the cosmic web. *Nature*, 2018, vol. 558, no. 7710, pp. 375–376. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05432-2>
2. Savitskiĭ A. M., Sokolov I. M. Questions of constructing lightened primary mirrors of space telescopes. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 10, pp. 666–669. <https://doi.org/10.1364/jot.76.000666>
3. Terebizh V. Yu. *Modern optical telescopes*. Moscow, 2005. 80 p. (in Russian).
4. Bely P. *The design and construction of large optical telescopes*. Springer Science & Business Media, 2006.
5. Choyke W. J., Farich R. F., Hoffman R. A. SiC, a new material for mirrors. 1: High power lasers; 2: VUV applications. *Applied Optics*, 1976, vol. 15, no. 9, pp. 2006–2007. <https://doi.org/10.1364/ao.15.002006>
6. Maksutov D. D. *Manufacturing and study of astronomical optics*. 2d ed. Moscow, 1984. 272 p. (in Russian).
7. Grinchuk P. S., Kiyashko M. V., Stepkin M. O., Toropov V. V., Akulich A. V., Solovei D. V., Khort A. A., Shashkov M. D., Lyakh M. Yu., Abuhim H. M., Alshahrani M. S. Preparation of dense reaction-bonded ceramics based on silicon carbide. *Teplota i massoperenos–2017 = Heat and Mass Transfer–2017*. Minsk, 2018, pp. 56–68 (in Russian).
8. Grinchuk P. S., Kiyashko M. V., Abuhim H. M., Alshahrani M. S., Stepkin M. O., Toropov V. V., Khort A. A., Solovei D. V., Akulich A. V., Shashkov M. D., Liakh M. Yu. Effect of technological parameters on densification of reaction bonded Si/SiC ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, no. 15, pp. 4815–4823. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.014>
9. Grinchuk P. S., Abuhim H. M., Fisenko S. P., Khodyko Yu. A. Growth of Silicon Carbide Nanolayers on Contact of Porous Carbon with Molten Silicon. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 5, pp. 1102–1106. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1663-1>
10. Grinchuk, P. S., Abuhim H. M., Alshahrani M. S., Kiyashko M. V., Solovei D. V., Akulich A. V., Stepkin M. O., Khort A. A. Multistage Technology for Production of Reaction-Sintered Dense Silicon Carbide (Invited Lecture). *International Symposium on Innovation in Materials Processing. ISIMP 2017*. Phoenix Jeju, 2017, pp. 11–12.
11. Abuhim H. M., Alshahrani M. S., Grinchuk P. S., Solovei D. V., Stepkin M. O., Akulich A. V., Khort A. A. Synthesis of reaction-sintered silicon carbide ceramics by a two-stage siliconizing method. *15th Conference & Exhibition of the European Ceramic Society*. Budapest, 2017, pp. 125.
12. Abuhim H. M., Alshahrani M. S., Grinchuk P. S., Solovei D. V., Kiyashko M. V., Toropov V. V., Stepkin M. O., Khort A. A. Pyrolysis of various carbon precursors inside of porous silicon carbide matrix for reaction-sintered SiC substrates. *European Advanced Materials Congress*. Stockholm; Helsinki, 2017.
13. Grinchuk P. S., Solovei D. V., Kiyashko M. V., Stepkin M. O., Akulich A. V., Abuhim H. M., Alshahrani M. S. For- mation of the Silicon Carbide Nanographite Ceramic Matrix Composite. *The 15th International Symposium on Novel and Nano Materials*. Lisbon, 2018, pp. 252.
14. Wang Yao, Yu-min Zhang, Jie-cai Han, Hong-bo Zuo. Fabrication and test of reaction bond silicon carbide for optical applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, vol. 16, no. 2, pp. 409–413. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(06\)60070-8](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(06)60070-8)
15. Cho T. Y., Kim Y. W. Effect of grain growth on the thermal conductivity of liquid-phase sintered silicon carbide cera- mics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, vol. 37, no. 11, pp. 3475–3481. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.050>
16. Matović B., Bučevac D., Urbanović V., Stanković N., Daneu N., Volkov-Husović T., Babić B. Monolithic nanocrys- talline SiC ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, vol. 36, no. 12, pp. 3005–3010. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.10.031>
17. Borodulya V. A., Vinogradov L. M., Grebenkov A. Zh., Mikhailov A. A. Synthesis of silicon carbide in electrothermal reactor with fluidized bed of carbon particles. *Gorennye i plazmokhimiya [Combustion and Plasma Chemistry]*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 92–102 (in Russian).

