

Фронт ударной волны в материалах на основе диоксида кремния

В. П. Ефремов¹ и А. В. Уткин^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Институт проблем химической физики РАН, Проспект Академика Семенова, 1, Черноголовка 142432, Россия

E-mail: V.P.Efremov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 11 октября 2023 г.

Аннотация. Проведены эксперименты с диоксидом кремния во взрывной камере. Нагружение экспериментальных образцов создавали плоские шлифованные алюминиевые ударники, разогнанные взрывом. Измерения массовой скорости проводились в одномерной постановке, что позволило использовать лазерный дифференциальный интерферометр с одной отражающей фольгой. Впервые экспериментально получены уникальные данные в области аномальной сжимаемости диоксида кремния, применимые для конденсированных и полых оптических волокон. Измерена скорость звука в ударно-сжатых образцах диоксида кремния. <https://doi.org/10.33849/2023106>

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические волокна на основе кварцевого стекла, передающие модулированное (содержащее информацию) лазерное излучение, в последние годы широко используются в технике и промышленности. Одной из побудительных причин быстрого развития оптоволокон было их использование в космических спутниках [1, 2]. С учетом значительного совершенствования космической техники и защиты от электромагнитных помех оптические волокна вытеснили другие средства связи с датчиками космических спутников. Для каждой системы, которую мы исследовали, были обнаружены присущие ей критические плотности лазерной энергии. Выше этих значений нарушается работоспособность передающей системы в целом. Скорости распространения результатов воздействия критической плотности энергии лазера на световод определяются параметрами лазера и параметрами световода. Получены экспериментальные данные для обычных и полых оптических волокон [3–9]. Локальное нарушение светопроводности световода приводит к изохорному тепловыделению и к генерации тепловых и ударных волн.

Новым методом создания экстремальных состояний стало использование появившихся полых светлых волокон на основе кварца [8]. Микрофотография повреждения полого волокна RF-2 показана на рисунке 1. Наружный диаметр несущей трубки RF2 составляет 100 мкм, внутренний диаметр несущей трубки — 64 мкм. На микрофотографии показан сохранившийся образец после действия одиночного лазерного импульса длительностью 100 пс на полувысоте. Импульсы излучаются лазером Nd:YAG, объединенная последовательность нескольких коротких импульсов имеет период 13 нс.

На рисунке 1 видно, что поглощение света вызывает наиболее распространенное повреждение волокнистых материалов (SiO_2) тепловыми волнами и ударными волнами. Повреждение несущей трубки и отражающих капилляров может быть использовано для выявления процессов в кварце [1, 2]. Как видно из результатов, опубликованных в [8] и показанных на рисунке 1 в данной работе, толстая несущая трубка и небольшое отверстие для света могут полностью локализовать разрушающий эффект выделения лазерной энергии внутри несущей трубки.

Описанные выше результаты демонстрируют возможные физические источники генерации ударной волны в материалах твердотельных и полых оптических волокон при интенсивном лазерном облучении. Обнаружено разрушение в полых перспективных оптических волокнах под воздействием интенсивного импульса излучения.

Зона поглощения может быть связана с расщеплением молекулы SiO_2 при нагревании [10]. Зона энерговыделения может сопровождать фронт волны аномальной сжимаемости, как в [11]. Химически и физически индуцированное повреждение в прозрачных диэлектриках представляет собой довольно сложное физическое явление. Эти явления определяются множеством параметров (интенсивностью лазера, длительностью импульса, энергией фотона и шириной запрещенной зоны). Ход повреждения лазерным излучением от инициации (потери прозрачности) до разрушения материала определяется динамикой поглощения энергии и свойствами материала. Заметную роль среди прозрачных диэлектриков играет диоксид кремния. В частности, диоксид кремния является одной из рабочих сред для мощных волоконно-оптических лазеров. Однако свойства диоксида кремния трудны для описания. Например, высокая температура плавления силикатов является серьезной проблемой для получения расплавов при повышенном давлении. Имеющиеся в литературе данные были получены либо для стекол при высоком давлении, либо для жидкостей при низком давлении. Кроме того, довольно сложны свойства диоксида кремния при средних давлениях и температурах, где диоксид кремния является нелинейно упругим материалом и термически активируемое уплотнение приводит к необратимой трансформации структуры стекла.

