

УДК 536.49 + 519.673

## Динамика превращения частицы углерода на кварцевой подложке в лазерном поле

© 2019 г. **Ю. А. Адаменков; С. А. Буйко, канд. физ.-мат. наук; Е. А. Кудряшов; В. А. Мазанов, канд. физ.-мат. наук; Е. Н. Макейкин; С. В. Маркин; А. С. Мелехин; В. Г. Рогачев, доктор физ.-мат. наук; А. В. Сиренко, канд. физ.-мат. наук; Д. С. Тимаев**

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров Нижегородской обл.

E-mail: oefimova@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 06.08.2018

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-03-22-31

Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований лазерного нагрева частиц углерода (графита) размером порядка 500 мкм, расположенных на кварцевой подложке в инертных средах азота и аргона в диапазоне интенсивностей лазерного излучения от 0,35 до 3,5 кВт/см<sup>2</sup>. Экспериментально измерена температура частиц в поле воздействия лазерного излучения. Показано, что нагрев частиц углерода приводит к повреждению поверхности кварцевой подложки практически по всей зоне лазерного пятна с образованием кратера, центр которого совпадает с центром частицы. С использованием разработанного в РФЯЦ — ВНИИЭФ программного комплекса «ЛОГОС» проведено численное моделирование процесса взаимодействия лазерного излучения с частицей углерода (графита), находящейся на подложке из кварца. Полученные результаты указывают на наличие химической реакции между углеродом и кварцем с возможным образованием слоя карбида кремния на поверхности подложки.

**Ключевые слова:** лазерное излучение, поглощение излучения, нагрев, частица углерода, повреждение поверхности подложки.

**Коды OCIS:** 140.6810, 140.3450, 160.4670

### ВВЕДЕНИЕ

Поведение частиц пыли в поле мощного лазерного излучения представляет большой научный и практический интерес, так как при нагреве частиц до высокой температуры в сотни и тысячи градусов появляется возможность интенсивного протекания различных физико-химических процессов.

Динамика превращения свободно взвешенных аэрозольных частиц в поле мощного лазерного излучения сопровождается рядом эффектов, один из которых — горение в воздухе частиц углерода, подробно изучен в ряде работ [1–5].

В работах [6–7] исследовался лазерный нагрев частиц различной химической природы, в том числе углеродных, нанесенных на зеркальную подложку из слоев оксидов кремния и оксидов металлов, находящихся в воздушной среде. В этих работах описаны физические процессы, протека-

ющие при взаимодействии непрерывного лазерного излучения с частицами, абсорбированными на малопоглощающей оптической поверхности. В частности показано, что при лазерном облучении ансамбля углеродных частиц возникала вспышка, образовывались газообразные продукты, а общая масса частиц на поверхности подложки радикально уменьшалась. Однако авторы практически не рассматривали химические процессы, хотя, как это видно из анализа представленных в этих работах данных, они играют важную роль.

В настоящей работе проведено исследование динамики превращения одиночных частиц графита субмиллиметрового размера, предварительно нанесенных на прозрачную кварцевую подложку, в поле непрерывного лазерного излучения. Исследования проводились в бескислородной среде азота или аргона, когда отсутствовало горение углерода в кислороде воздуха. Такой экспериментальный подход

показал, что в этих условиях высокотемпературный нагрев частицы углерода, находящейся в контакте с поверхностью кварца, возможно приводит к образованию пленки полупроводникового карбида кремния (SiC) и сопровождается резким изменением оптических свойств поверхности кварцевой подложки. При этом поверхность подложки повреждается практически по всей зоне лазерного пятна с образованием глубокого кратера, центр которого совпадает с центром частицы.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

### 1.1. Схема проведения опытов и методики измерения

Исследование нагрева частицы углерода, находящейся на прозрачной кварцевой подложке в инертной газовой среде, проводилось по схеме, представленной на рис. 1. Лазерное излучение (ЛИ) направлялось на кварцевую подложку диаметром 2,5 и высотой 1,0 см, в центре которой размещалась исследуемая частица субмиллиметрового размера.

Непрерывное излучение длиной волны 1,07 мкм генерировалось промышленным волоконным лазером. Выходной пучок ЛИ, имеющий гауссово распределение интенсивности, проходил через телескопическую систему линз, расширялся до необходимых размеров, отражался от зеркала и падал на образец с частицей. Эффективный радиус лазерного пятна на образце по уровню 0,86 в экспериментах составлял  $r_{\text{eff}} = 5$  и 6 мм. Максимальная плотность мощности ЛИ в центре пятна менялась от 0,35 до 3,5 кВт/см<sup>2</sup>. Время воздействия ЛИ на образец  $t_{\text{le}}$  составляло 30 или 120 с в зависимости от постановки эксперимента.

Пространственное распределение интенсивности в пятне ЛИ измерялось при видеосъемке пятна

воздействия на рассеивающем экране. Погрешность измерения распределения интенсивности ЛИ составляла  $\pm 13\%$ .

Исследуемые частицы углерода по форме, близкой к сферической, выбирались из измельченного порошка графита с характерным размером порядка 500 мкм. С каждой кварцевой подложкой проводилось по 5–7 экспериментов, помещая каждую последующую частицу на свободное от лазерного воздействия место. Перед установкой частицы поверхность кварцевой подложки очищалась мыльным раствором и этиловым спиртом.

Для проведения экспериментов в инертной газовой среде исследуемый образец помещался на дно полузамкнутого объема, который создавался кварцевой трубой диаметром 75 и высотой 120 мм. При проведении опыта осуществлялась постоянная продувка этого объема азотом или аргоном с контролем отсутствия в объеме кислорода воздуха.

Перед экспериментами для определения фактического размера частицы поверхность образца с частицей фотографировалась при использовании микроскопа. После лазерного разрушения частицы таким же способом фотографировалась зона повреждений на кварцевой подложке.

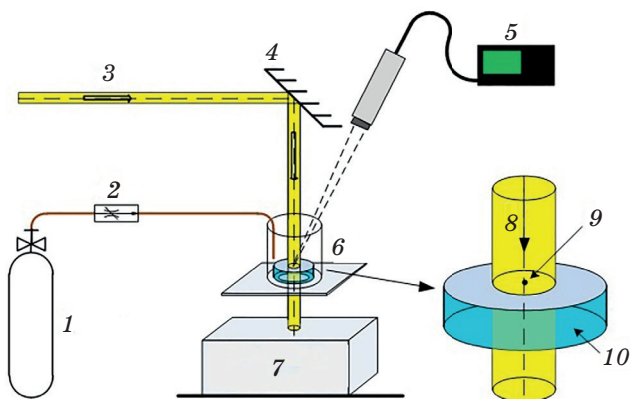
Яркостная температура частицы на подложке определялась с помощью пирометра на рабочей длине волны 0,67 мкм. Диаметр фокусировки измерительного пятна равнялся 1 мм. Спектроскопическая температура частицы определялась с помощью матричного спектрометра в диапазоне длин волн от 0,2 до 1,1 мкм. Особенности применяемых пирометрической и спектрометрической методик измерения температуры твердых тел изложены в работах [8, 9]. Погрешность измерения температуры составляла  $\pm 5\%$ .

