

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ФАКЕЛА ПРОДУКТОВ, ОБРАЗОВАННЫХ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СО₂-ЛАЗЕРА С ТВЕРДОЙ МИШЕНЬЮ
В АТМОСФЕРЕ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ**

© 2011 г. Г. Е. Беляев*, А. А. Васин*, А. М. Величко**, В. П. Дубенков*, М. Н. Ларичев**,
А. И. Никитин**, Н. С. Шайгура*, А. Е. Шейндлин*, Е. И. Школьников*, И. В. Янилкин*.

*Объединенный институт высоких температур РАН
Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13

**Институт энергетических проблем химической физики РАН
Россия, 119334, Москва, Ленинский просп., 38, корп. 2

*** Московский физико-технический институт
Россия, 141700, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

Поступила в редакцию 15.10.2010 г.

Описывается экспериментальная установка для исследования кинетики процессов формирования молекулярных ассоциаций из атомарных предшественников, полученных путем испарения вещества мишени мощным импульсным излучением СО₂-лазера. Представлены первые экспериментальные результаты по измерению спектральных и пространственно-временных характеристик разлета атомов Al, образующихся при взаимодействии лазерного излучения с оксидом алюминия Al₂O₃, с последующим формированием AlO в атмосфере различных газов низкого давления (0.1–0.3 Торр). С помощью атомно-силового микроскопа получены изображения структурно подобных форм продуктов конденсации на поверхности стекла.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение взаимодействия лазерного излучения с веществом продолжает оставаться объектом пристального внимания исследователей. Это касается как фундаментальных вопросов, так и прикладных аспектов проблемы. Лазерный нагрев твердой поверхности является удобным инструментом моделирования высокотемпературных теплофизических процессов, реализуемых в натуральных условиях.

Решение такого рода задач предполагается на лазерной экспериментальной установке, созданной совместно ИНЭПХФ РАН, ОИВТ РАН и МФТИ. В частности, планируется изучить процесс формирования частиц конденсированной фазы Al₂O₃ из газообразных предшественников, протекающий при горении металлического алюминия. Этот процесс является ключевым среди процессов, обеспечивающих тепловыделение горящего алюминия, поскольку в соответствии с термодинамическими расчетами при его протекании выделяется не менее 50% от общего количества тепловой энергии.

Несмотря на многочисленные исследования [1], полное понимание механизма процесса образования конденсированной фазы Al₂O₃ до сих пор

не достигнуто: не изучены стадии формирования зародыша конденсированной фазы и его последующего роста, сопровождающегося тепловыделением. Изучение процесса конденсации позволит повысить эффективность сжигания металлического алюминия в различных энергетических системах, в частности, сможет обеспечить возможность достижения в процессе горения диспергированного алюминия в водяном паре высоких температур (~3500 К). Это, в свою очередь, даст возможность получать в качестве продукта горения высокотемпературный молекулярный водород, который может быть использован как рабочее тело для магнетогидродинамических (м.г.д.) генераторов нового поколения [2].

Понимание механизма процесса, в котором происходит зарождение и формирование частиц конденсированной фазы – Al₂O₃, также облегчит решение физико-технической задачи очистки высокотемпературного водорода от этих частиц. Актуальность этой задачи определяется тем, что из-за особенностей процесса преобразования энергии в канале м.г.д.-генератора удаление из водорода гетерогенных примесей становится одной из принципиальных проблем, определяющих

возможность практической реализации высоко-температурного реактора с м.г.д.-генератором.

Другим возможным практическим применением знаний о механизме формирования конденсированной фазы является разработка путей управления процессами газофазной конденсации продуктов окисления алюминия с целью обеспечить синтез веществ на основе Al_2O_3 , имеющих заданный фазовый состав и заданные типоразмеры частиц, включая наноразмерные.

Непосредственная задача представленной работы – экспериментальное исследование процессов испарения и конденсации продуктов испарения кристаллического Al_2O_3 (сапфира) в различных по составу и плотности газообразных средах. Для ее решения используется метод быстрого нагрева сапфира излучением импульсного CO_2 -лазера большой мощности. Метод позволяет изучить механизмы формирования конденсированной фазы в контролируемых условиях. Схожие исследования описаны в [3–6], однако в отличие от них представленная установка позволяет изучать в одном эксперименте одновременно как пространственные, так и временные характеристики излучения отдельных спектральных линий лазерного факела.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Вакуумная мишенная камера BK с размещенной в ней мишенью M откачивалась механическим форвакуумным насосом 2НВР5-Д и высоковакуумным диффузионным паромасляным насосом Н-1С-2, снабженным азотной ловушкой. Камера BK закреплена на оптическом столе с помощью юстировочных опор и оснащена механизмом планарного перемещения мишени. Вакуумпроводы присоединены к мишенной камере через механические развязки.