Ранее в работе [3] была изучена динамика лазерного разрушения оптических волокон. Были обнаружены два волновых профиля ударной волны. Эти исследования проводились с использованием скоростной камеры. По завершении процесса лазерного разрушения изучался характер разрушения сохранившихся фрагментов с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Для прогнозирования характера распространения ударных волн и вызванного ими разрушения волокон необходимы экспериментальные данные об ударно-волновых свойствах материала. С этой целью в данной

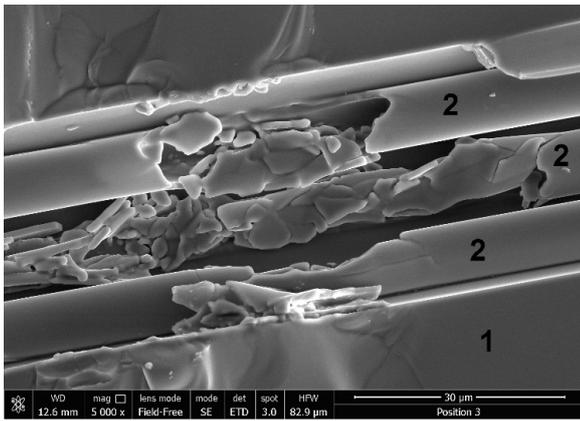


Рисунок 1. Микрофотография повреждений в полом волокне RF-2; 1 — несущая трубка, 2 — повреждение отражающих капилляров.

работе исследуется ударная сжимаемость кварцевого стекла, используемого в оптических волокнах.

Ударно-волновые свойства сплошных световых волокон были исследованы в Институте проблем химической физики РАН, внутреннее повреждение в полых и конденсированных световых волокнах были изучены в Объединенном институте высоких температур РАН. Тестируемые мишени были изготовлены в Научном Центре волоконной оптики им. Е.М. Дианова Российской академии наук (ИЦВО РАН).

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нижеследующее описание относится только к твердотельным оптическим волокнам. Из-за трудностей наблюдения за динамикой процессов в промышленных волокнах диаметром около 100 мкм, ударно-волновые свойства исследовались на образцах диаметром 14 мм, который были вырезаны из стеклянной цилиндрической заготовки, используемой для вытяжки оптических волокон (рисунок 2(б)).

Оптические волокна, использованные в экспериментах, имели нижеследующий химический состав. В оптическое волокно 741 входят: опорная трубка из чистого кварцевого стекла F300 производства концерна Heraeus; сердцевина оптического волокна, представляющая собой чистый SiO₂, легированный GeO₂ в количестве около 4 мольных % GeO₂. Кроме того, сердцевина была дополнительно легирована фтором с целью уменьшения разницы между показателями преломления сердцевины и оболочки в количестве 0.5 массового % или атомарного % (они примерно равны). В результате разницы показателей преломления (n) в световоде Δ_n должна была быть около 0.006, но из-за добавления фтора она стала 0.002.

Схема экспериментов по исследованию ударно-волновых свойств образцов приведена на рисунке 2(а). Ударные волны создавались при соударении алюминиевой пластины (ударника), разогнанной продуктами взрыва флегматизированного гексогена до скорости W , равной 1.13 км/с. Амплитуда волн, входящих в образец, варьировалась изменением материала экрана. Скорость поверхности раздела кварц–вода определялась при по-