18. Smorygo O., Marukovich A., Mikutski V., Sadykov V. Evaluation of SiC-porcelain ceramics as the material for monolithic catalyst supports. *Journal of Advanced Ceramics*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 230–239. <https://doi.org/10.1007/s40145-014-0114-0>
19. Kovalevskiy V. N. Structural formation of a carbide-silicon matrix in the creation of a diamond-carbide silicon composition. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika = Refractories and technical ceramics*, 2005, no. 5, pp. 8–14 (in Russian).
20. Ilyushchenko A. Ph., Zvonarev E. V., Vitko Zh. A., Osipov V. A., Babura D. V. Influence of the modes production of reactive-sintered carbide ceramics on the structure and properties. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 3, pp. 108–115 (in Russian).
21. Il'yushchenko A. F., Osipov V. A., Zvonarev E. V., Babura D. V. Optical mirrors made of ceramic-glass composites. Physico-mechanical and functional properties. *Novyye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnyye materialy, zashchitnyye pokrytiya, svarka. Materialy 13-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding. Materials of the 13th International Scientific and Technical Conference]*. Minsk, 2018, pp. 38–41 (in Russian).
22. Bougoin M., Lavenac J. From Herschel to Gaia: 3-meter class SiC space optics. *Optical Manufacturing and Testing IX. International Society for Optics and Photonics*, 2011, vol. 8126, p. 81260V.
23. Tsuno K. Reaction-sintered silicon carbide: newly developed material for lightweight mirrors. *5th International Conference on Space Optics*. Toulouse, 2004, vol. 10568, pp. F-2–F-6.
24. Zhang Y. Y., Jing W., Cheng Y., Hu G., Fang J.-Z. Design and finite element analysis of $\Phi 510$ mm SiC ultra-light-weight mirror. *Optics and Precision Engineering*, 2012, vol. 20, no. 8, pp. 1718–1724. <https://doi.org/10.3788/ope.20122008.1718>

Информация об авторах

Гринчук Павел Семенович – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, заведующий отделением. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gps@hmti.ac.by.

Абухимд Хатем – канд. хим. наук, заведующий лабораторией. Национальный нанотехнологический исследовательский центр (Эр-Рияд, 11442, аб. ящик 6086, Саудовская Аравия). E-mail: habuhimd@kacst.edu.sa.

Акулич Андрей Владимирович – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: akulich.av@mail.ru.

Кияшко Михаил Викторович – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: manilmsteen@tut.by.

Соловей Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: solovei@hmti.ac.by.

Стёпкин Михаил Олегович – инженер-технолог. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: serpent_83@tut.by.

Торопов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Шашков Михаил Дмитриевич – инженер-технолог. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Хорт Александр Александрович – канд. техн. наук, науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: khort.alexander@gmail.com.

Лях Мария Юрьевна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: liakhmaria@gmail.com.

Information about the authors

Grinchuk Pavel Semenovich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gps@hmti.ac.by.

Abuhimd Hatem – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. National Nanotechnology Research Center King Abdulaziz City for Science and Technology (Riyadh, 11442, P.O. Box 6086, Saudi Arabia). E-mail: habuhimd@kacst.edu.sa.

Akulich Andrei Vladimirovich – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: akulich.av@mail.ru.

Kiyashko Mikhail Viktorovich – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: manilmsteen@tut.by.

Solovei Dmitry Vladimirovich – Ph. D. (Engineering), Senior researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: solovei@hmti.ac.by.

Stepkin Mikhail Olegovich – Processing engineer. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: serpent_83@tut.by.

Toropov Victor Vladimirovich – Ph. D. (Engineering), Leading researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Shashkov Mikhail Dmitrievich – Processing engineer. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Khort Aleksandr Aleksandrovich – Ph. D. (Engineering), Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: khort.alexander@gmail.com.

Liakh Maria Yurievna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: liakhmaria@gmail.com.