Так как в расчетах и при сопоставлении с результатами экспериментов использовалась термодинамическая (реальная) температура, то определение реальной температуры по экспериментальной яркостной температуре осуществлялось с использованием уравнения яркостной пирометрии [10, 11]

$$\frac{1}{T_b} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon(\lambda, T). \quad (1)$$

Здесь  $T_b$  — яркостная температура реального тела, К,  $T$  — термодинамическая (реальная) температура, К,  $\varepsilon(\lambda, T)$  — спектральная степень черноты,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $C_2 = hc/k$ , где  $c$  — скорость света в вакууме, м/с,  $h$  — постоянная Планка, Дж с,  $k$  — константа Больцмана, Дж/К.

Согласование сильно зависело от степени черноты объекта, температура которого определялась пирометрическим способом: чем меньше степень черноты, тем сильнее истинная температура отличалась от яркостной. Если степень черноты



**Рис. 1.** Схема исследования нагрева углеродных частиц на кварцевой подложке в поле лазерного излучения. 1 — баллон, 2 — натекающий газ, 3, 8 — лазерное излучение, 4 — зеркало, 5 — пирометр, 6 — образец, 7 — ловушка ЛИ, 9 — углеродная частица, 10 — кварцевая подложка.

графита не сильно отличалась от 1 и слабо менялась с ростом температуры, то степень черноты полупроводника SiC, который образовывался при лазерном нагреве частицы углерода, находящейся на кварцевой подложке, заметно меньше 1 и она сильно зависела от температуры. Поэтому в разделе 1 сравниваются между собой экспериментально полученные яркостные температуры, а в разделе 2 расчетные температуры сравниваются с экспериментальными реальными температурами, полученными по формуле (1) с учетом экспериментально определенной степени черноты по спектроскопическим измерениям.

Идентификация продукта синтеза лазерного нагрева частиц графита на кварцевой подложке проводилась с использованием фотолюминесцентной спектроскопии. Для этого исследуемый образец облучался ЛИ длиной волны 325 нм от непрерывного гелий-кадмиевого лазера с одновременной регистрацией спектров фотолюминесценции с помощью матричного спектрометра в диапазоне длин волн от 350 до 650 нм.

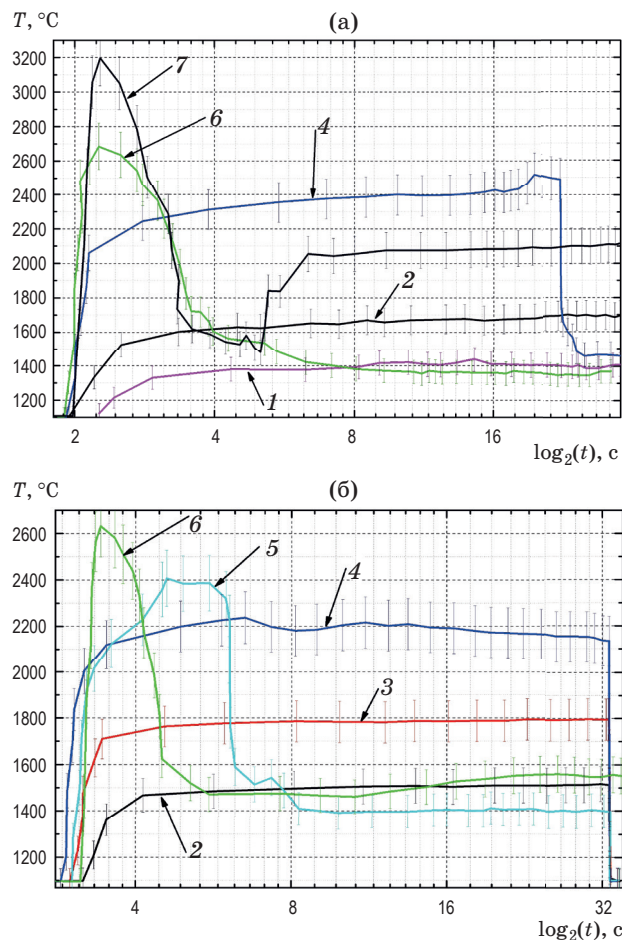
## 1.2. Экспериментальные результаты

Эксперименты по исследованию лазерного нагрева и динамики превращения частиц углерода (графита), находящихся на прозрачной кварцевой подложке, под действием непрерывного лазерного излучения проводились в бескислородной газовой среде азота или аргона при атмосферном давлении.

### 1.2.1. Лазерный нагрев частиц графита в среде азота или аргона

Зависимости яркостной температуры от времени воздействия ЛИ на частицы графита на кварцевой подложке в среде азота и аргона приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что при интенсивностях ЛИ, воздействующего на частицу графита, менее 1,5 кВт/см<sup>2</sup> как в азоте, так и в аргоне температура частицы монотонно увеличивалась до стационарной, значение которой пропорционально интенсивности ЛИ. Такой ход температуры характерен при лазерном нагреве химически инертных частиц, когда частица и подложка не претерпевают никаких фазовых изменений.

При увеличении интенсивности воздействующего ЛИ свыше 1,5 кВт/см<sup>2</sup> как в азоте, так и в аргоне ход временных зависимостей яркостной температуры частицы изменялся. Сначала температура за 1–2 с резко повышалась до максимальной, а затем быстро уменьшалась в 2–2,5 раза до стационарной. Визуальные наблюдения после опыта показывали, что частица исчезала, а на кварцевой подложке по всему сечению лазерного пучка возникала зона заметных повреждений в виде кратера и оплавления поверхности, как это видно из рис. 3, 4. При повторном воздействии ЛИ такой же



**Рис. 2.** Экспериментальные зависимости яркостной температуры частиц графита на кварцевой подложке от времени воздействия ЛИ (плотностью мощности 0,35 (1), 0,5 (2), 0,75 (3), 1,5 (4), 1,75 (5), 2,5 (6), 3,4 (7) кВт/см<sup>2</sup>) в среде азота (а) и аргона (б).

интенсивности температура этой зоны монотонно возрастала до стационарной и не менялась в течение всего времени воздействия.