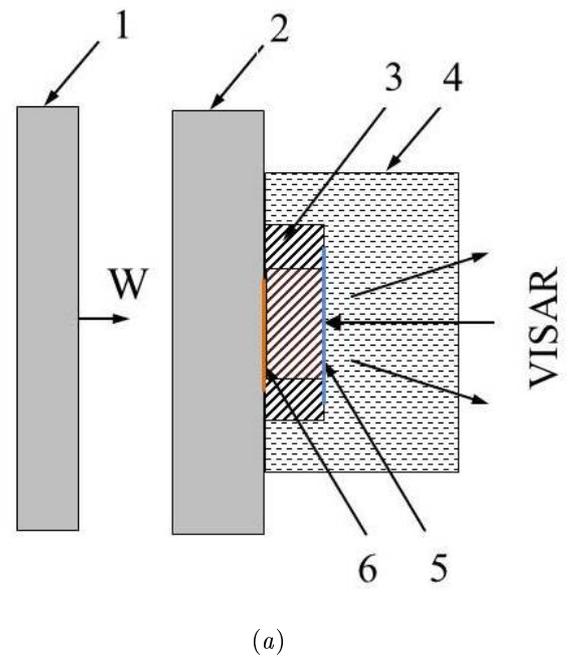


Рисунок 2. (а) Схема эксперимента (слева), алюминиевая пластина-ударник (1), плоский экран (2), образец (3), вода (4), алюминиевая фольга (5), поляризационный датчик (6). (б) — фото образца с диаметром наружной кварцевой несущей трубки 12 мм, внутреннего сердечника — 4 мм.

мощи многоканального интерферометра VISAR. Также были проведены эксперименты, в которых разгрузка образца происходила в воздух.

На рисунке 3 в координатах давление P — массовая скорость u показана диаграмма состояний, реализующихся при ударно-волновом воздействии. При построении ударных адиабат использовалась линейная зависимость скорости ударной волны D от массовой скорости u : $D = A + Bu$, где A и B — коэффициенты ударной адиабаты [12]. Давление на адиабате Гюгонио ударника рассчитывалась по формуле:

$$P = \rho_0[A + B(W - u)] \cdot (W - u),$$

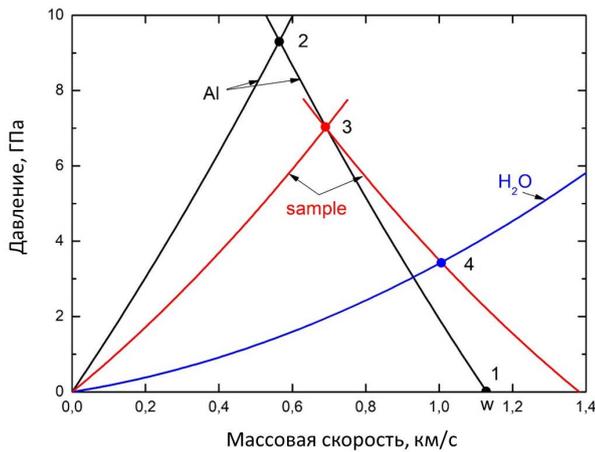


Рисунок 3. $P - u$ диаграмма. Алюминиевый ударник, алюминиевый экран, образец (плотность 2.2 г/см^3). 0-2 — адиабата Гюгоньо Al, 1-2 — адиабата Гюгоньо Al, 2-3 — снижение давления в алюминиевом экране, 0-3 — адиабата Гюгоньо кварца, 0-4 — адиабата Гюгоньо воды, 3-4 — снижение давления в кварце.