Окно Π_1 , изготовленное из BaF_2 , использовалось для ввода в камеру лазерного излучения, окно Π_2 из оптического стекла К8 предназначено для анализа видимого спектра свечения продуктов взаимодействия лазерного излучения с мишенью. Камера оборудована системой напуска газов и системой измерения давления (лампы ПМТ-2, ПМИ-2), также предусмотрена байпасная откачка камеры.

В камере на различных расстояниях от мишени установлены образцы C , на поверхности которых из газовой фазы могли конденсироваться продукты, образовавшиеся в результате лазерного нагрева мишени. В качестве образцов служили пластинки стекла марки ТС, химически устойчивые к условиям экспериментов.

Использовавшийся CO_2 -лазер с поперечным разрядом выполнен по классической схеме; его

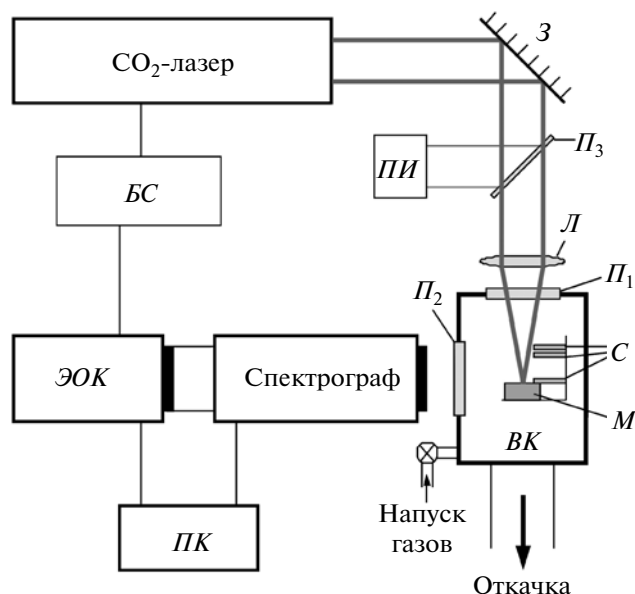


Рис.1. Схема экспериментальной установки. BK – мишенная вакуумная камера; M – мишень; BC – блок синхронизации лазерного излучения и системы регистрации; $ЭОК$ – электронно-оптическая камера К008; $ПК$ – персональный компьютер; L – линза из BaF_2 ; $ПИ$ – приемник излучения; Π_1 – окно из BaF_2 ; Π_2 – окно из оптического стекла К8; Π_3 – делительная пластинка из BaF_2 ; C – стеклянные пластинки для исследования процессов конденсации продуктов лазерного нагрева; $З$ – зеркало с золотым напылением.

рабочее тело – смесь газов CO_2 , N_2 и He в объемном соотношении 1 : 1 : 4 соответственно. Использовались оптические резонаторы лазера двух типов: резонатор, состоящий из сферического “глухого” зеркала и дифракционной отражательной решетки (100 штрихов/мм), и неустойчивый резонатор, образованный двумя сферическими зеркалами разного диаметра. Первый резонатор осуществлял перестройку длин волн излучения лазера, второй работал на единственной линии вращательного перехода $P(20)$ колебательной полосы $00^{\circ}1-10^{\circ}0$.

Выходные окна лазерной кюветы, изготовленные из BaF_2 или $NaCl$, установлены под углом Брюстера к оптической оси резонатора. Энергия лазерного излучения составляла (0.7–4.0) Дж/импульс в зависимости от типа резонатора лазера и сохранялась стабильной от импульса к импульсу с погрешностью $\sim 10\%$ в течение излучения ≥ 100 импульсов при работе без замены рабочего тела (устройство лазера не предусматривает непрерывную прокачку смеси).