Отметим результаты опыта с частицей графита в азоте при облучении ЛИ плотностью мощности 1,5 кВт/см<sup>2</sup>, когда температура частицы, достигнув 2400 °С, только через 20 с после начала воздействия уменьшилась до своего стационарного значения 1450 °С. Очевидно, это вызвано резким изменением оптических и других свойств материала в зоне воздействия вследствие химической реакции между углеродом и кварцем.

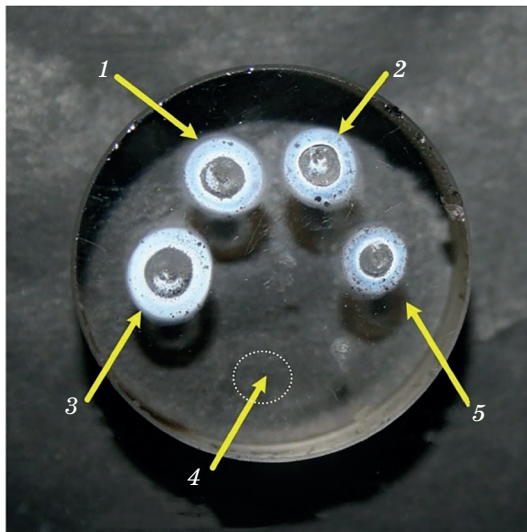
На рис. 3 и 4 представлены фотографии одной из кварцевых подложек после серии опытов и схема зоны воздействия ЛИ на частицу углерода, расположенную на кварцевой подложке, в увеличенном масштабе. Из рис. 3 видно, что при интенсивности ЛИ порядка 0,5 кВт/см<sup>2</sup> заметные повреждения поверхности кварцевого элемента отсутствуют. При дальнейшем увеличении интенсивности ЛИ



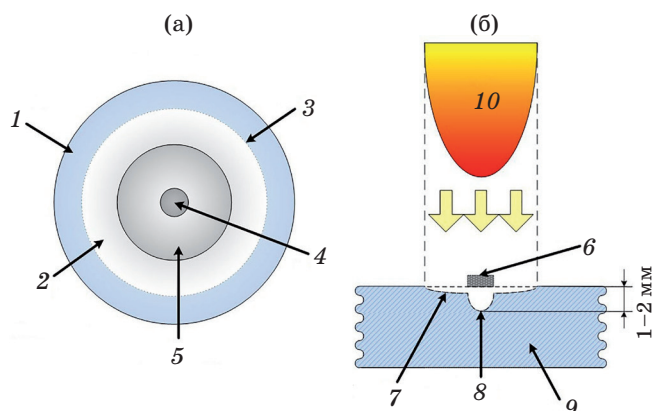
до  $1,75 \text{ кВт/см}^2$  и выше эти повреждения принимают характерный вид с концентрическими зонами повреждений.

Из рис. 3 и 4 видно, что при нагревании частицы углерода ЛИ плотностью мощности свыше  $1,75 \text{ кВт/см}^2$  на поверхности образца в области под частицей образуется кратер, размер которого соизмерим с исходными размерами частицы. Размеры зоны химического травления и оплавления кварца вокруг частицы практически на порядок больше и близки к диаметру воздействующего лазерного пучка.

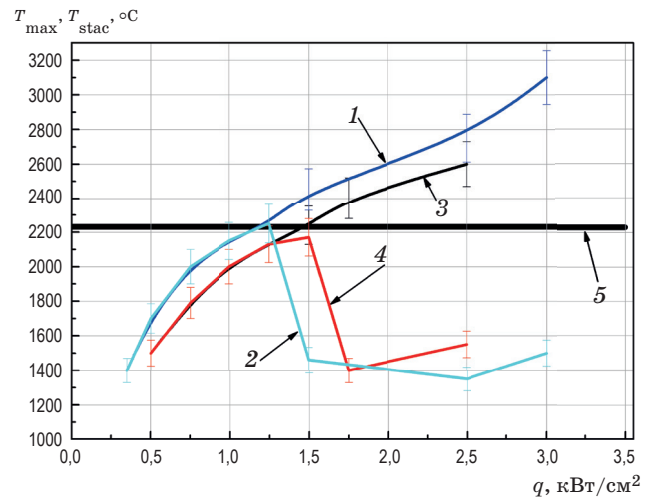
На рис. 5 сопоставляются максимальные  $T_{\max}$  и стационарные  $T_{\text{stac}}$  яркостные температуры при



**Рис. 3.** Кварцевая подложка после серии опытов с частицами графита (максимальная плотность мощности ЛИ  $2,5$  (1),  $2$  (2),  $2,5$  (3),  $0,5$  (4) — без видимых повреждений,  $1,75$  (5)  $\text{кВт/см}^2$ ).



**Рис. 4.** Схема зоны воздействия ЛИ на частицу углерода, расположенную на кварцевой подложке; вид сверху (а) и вид сбоку в разрезе (увеличено) (б). 1, 9 — кварц, 2 — зона образования белого налета, 3 — граница повреждения, 4, 8 — кратер, 5, 7 — зона оплава кварца, 6 — частица, 10 — ЛИ.



**Рис. 5.** Зависимости от интенсивности ЛИ максимальной  $T_{\max}$  и стационарной  $T_{\text{stac}}$  яркостных температур частиц графита на кварце в инертной газовой среде. 1 —  $T_{\max}$  (азот), 2 —  $T_{\text{stac}}$  (азот), 3 —  $T_{\max}$  (аргон), 4 —  $T_{\text{stac}}$  (аргон), 5 —  $T_{\text{cr}}$  (температура химической реакции).

лазерном нагреве частиц графита на кварцевой подложке, помещенных в азот и аргон. При обработке результатов опытов в азоте с плотностью мощности ЛИ менее  $1,5 \text{ кВт/см}^2$  и в аргоне — менее  $1,75 \text{ кВт/см}^2$  принималось, что  $T_{\max}$  и  $T_{\text{stac}}$  равны, так как при таких параметрах ЛИ, как это видно из рис. 2, температура частицы нарастает монотонно без локальных экстремумов до своего стационарного значения.

Из рис. 5 видно, что в бескислородных газовых средах частицы графита на кварцевой подложке нагреваются до температуры  $2200 \pm 50 \text{ °C}$  как инертные частицы без какого-либо взаимодействия с подложкой. При нагреве частицы до  $2400 \text{ °C}$  и выше ее максимальная температура спустя 1–2 с уменьшалась в 2 с лишним раза до своего стационарного значения вследствие резкого изменения теплофизических и оптических свойств среды. Сама частица исчезала, а на подложке образовывался кратер. Это является свидетельством протекания химической реакции с образованием нового вещества. Укажем, что граничная температура ( $2400\text{--}2500 \text{ °C}$ ), при которой меняется динамика лазерного нагрева, совпадает с температурой синтеза промышленного карбида кремния (карборунда) по методу Ачесона [12].