где W — скорость ударника. Уравнение Гюгоньо для экрана рассчитывалось по формуле:

$$P = \rho_0 u (A + B \cdot u),$$

Точка 1 соответствует скорости алюминиевого ударника ($W = 1.13 \text{ км/с}$). При соударении ударника с экраном (Al) реализуется состояние, соответствующее точке 2 ($u = 0.57 \text{ км/с}$, $P = 9.3 \text{ ГПа}$). После того, как ударная волна в экране достигает границы с образцом, в экран отражается волна разрежения, а в кварце формируется ударная волна (точка 3, $u = 0.68 \text{ км/с}$, $P = 7.3 \text{ ГПа}$). Предполагается, что разгрузка алюминиевого экрана происходит по кривой 2-3, совпадающей с зеркальным отражением адиабаты Гюгоньо относительно точки 2. После прохождения образца ударная волна выходит на границу раздела образец-вода. В результате распада разрыва реализуется состояние, соответствующее точке 4 ($u = 1.00 \text{ км/с}$, $P = 3.5 \text{ ГПа}$) на рисунке 3. При этом, в образец отражается волна разрежения (линия 3-4), а в воде формируется ударная волна (линия 0-4).

3. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ЗВУКА И ДАВЛЕНИЯ ОТ МАССОВОЙ СКОРОСТИ В ОБЛАСТИ АНОМАЛЬНОЙ СЖИМАЕМОСТИ КВАРЦА

В исследуемой области давления деформация кварца является упругой, поскольку его динамический предел текучести равен 9.8 ГПа . Необходимо, однако, учитывать, что ниже 4 ГПа в кварце наблюдается аномальная сжимаемость, в результате чего волны сжатия являются изоэнтропическими, а волны разрежения ударными. Это может внести определенные поправки в расчете величин давления и массовой скорости по схеме, представленной на рисунке 3. Кроме того, аномальная сжимаемость при низких давлениях приводит к формированию двухволновой структуры импульса сжатия.

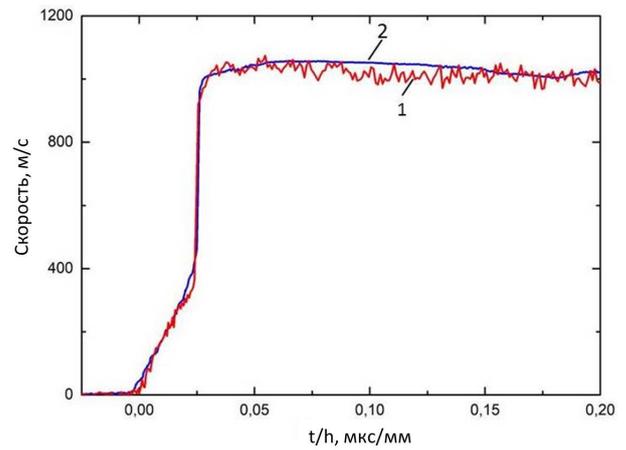


Рисунок 4. Скорость на границе плавный кварц-вода. Алюминиевый ударник $h = 7 \text{ мм}$, $W = 1.13 \text{ км/с}$; алюминиевый экран $h = 4 \text{ мм}$; образец 2 мм (1 — красная линия) и 4 мм (2 — синяя линия).

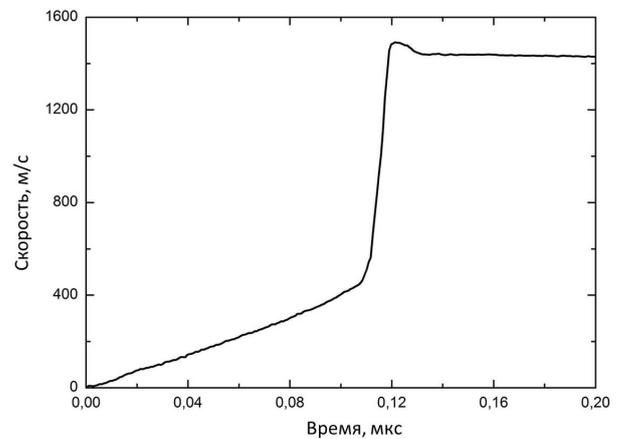


Рисунок 5. Профиль скорости свободной поверхности. Условия эксперимента совпадают с приведенными на рисунке 3: толщина ударника $h = 7 \text{ мм}$, $W = 1.13 \text{ км/с}$, толщина экрана $h = 4 \text{ мм}$, толщина образца 4 мм .