Лазерное излучение с заданной плотностью энергии подводилось к окну мишенной камеры и фокусировалось на поверхности мишени при помощи оптической системы из отклоняющих медных зеркал $З$ с золотым напылением и фокусиру-

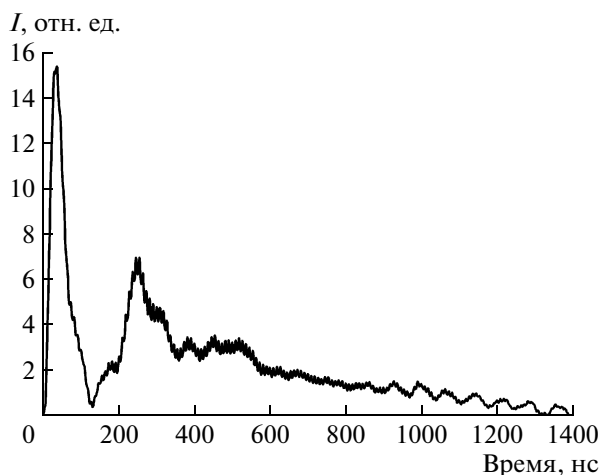


Рис. 2. Характерная форма лазерного импульса.

ющей линзы L из BaF_2 . Для контроля энергии лазерного импульса на оси оптической системы под углом 45° к ней установлена пластина P_3 из BaF_2 , отводящая часть излучения в апертуру датчика измерителя энергии лазерных импульсов $ПИ$ (PE50BV-SH-V2 фирмы OPHIR).

Характерная форма и длительность лазерного импульса $E = f(t)$, полученная с помощью германиевого детектора, в котором использован эффект увлечения носителей тока излучением [7], приведена на рис. 2. Колебания сигнала, наблюдаемые на “хвосте” импульса, связаны с наводкой разряда на детектор.

Кроме мишенной камеры, на оптическом столе установлены спектрограф-монокроматор iNR 320 (фирма HORIBA Jobin Yvon Inc.) для ана-

лиза видимой части спектра испускания лазерного факела и электронно-оптическая стрик-камера K008 компании VIFO для регистрации исследуемого излучения. Камера K008 позволяет получать не только интегральный по времени спектр, но также и вырезать отдельные спектральные линии и разворачивать их во времени.

Система синхронизации лазерной вспышки и запуска камеры работала в двух режимах. В первом режиме генератор импульсов Г5-63 запускал одновременно CO_2 -лазер и второй генератор Г5-63, который с заданной задержкой запускал электронно-оптическую камеру. Во втором режиме лазер запускался вручную, а электромагнитная наводка от разряда в камере лазера преобразовывалась в электрический сигнал, подаваемый на генератор импульсов Г5-63, который затем запускал камеру. Прохождение всех сигналов отслеживалось 4-канальным осциллографом Tektronix TDS2014В.

Управление спектрографом производилось при помощи персонального компьютера, на который также поступали в цифровом виде все изображения с электронно-оптической камеры.

Схема устройства, формирующего импульс запуска по наводке от импульса разряда в камере лазера, приведена на рис. 3. Оно состоит из входного делителя на резисторах R_1, R_2, R_3 и корректирующей емкости C_1 , пороговой схемы на транзисторе VT и ждущего мультивибратора на двух логических элементах HE с триггером Шмидта на входе — M_{1-1} и M_{1-2} .

Момент срабатывания пороговой схемы определяется уровнем отрицательного напряжения на базе VT , которое может регулироваться резистором VR_1 в пределах от 0.6–3.1 В. Длительность вы-

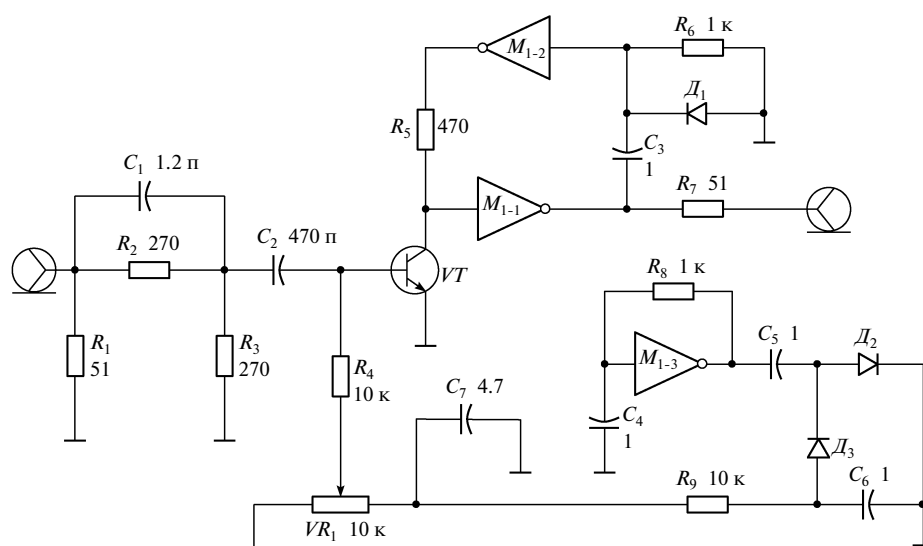


Рис. 3. Схема устройства синхронизации по наводке от импульса разряда. M — SN74LVC14A; VT — BFG591; D_1 – D_3 — 1S2471.