Таким образом, из сопоставления временной зависимости температур, фактов исчезновения частицы, образования кратера и зоны повреждения, граничной температуры начала реакции и учета химического состава исходных веществ (углерод и оксид кремния) можно прийти к выводу, что при лазерном нагреве частиц углерода, находящихся на кварцевой подложке, при температуре свыше

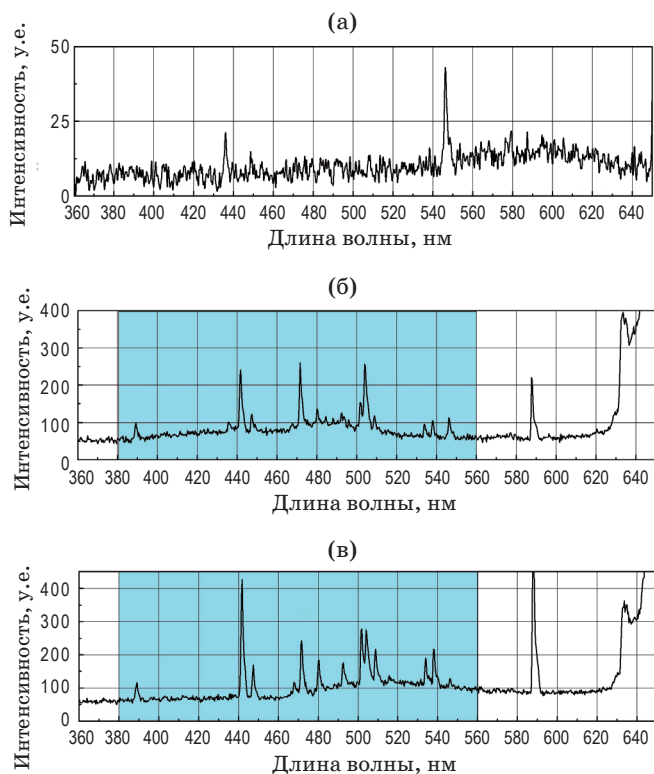
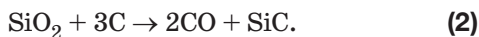


Рис. 6. Спектры фотолуминесценции кварца (а), продукта реакции графита с кварцем в центре пятна (б), белого карборунда (в).

2400–2500 °С протекает химическая реакция образования карбида кремния [13]



### 1.2.2. Спектры фотолуминесценции

Уточнение химической природы соединения, синтезированного после лазерного нагрева частицы графита на кварцевой подложке, было проведено по спектрам фотолуминесценции (ФЛ). На рис. 6 приведены спектры ФЛ в центре кратера, где первоначально находилась частица графита, самой кварцевой подложки и промышленного карборунда. Из рис. 6 видно, что в диапазоне длин волн от 385 до 550 нм, соответствующем политипам SiC [14], наблюдаются три интенсивных пика на длинах волн  $\lambda_1 = 441$  нм,  $\lambda_2 = 472$  нм и  $\lambda_3 = 504$  нм.

В целом, спектры ФЛ синтезированного продукта и промышленного карборунда, состоящего из смеси политипов SiC, практически идентичны между собой, тогда как спектры ФЛ исходных продуктов значительно отличаются.

Таким образом, проведенные измерения температуры и спектров фотолуминесценции показывают, что при лазерном нагреве частиц углерода (графита), размещенных на кварцевой подложке в инертной газовой среде, возможно образова-

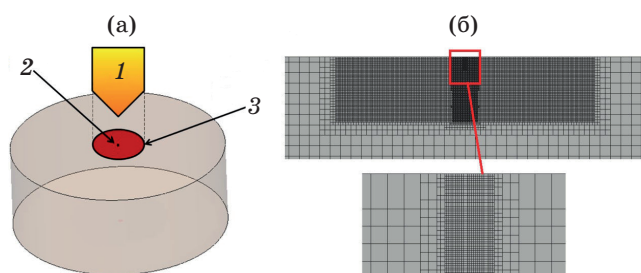


Рис. 7. Геометрическая модель исследуемого образца (а) и фрагмент расчетной сетки (б). 1 — ЛИ, 2 — частица, 3 — область падения ЛИ.

ние SiC. Его образование обусловлено реакцией нагретого до высокой температуры углерода (графита) с оксидом кремния [13].

## 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 2.1. Постановка задачи и расчетная модель

По условиям эксперимента подложка с частицей углерода, через которую проходило непрерывное ЛИ, представляла собой диск с плоскопараллельными торцами, изготовленный из кварца с малым коэффициентом поглощения. На рис. 7 представлен геометрия задачи и фрагмент расчетной сетки.

Кварцевая подложка имела радиус 1,25 см и толщину 1 см. В расчетах использовались теплофизические характеристики кварца, графита и карбида кремния, приведенные в работе [15]. Частица моделировалась диском заданного радиуса. Такая постановка была принята для упрощения построения расчетной модели и соответствующей ей сетки. Частица располагалась в центре кварцевой подложки. Расчетный радиус частицы выбирался из условия равенства площадей частицы из эксперимента и моделируемой частицы в виде круга или эллипса. Так как реальная частица моделировалась диском бесконечно малой толщины, то в расчетах учитывалось только поверхностное поглощение, тогда как в действительности присутствует объемное поглощение из-за конечной толщины реальной частицы. В силу этого приближения результаты расчетов и экспериментов могут отличаться при малых значениях плотности мощности ЛИ. При больших плотностях мощности данный факт играет меньшую роль, так как из-за высоких градиентов температура быстрее выравнивается по объему.

Плотность теплового источника объемного энерговыделения, обусловленного поглощением ЛИ в кварцевой подложке, задавалась в виде объемного источника энерговыделения  $Q$

$$Q = q\delta, \quad (3)$$

где  $\delta = 10^{-5}$  см<sup>-1</sup> — коэффициент поглощения лазерного излучения в стекле,  $q$  (Вт/см<sup>2</sup>) — плотность

## Размеры областей сетки для расчетной модели

Области сетки	Радиус, $\times 10^{-3}$ м	Высота, $\times 10^{-3}$ м	Размер ячейки, $\times 10^{-5}$ м
Цилиндрическая область	соответствует размеру частицы	1	2
Цилиндрическая область	1	1	8
Цилиндрическая область	2	3	10
Оставшаяся часть образца	—	—	80

мощности падающего потока ЛИ. Конвективный теплообмен частицы, боковой и торцевых поверхностей подложки с окружающей средой не учитывался.

Для получения температурных полей в расчетах моделировались различные варианты расчетных схем, выбранных с учетом особенностей проводимых экспериментов. В силу существенного различия размеров кварцевой подложки и моделируемых частиц выбиралась соответствующая расчетная сетка. В области частицы она была более подробной для повышения точности расчета.