Для определения влияния аномальной сжимаемости кварца на расчет давления при импульсном воздействии необходимо предварительно найти зависимость скорости звука от массовой скорости u . Наиболее легко это сделать в простой волне сжатия. Именно такая ситуация была реализована в проведенных экспериментах, что доказывают опыты с двумя различными толщинами образца, 2 и 4 мм при одинаковых условиях нагружения. Полученные профили скорости на границе с водой приведены на рисунке 4 в координатах $W - t/h$, где h — толщина образца. Хорошее совпадение зависимостей $W(t/h)$ является следствием того факта, что течение реализуется в области автомодельного течения в простой волне сжатия.

На рисунке 4 отчетливо видно формирование двухволновой конфигурации. Вторая волна является ударной с резким скачком скорости во фронте. Тогда как первая, соответствующая области аномальной сжимаемости, является изоэнтропической. Поэтому вместо ударного скачка наблюдается плавный рост массовой скорости, что обусловлено уменьшением скорости звука

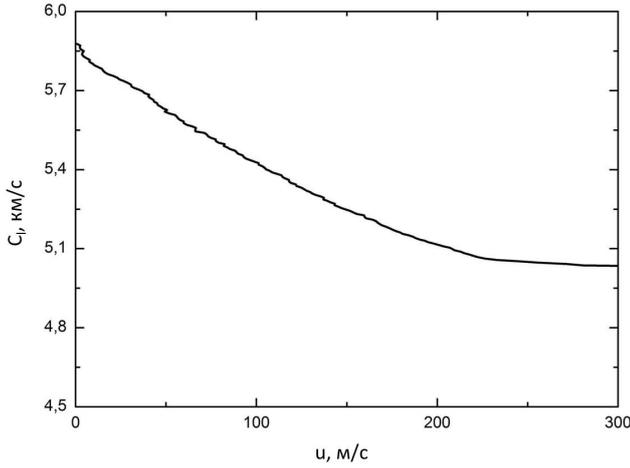


Рисунок 6. Зависимость скорости звука от массовой скорости в области аномальной сжимаемости.

с ростом давления. Условие, что течение в волне сжатия автомодельно, позволяет найти характер этой зависимости. С этой целью были проведены эксперименты по регистрации скорости свободной поверхности, результаты которых представлены на рисунке 5. Лагранжева скорость звука c_l определяется непосредственно по профилю зависимости скорости свободной поверхности W от времени по формуле: $c_l = h/(t_0 + t)$, где t_0 — время движения головы волны сжатия по образцу, t — временной интервал, отсчитываемый от момента выхода первой волны на свободную поверхность образца. $c_l = h/t_0$ — скорость звука при нулевом давлении, которая была измерена в эксперименте с помощью поляризационного датчика, регистрирующего момент входа ударной волны в образец.

При анализе профиля скорости свободной поверхности $W(t)$ используется эмпирический закон удвоения скорости: $W(t) = 2u(t)$, где u — массовая скорость. При наличии водяного окна, установить столь простую связь между зарегистрированным профилем скорости W (рисунок 4) и массовой скоростью невозможно. По этой причине и был проведен опыт со свободной поверхностью. Рассчитанная таким образом скорость звука от u показана на рисунке 6.

В простой волне сжатия соотношение между массовой скоростью и давлением имеет вид:

$$dP = \rho_0 c_l(u) du. \quad (1)$$

Поскольку зависимость $c_l(u)$ определена (рисунок 6), интегрирование соотношения (1) дает возможность найти изэнтропу сжатия в области аномальной сжимаемости. Результаты расчета представлены на рисунке 7 сплошной линией. Полученные параметры ударного сжатия (точка 3') заметно, примерно на 0.3 ГПа, превышают расчеты без учета аномальной сжимаемости (точка 3).