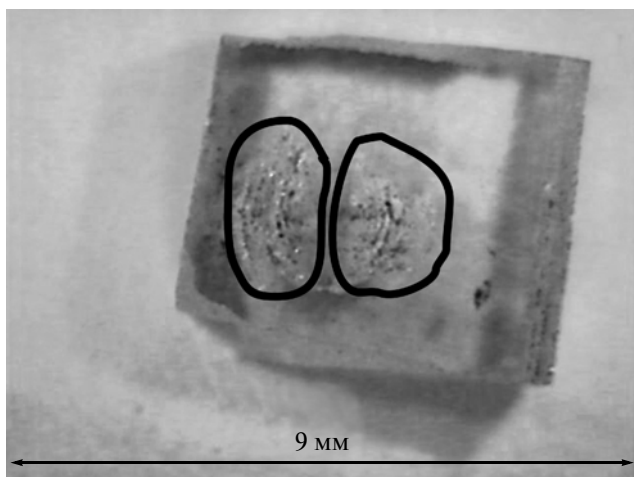


Рис. 4. Кратеры, образовавшиеся на поверхности мишени (сапфир) после воздействия 50 импульсов CO_2 -лазера (обведены).

ходного импульса ждущего мультивибратора определяется постоянной времени цепи C_3, R_6 , и для приведенных на схеме величин равна примерно 100 мкс.

На элементе M_{1-3} собран релаксационный генератор, к выходу которого подключен выпрямитель на диодах D_2, D_3 и конденсаторе C_6 , с которого снимается постоянное напряжение -5 В. Это позволяет обойтись одним источником питания $+5$ В, подключенным к соответствующим выводам микросхемы M_{1-1} , но увеличивает нестабильность среза выходного импульса до $\sim 1\%$ от его длительности. При необходимости нестабильность среза импульса можно уменьшить, но для этого потребуются два источника питания: $+5$ В и -5 В.

Испытания проводились с помощью генератора импульсов Г5-63 и осциллографа С1-75. Результаты испытаний: длительность фронтов выходного импульса < 700 пс; нестабильность переднего фронта выходного импульса < 700 пс; нестабильность среза выходного импульса 1 мкс; длительность выходного импульса 100 мкс; время срабатывания 5 нс; амплитуда выходного импульса 2.5 В при нагрузке 50 Ом.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Диаметр пятна фокусировки излучения CO_2 -лазера варьировался посредством перемещения фокусирующей линзы L (рис. 1) вдоль оптической оси. В ходе экспериментов диаметр пятна составлял ~ 3 мм.

Рис. 4 дает представление о распределении энергии излучения лазерного пучка на поверхности мишени (лазер с неустойчивым резонатором). Видно, что сечение пучка разделено на две от-

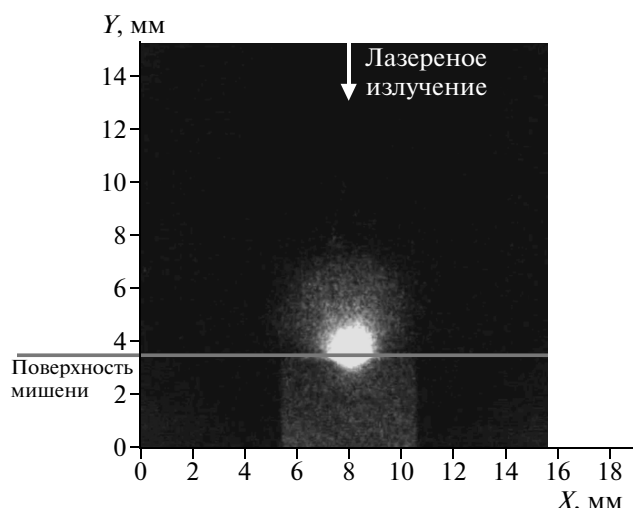


Рис. 5. Интегральное свечение факела. Время экспозиции 230 нс, считая от начала лазерного импульса.