При верификации расчетной модели лазерного нагрева частицы на прозрачной подложке была выбрана сетка, состоящая из 4 областей, размеры которых приведены в таблице.

## 2.2. Расчет лазерного нагрева частицы на прозрачной подложке без учета фазового перехода

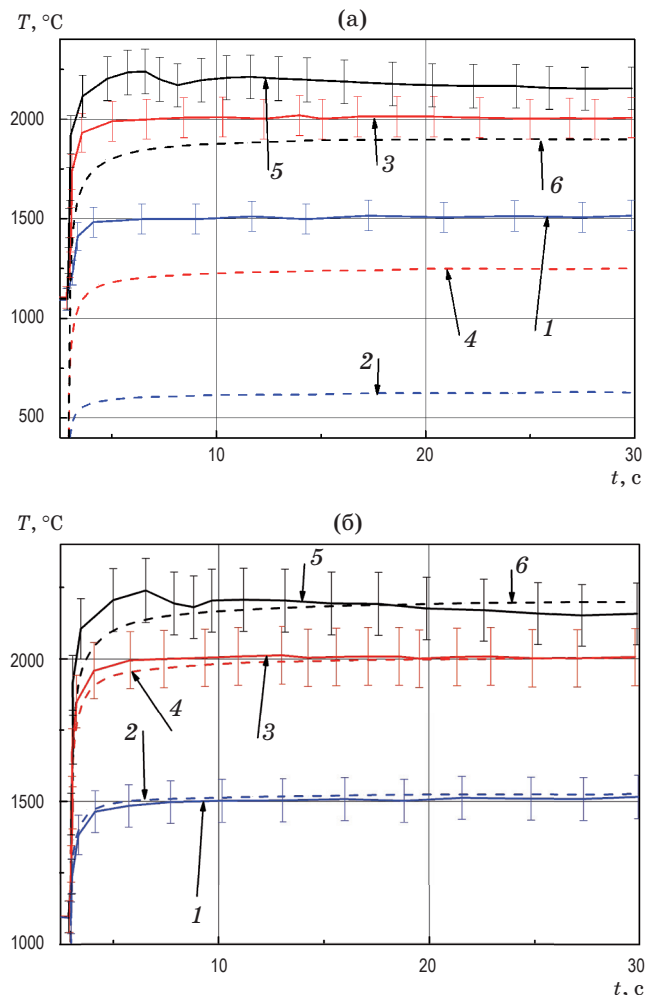
С помощью пакета программ «ЛОГОС» [16] были рассчитаны два варианта лазерного нагрева одиночной инертной частицы, находящейся на прозрачной подложке, без учета фазовых переходов и протекания химической реакции между частицей и подложкой.

Для моделирования выбраны опыты с графитовой частицей, находящейся в аргоне при плотностях мощности ЛИ  $q = 500, 1000$  и  $1500$  Вт/см<sup>2</sup>. Во всех расчетах коэффициент поверхностного поглощения принимался постоянным и равным  $\xi_f = 0,9$ . Эквивалентный радиус частицы равнялся  $r_{\text{ekv}} = 240$  мкм. В первом варианте расчетов принимался идеальный тепловой контакт между частицей и кварцевой подложкой с коэффициентом термического сопротивления, равным нулю. В соответствии с работой [17] под коэффициентом термического сопротивления понимается величина, обратная коэффициенту теплоотдачи газового зазора между частицей и кварцевой подложкой, т.е.

$$\alpha = \frac{\lambda}{h}, R = \frac{1}{\alpha}, \quad (4)$$

где  $h$  — усредненная толщина зазора между частицей и кварцевой подложкой, м,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности среды в зазоре, Вт/(м К),  $R$  — коэффициент термического сопротивления, К м<sup>2</sup>/Вт.

В пакете программ «ЛОГОС» термическое сопротивление учитывается скачком температур между контактирующими средами, а зазор в явном виде не моделируется. Данный феноменологический подход позволяет получить хорошее согласие расчета с экспериментом.



**Рис. 8.** Экспериментальные и расчетные зависимости температуры частицы от времени идеального теплового контакта частицы с подложкой (а) и с учетом термического сопротивления (б). 1 —  $q = 0,5$  кВт/см<sup>2</sup> (эксперимент), 2 —  $q = 0,5$  кВт/см<sup>2</sup> (расчет), 3 —  $q = 1$  кВт/см<sup>2</sup> (эксперимент), 4 —  $q = 1$  кВт/см<sup>2</sup> (расчет), 5 —  $q = 1,5$  кВт/см<sup>2</sup> (эксперимент), 6 —  $q = 1,5$  кВт/см<sup>2</sup> (расчет).

Результаты проведенных расчетов и их сравнение с экспериментами для условий без учета протекания химической реакции образования SiC, приведены на рис. 8.

Из рис. 8а видно, что экспериментальные и расчетные зависимости температуры от времени имеют общий характер и согласуются между собой: температура быстро выходит на стационарный уровень, когда приход лазерной энергии в частицу компенсируется кондуктивным, конвективным и лучистым отводом тепла. Однако значения стационарных экспериментальных и расчетных температур при большом времени лазерного облучения различались в 2 с лишним раза при одной и той же интенсивности ЛИ. Это различие было максимальным при малых интенсивностях ЛИ. Такая разница связана с неидеальностью теплового контакта между частицей и подложкой в выбранной нами расчетной модели. В реальных условиях эксперимента, когда частица графита с произвольной шероховатостью поверхности находилась на поверхности кварцевой подложки, идеальный тепловой контакт между ними конечно же отсутствовал. Из рис. 8б видно, что учет термического сопротивления между областями расчетной сетки, моделирующей частицу и подложку, позволил согласовать результаты расчетов и экспериментов по значениям температур в центре частицы. Отметим, что в этом варианте тепловые потоки на границе между частицей и кварцем различались примерно на 10%.

Таким образом, проведенные с помощью пакета программ «ЛЮГОС» численные расчеты лазерного нагрева одиночной инертной частицы на кварцевой подложке с учетом неидеальности теплового контакта между ними и отсутствия фазовых переходов и химических реакций показали неплохое согласие с результатами экспериментов в диапазоне исследованных интенсивностей ЛИ до  $1,5 \text{ кВт/см}^2$ .