Пунктирная линия на рисунке 7 показывает аналогичную зависимость, предложенную авторами [13] и аппроксимированную полиномом четвертой степени:

$$P = 13.17u - 7.361u^2 + 9.947u^3 - 4.163u^4, \quad (2)$$

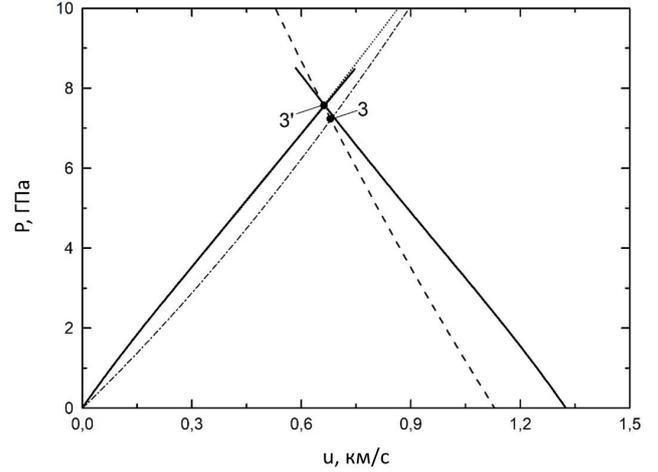


Рисунок 7. $P - u$ диаграмма с учетом аномальной сжимаемости кварца. Сплошная линия — расчет с учетом аномальной сжимаемости; пунктирная линия — [13]; штриховая линия — ударная адиабата A1; штрихпунктирная линия — [12]; 3 — расчет без учета аномальной сжимаемости; 3' — учет аномальной сжимаемости.

где размерностями P и u являются ГПа и км/с соответственно. Полученные зависимости совпадают в пределах экспериментальной ошибки. Аномальная сжимаемость плавленого кварца наблюдается при давлении ниже 4 ГПа. При увеличении давления вплоть до динамического предела текучести (9.8 ГПа) будут реализованы состояния, лежащие на упругой ветви адиабаты Южно кварца, и соответствующие нормальной сжимаемости. Эти состояния достаточно хорошо описываются как проведенным расчетом, так и соотношением (2). Штрихпунктирной линией на рисунке 7 показана также ударная адиабата, предложенная в [12] для аппроксимации экспериментальных данных в области пластической деформации кварца, которая использована для определения давления ударного сжатия в кварце на рисунке 3.

Отметим, что в течение всего времени регистрации волновых процессов течение в образце было одномерным. Действительно, изученные образцы плавленого кварца имели радиус 6 мм и толщину 2–4 мм. Соответственно, время прихода боковой волны разрежения в центральную область ≈ 1 мкс, что ограничивает время, в течение которого наблюдаемое течение является одномерным.

Как уже отмечалось, на рисунках 4, 5 показаны профили скорости в центральной части стекловолокна, полученные в ударно-волновых экспериментах. Интересно сравнить эти результаты с аналогичными данными для плоских образцов плавленого кварца. На рисунке 8 зависимость 1 соответствует скорости свободной поверхности в центральной части стекловолокна, график 2 получен в экспериментах с пластинкой чистого плавленого кварца. Видно, что имеется хорошее совпадение полученных зависимостей скорости от времени. Расхождение фронтов ударной волны за областью аномальной сжимаемости обусловлено различной толщиной образцов.