### 2.3. Расчет лазерного нагрева углеродной частицы на кварцевой подложке с учетом химической реакции

Для расчетного описания результатов экспериментов по лазерному нагреву частицы углерода на кварцевой подложке при плотностях мощности ЛИ выше  $1,5 \text{ кВт/см}^2$ , представленных в разделе 1, было принято, что при  $T \approx 2300\text{--}2500^\circ\text{C}$  между углеродом и кварцем происходит реакция образования SiC по реакции (2). В ее результате на поверхности кварцевой подложки возможно образуется слой SiC, который, будучи полупроводником с шириной запрещенной зоны в диапазоне от 2,2 до 3,3 эВ [18, 19], имеет коэффициент поглощения, сильно отличающийся от коэффициента поглощения исходной частицы гра-

фита. Толщина этого слоя в условиях проводимых экспериментов может достигать нескольких микронметров.

При моделировании принималось, что на первой стадии поглощение ЛИ в области частицы графита происходит с коэффициентом поглощения  $\xi_f = 0,9$ . При нагреве частицы до температуры  $2300\text{--}2500^\circ\text{C}$  протекает химическая реакция образования SiC и коэффициент поглощения в области частицы значительно уменьшается. Кроме того, экспериментальные исследования показали, что во всем сечении лазерного пучка, проходящего через кварцевую подложку, возникает область с коэффициентом поглощения, отличным от поглощения кварцевой подложки. Поэтому при численном моделировании лазерного нагрева графитовой частицы в инертной газовой среде варьировались размеры областей поглощения и коэффициенты поверхностного поглощения. Эквивалентный радиус частицы принимался равным  $r_{\text{ekv}} = 259 \text{ мкм}$ . Коэффициент поверхностного поглощения исходной частицы графита составлял так же, как и ранее  $\xi_f = 0,9$ . В данном варианте модели термическое сопротивление не учитывалось, так как предполагалось, что SiC с подложкой имел идеальный тепловой контакт.

В расчетах было рассмотрено 2 варианта размеров областей поглощения ЛИ, образующихся в ходе реакции: область поглощения SiC, соответствующая размерам частицы  $r = r_{\text{ekv}}$ , с дополнительной областью радиусом 1 мм (вариант 1) или область поглощения SiC радиусом 500 мкм с дополнительной областью поглощения радиусом 3 мм (вариант 2).

При моделировании второй стадии лазерного нагрева осуществлялась расчетная подгонка коэффициента поглощения SiC, так как он не был известен. Коэффициент поглощения варьировался в диапазоне от 0,1 до 0,45. В результате наилучшее согласие было получено при следующих параметрах:

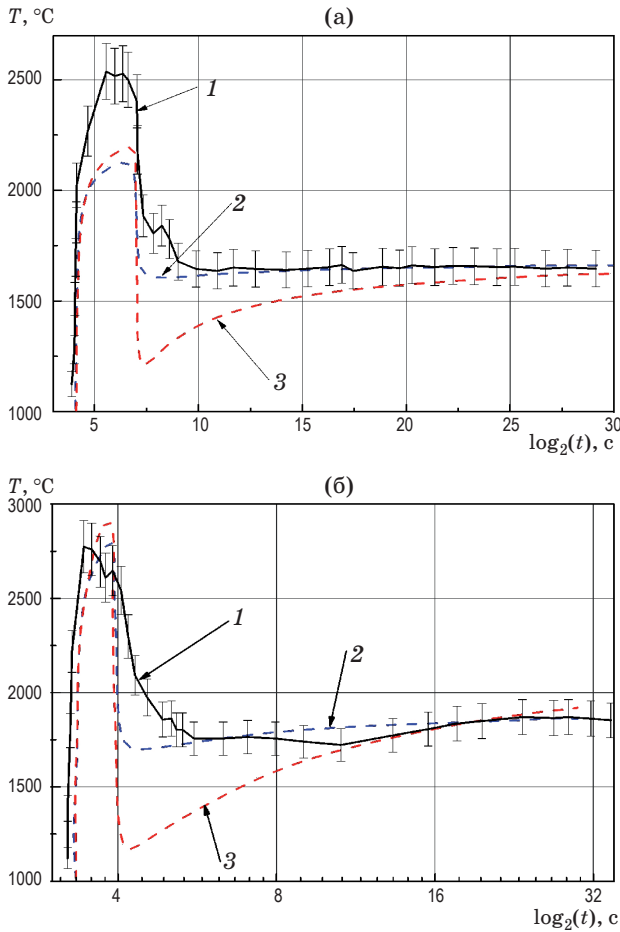
Вариант 1: область, где образуется SiC, соответствует размерам частицы и  $\xi_f = 0,45$  при  $q = 2,5 \text{ кВт/см}^2$ ,  $\xi_f = 0,60$  при  $q = 1,75 \text{ кВт/см}^2$ , область радиусом 1 мм,  $\xi_f = 0,02$  для всех вариантов расчета;

Вариант 2: область, где образуется SiC, радиусом 500 мкм и  $\xi_f = 0,15$  при  $q = 2,5 \text{ кВт/см}^2$ ,  $\xi_f = 0,21$  при  $q = 1,75 \text{ кВт/см}^2$ , и дополнительная область поглощения радиусом 3 мм и  $\xi_f = 0,02$  для всех вариантов расчета.

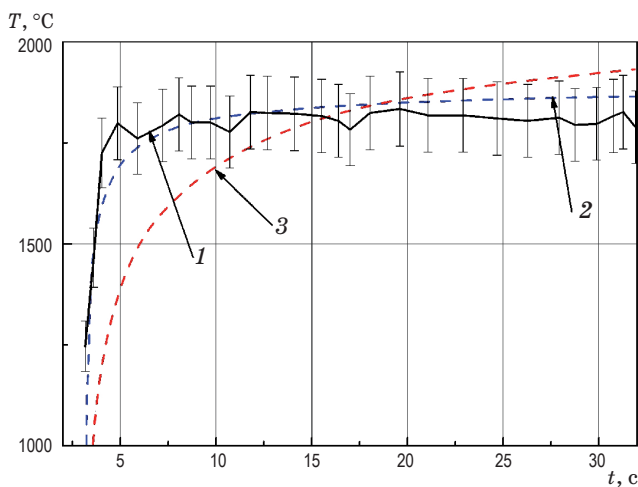
Характерное время протекания реакции выбиралось по результатам экспериментов в пределах 0,7–2,5 с. В частности, при плотности мощности ЛИ  $1,75 \text{ кВт/см}^2$  время реакции составляло 2,7 с, а при  $2,5 \text{ кВт/см}^2$  — 0,7 с.

На рис. 9 сравниваются результаты расчетов с экспериментальными данными.





**Рис. 9.** Зависимости температуры частицы от времени воздействия ЛИ при  $q = 1,75 \text{ кВт/см}^2$  (а) и  $q = 2,5 \text{ кВт/см}^2$  (б). 1 — эксперимент, 2 — расчет (1-й вариант области), 3 — расчет (2-й вариант области).



**Рис. 10.** Зависимости температуры частицы от времени воздействия ЛИ при повторном облучении образца с  $q = 2,5 \text{ кВт/см}^2$ . 1 — эксперимент, 2 — расчет (1-й вариант области), 3 — расчет (2-й вариант области).

Из сравнения результатов, приведенных на рис. 9, видно, что как характер зависимости, так и значения температур, полученные в ходе расчетов и эксперимента, находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом в случае варианта 1 задания расчетной области. При использовании варианта 2 расчетные данные отличаются от эксперимента на стадии химической реакции. Это может быть связано с учетом всех особенностей протекания химической реакции.

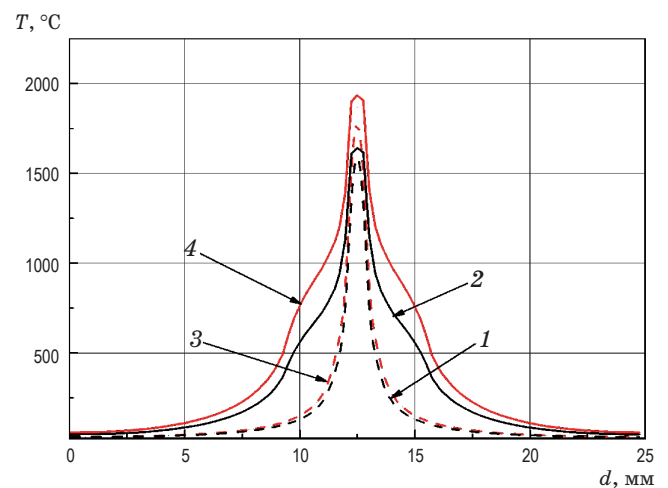
Было проведено расчетное моделирование эксперимента, в котором идентичное ЛИ повторно воздействует на облученную в предыдущем опыте поверхность образца. В этом случае с самого начала ЛИ воздействует на SiC, образованный при первом облучении частицы графита. Результаты таких расчетов приведены на рис. 10.

Как видно из рис. 10, эксперимент и расчет хорошо согласуются при использовании варианта 1 задания расчетной области, что дополнительно подтверждает факт образования SiC в ходе химической реакции при лазерном воздействии.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

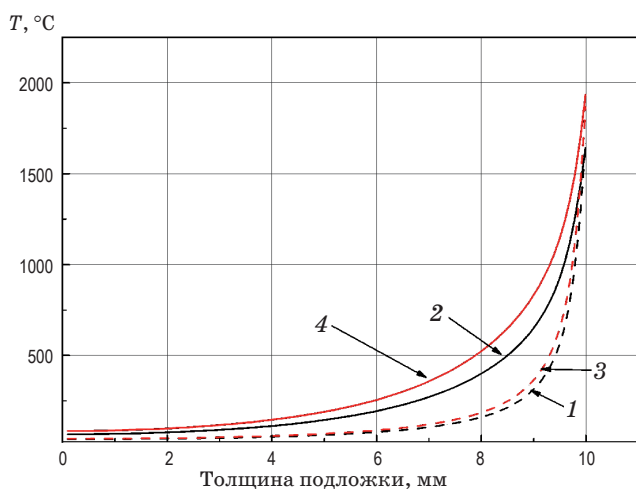
На рис. 11 и 12 приведены пространственные распределения температуры в кварцевой подложке для обоих вариантов расчета с использованием разных размеров областей поглощения. Распределения температур приведены на момент времени 30 с после начала лазерного воздействия.

Из рис. 11 и 12 следует, что вариант 1 задания расчетной области дает лучшее согласие с температурой в центре частицы, зарегистрированной экспериментально, тогда как при варианте 2 задания



**Рис. 11.** Распределение температуры по диаметру кварцевой подложки в плоскости падения лазерного излучения  $Z = 0$  на момент времени  $t = 30 \text{ с}$ . 1 —  $q = 1,75 \text{ кВт/см}^2$  (1-й вариант области), 2 —  $q = 1,75 \text{ кВт/см}^2$  (2-й вариант области), 3 —  $q = 2,5 \text{ кВт/см}^2$  (1-й вариант области), 4 —  $q = 2,5 \text{ кВт/см}^2$  (2-й вариант области).



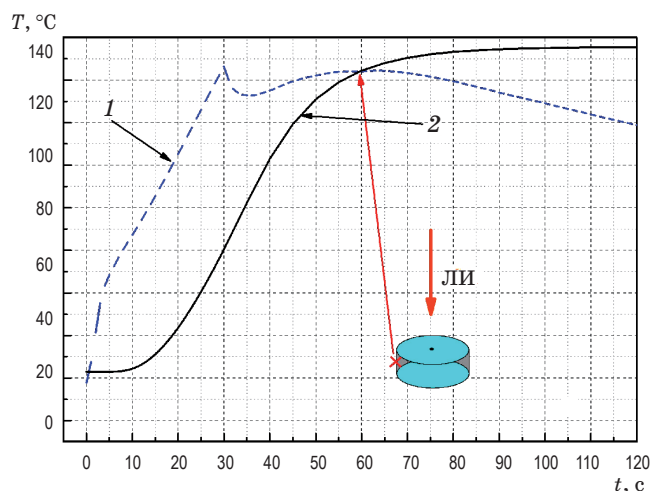


**Рис. 12.** Распределение температуры по толщине кварцевой подложки вдоль оси  $Z$  на момент времени  $t = 30$  с (начало отсчета от необлучаемой поверхности). 1 —  $q = 1,75$  кВт/см<sup>2</sup> (1-й вариант области), 2 —  $q = 1,75$  кВт/см<sup>2</sup> (2-й вариант области), 3 —  $q = 2,5$  кВт/см<sup>2</sup> (1-й вариант области), 4 —  $q = 2,5$  кВт/см<sup>2</sup> (2-й вариант области).

расчетной области температурное поле распространяется на большее расстояние, что обусловлено большей площадью поглощающей области. Отсюда следует, что из-за образования SiC на прозрачной кварцевой подложке образуется область поглощения, по размерам в несколько раз превосходящая размер исходной частицы.

Было рассчитано остаточное температурное поле в образце после выравнивания температурных градиентов по объему подложки спустя длительное время после выключения ЛИ. В эксперименте измеренная остаточная температура подложки составила 105 °C примерно через 3 мин после лазерного облучения образца с плотностью мощности 3,4 кВт/см<sup>2</sup>. На рис. 13 приведена экспериментальная зависимость температуры цилиндрической поверхности кварцевой подложки от времени воздействия ЛИ, измеренная с помощью термопары, установленной на полувысоте подложки. Место расположения термопары на рис. 13 отмечено крестиком.