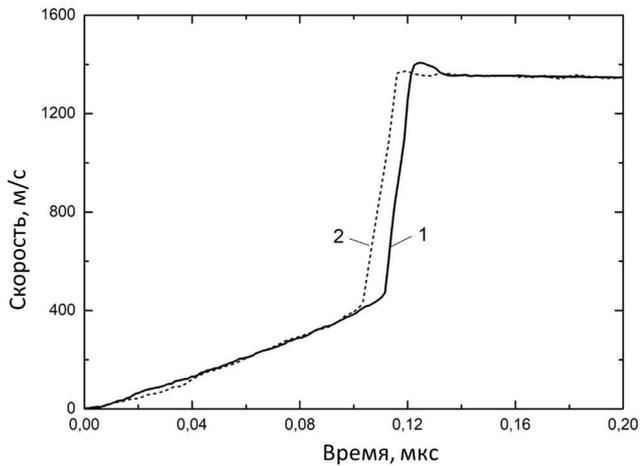


Рисунок 8. Профиль скорости свободной поверхности. Условия эксперимента совпадают с показанными на рисунке 3: алюминиевый ударник $h = 7$ мм, $W = 1.13$ км/с, алюминиевый экран $h = 4$ мм, толщина образца 4 мм. 1 — сердцевина стеклопластикового волокна, толщина образца 4,05 мм; 2 — кварцевая пластинка, толщина образца 3,85 мм.

4. ВЫВОДЫ

Впервые было проведено экспериментальное исследование распространения фронта ударной волны в материалах сердцевины оптических волокон во взрывных экспериментах. Была подтверждена двухволновая структура импульса сжатия. В материалах оптических волокон за фронтом ударной волны была обнаружена аномальная сжимаемость. В этой области снижение скорости звука составило около одного км/с.

Уникальность исследования заключается в экспериментальном обнаружении уменьшения скорости звука с 5,8 до 4,5 км/с в ударно-сжатой среде по мере увеличения массовой скорости до 300 км/с.

Научная новизна работы заключается в интерпретации всего процесса в единых $P - u$ диаграммах, с учетом аномальной сжимаемости кварца, что приводит к увеличению давления примерно на 0,3 ГПа (рисунок 7).

Понимание свойств предлагаемых инновационных материалов открывает возможности для совершенство-

вания всех космических разработок и уменьшения массы спутников.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа велась на протяжении ряда лет. Авторы особенно признательны Буфетову И.А. за его ранние работы и за интересные и плодотворные дискуссии. Авторы благодарны Семенову С.Л. за поддержку этих исследований. А также хотим поблагодарить за общую помощь Вальяно Г.Е., Фролова А.А., Обручкову Л.Р., сотрудников Объединенного института высоких температур РАН. Кроме того, хотим поблагодарить Колядина А.Н., сотрудника ИЦВО РАН, за подготовку образцов диоксида кремния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shimodaira K, Matsuoka T, Miyaji Y, Murata K, Koyama Y and Shimizu M 1983 *Acta Astronaut.* **10**(5-6) 429–436
2. Girard S *et al* 2018 *J. Optic.* **20**(9) 093001
3. Dianov E, Fortov V, Bufetov I, Efremov V, Frolov A, Schelev M and Lozovoi V 2006 *J. Exp. Theo. Phys. Lett.* **83**(2) 75–78
4. Efremov V, Frolov A, Dianov E, Bufetov I and Fortov V 2014 *Archives of Metallurgy and Materials* **59**(4) 1599–1603
5. Efremov V, Fortov V and Frolov A 2015 Damage of silica-based optical fibers in laser-supported detonation *Journal of Physics: XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter* vol 653 ed Fortov V E *et al* (Moscow: JIHT RAS) p 012013
6. Efremov V and Utkin A 2018 *Advanced Materials and Technologies* **3** 17–21
7. Efremov V and Kiverin A 2020 *Acta Astronaut.* **176** 662–665
8. Bufetov I, Kolyadin A, Kosolapov A, Efremov V and Fortov V 2019 *Optics Express* **27**(13) 18296–18310
9. Efremov V and Kiverin A 2021 *Acta Astronaut.* **181** 655–659
10. Kazenas E and Tsvetkov J 1997 *The evaporation of oxides* (Moscow: Nauka)
11. Kanel G, Razorenov S, Utkin A and Fortov V 1996 *Shock-Wave Phenomena in Condensed Media* (Moscow: Yanus-K)
12. Marsh S (ed) 1980 *LASL Shock Hugoniot Data* (Berkeley: Univ. of California Press)
13. Barker L and Hollenbach R 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 4208