Из рис. 13 видно, что в эксперименте термопара начинает нагреваться с момента включения лазерного облучения, хотя тепловая волна теплопроводности дойти до термопары еще не могла. Рост температуры термопары продолжался до момента выключения ЛИ. Вероятно, это связано с лучистым нагревом рабочего спая термопары тепловым излучением самой частицы и зоны подложки вокруг нее, нагретых до высокой температуры и ЛИ, рассеянным от этой зоны. Через 30 с после выключения ЛИ термопара начинает методически верно измерять температуру в точке контакта. В эксперименте с плотностью мощности ЛИ 3,4 кВт/см<sup>2</sup> максимальный нагрев кварцевой под-



**Рис. 13.** Зависимость температуры цилиндрической поверхности кварцевой подложки от времени облучения ( $q = 3,4$  кВт/см<sup>2</sup>), определенной термопарой (1), расчетом (2).

ложки  $\Delta T_{\max} = 115$  °C достигается приблизительно через 60 с после начала лазерного облучения. Это близко к расчетному значению этой величины.

Таким образом, из результатов экспериментов и проведенных расчетов следует, что прохождение непрерывного ЛИ через прозрачную кварцевую подложку с малым коэффициентом поглощения при наличии на ее поверхности частиц углерода приводит к сильному локальному нагреву, протеканию химических реакций между частицами и подложкой и в итоге к необратимым повреждениям самой подложки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено расчетно-экспериментальное исследование теплофизических, оптических и химических процессов, происходящих с углеродными частицами, находящимися на поверхности кварцевой подложки в инертной газовой среде и облучаемыми непрерывным лазерным излучением интенсивностью в диапазоне от 0,35 до 3,5 кВт/см<sup>2</sup>.

При лазерном облучении с плотностью мощности менее 1,5–1,75 кВт/см<sup>2</sup> частицы углерода на кварце монотонно нагреваются до стационарной температуры как химически инертные объекты. Повреждения поверхности кварцевой подложки при этом не происходит. При плотности мощности в исследованном диапазоне от 1,75 до 3,5 кВт/см<sup>2</sup> наблюдалось двустадийное изменение температуры углеродной частицы. На начальной стадии процесса температура частицы за время 1–3 с достигала 2200–3000 °C, затем резко уменьшалась до стационарного уровня в диапазоне 1400–1600 °C и держалась такой в течение всего оставшегося

времени облучения. Сама частица исчезала, а на подложке образовывалась зона повреждения практически по всей области лазерного пятна с образованием кратера, центр которого совпадал с центром частицы.

Обнаруженный эффект резкого уменьшения температуры частицы углерода после ее лазерного нагрева свыше 2200–2400 °С может объясняться образованием на кварцевой подложке SiC. Карбид кремния, являясь полупроводником, обладает существенно меньшим коэффициентом поглощения и нагревается в поле лазерного излучения до меньшей температуры. Синтез SiC при лазерном нагреве углерода на кремниевой подложке подтверждается совпадением спектров фотолюминесценции образовавшегося продукта (SiC) и промышленного карборунда.

С использованием программного модуля комплекса «ЛОГОС»–«ЛОГОС-Тепло» проведено численное моделирование процесса взаимодействия лазерного излучения с частицей углерода, находящейся на прозрачной подложке из кварца. Разработанная расчетная модель учитывает изменение теплофизических и оптических параметров среды вследствие химической реакции между углеродом и кварцем посредством изменения размеров областей поглощения, коэффициентов поверхностного поглощения и времени реакции образования SiC. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных результатов.

Полученные результаты могут быть полезны для понимания механизма повреждения запыленных оптических элементов в поле мощного лазерного излучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Букатый В.И., Суторихин И.А., Шайдук А.М. Исследование динамики горения углеродной частицы в поле излучения CO<sub>2</sub> лазера // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19. С. 73–78.
2. Букатый В.И., Сагалаков А.М., Тельнихин А.А. Горение углеродных частиц в мощном оптическом поле // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15. С. 46–50.
3. Букатый В.И., Суторихин И.А., Шайдук А.М. Температура поверхности углеродных частиц в поле мощного лазерного излучения // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 24. № 5. С. 1004–1007.
4. Букатый В.И., Жданов Е.П., Шайдук А.М. О горении аэрозольных частиц в поле электромагнитного излучения // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18. № 3. С. 56–59.
5. Калинин В.В., Орловская С.Г., Гулеватая О.Н. Высокотемпературный теплообмен нагреваемой лазерным излучением углеродной частицы с учетом стефановского течения на ее поверхности // в сб. Физика аэродисперсных систем / Одесса: изд. Астропринт, 2001. С. 158–168.
6. Brown A., Oglosa A., Taylor L. Continuous-wave laser damage and conditioning of particle contaminated optics // Appl. Opt. 2015. V. 54. № 16. P. 5216–5222.
7. Brown A., Oglosa A., Olson K. Continuous-wave laser particle conditioning: Thresholds and time scales // Optics & Laser Technol. 2017. V. 89. P. 27–30.
8. Мазанов В.А., Макейкин Е.Н., Русин С.А. и др. Многоканальная спектрально-пирометрическая методика определения яркостной температуры поверхности тел // V Всерос. школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Саров: изд. РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 211–218.
9. Мазанов В.А., Макейкин Е.Н., Маркин С.В. и др. Взаимодействие излучения ХКИЛ с углеродными материалами // V Всерос. школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Саров: изд. РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 218–226.
10. Свет Д.Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. М.: «Наука», 1968. 385 с.
11. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. М.: «Наука», 1964. 223 с.
12. Klinger N., Strauss E.L., Komarek K.L. Reactions between silica and graphite // J. Amer. Ceram. Soc. 1966. V. 49. P. 369–374.
13. Глинка Р.Л. Общая химия. М.: Химия, 1976. 711 с.
14. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Майский С.М. и др. Таблицы спектральных линий. М.: «Наука», 1977. 798 с.
15. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. Физические величины. Справочник / под ред. Кутателадзе С.С. М.: Энергоиздат, 1991. 1232 с.
16. Пакет программ «ЛОГОС», версия 5. Свидетельство №2017612306 от 20.02.2017.
17. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.: Государственное энергетическое изд., 1958. С. 320–340.
18. Kahar S.M., Voon C.H., Lee C.C. Synthesis of SiC nanowhiskers from graphite and silica by microwave heating // Materials Science-Poland. 2016. V. 34(4). P. 770–779.
19. Vix-Guterl C., Alix I., Ehrburger P. Synthesis of tubular silicon carbide (SiC) from a carbon-silica material by using a reactive replica technique mechanism of formation of SiC // Acta Materialia. 2004. V. 52. P. 1639–1651.
20. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. М., 2009. 386 с.
21. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: «Мир», 1975. 934 с.