дельные части (что определяется конструктивными особенностями данного конкретного резонатора). В описанных ниже экспериментах использовалась только одна из частей лазерного пучка.

Изображение интегрального свечения факела продуктов взаимодействия лазерного излучения с мишенью приведено на рис. 5.

Развертка интегрального свечения облученной поверхности во времени (рис. 6) позволяет наблюдать эффект синхронизации мод CO_2 -лазера [8]. Благодаря этому эффекту лазер излучает узкие импульсы света, период T следования которых точно равен длительности одного цикла (вре-

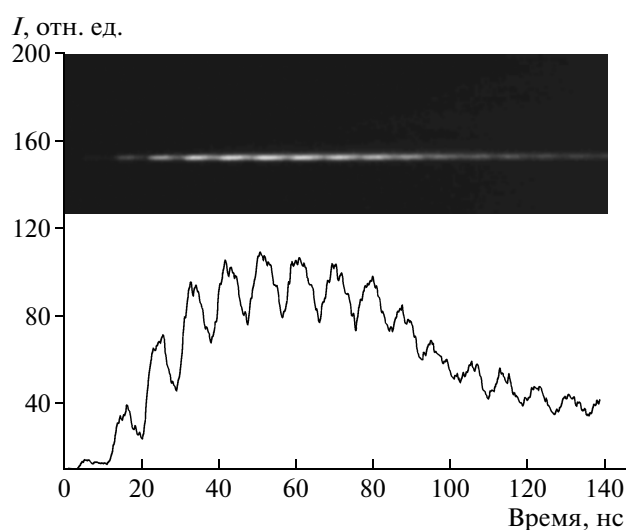


Рис. 6. Развертка интегрального свечения облучаемой поверхности мишени. $T_{ex} = 8.8$ нс.

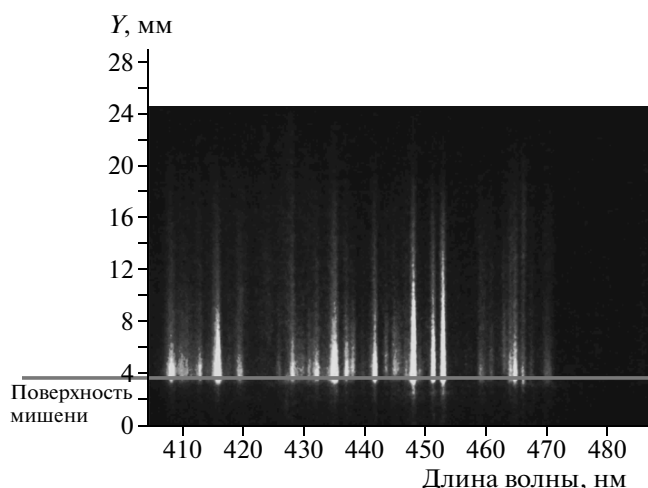


Рис. 7. Спектр излучения лазерного факела. Время экспозиции 21 мкс.

мени обхода фотоном резонатора длиной L в прямом и обратном направлениях):

$$T = 2L/c.$$

Здесь c — скорость света в рабочей среде лазера.

Длительность каждого импульса обратно пропорциональна ширине участка спектра возбужденных мод:

$$\Delta T = T/N,$$

где N — число возбужденных мод.

В нашем случае расстояние между зеркалами лазера $L = 135$ см, отсюда расчетное значение периода следования отдельных лазерных импульсов

(пичков) равно $T_c = 9$ нс, тогда как экспериментальное значение периода пичков (см. рис. 6) равно $T_{ex} = 8.8 \pm 0.3$ нс. Так как длительность отдельного пичка на уровне половины его амплитуды равна $\Delta T_{ex} = 5$ нс, можно сделать вывод, что в формировании импульсов задействовано не более двух мод резонатора лазера. Данные расчеты хорошо согласуются с результатами измерений, проведенных с помощью германиевого детектора.

Изображение оси факела объективом проецировалось на входную щель спектрографа iHR 320, и спектр регистрировался электронно-оптической камерой K008. Такая конфигурация позволяет получать пространственно-разрешенные спектры (рис. 7) исследуемого объекта в диапазоне длин волн 380–800 нм (определяется диапазоном чувствительности фотокаатода усилителя яркости камеры). В данной работе реализовано спектральное разрешение не хуже 0.25 нм, а погрешность определения пространственной координаты разлета составила 0.3 мм.

При использовании режима временной развертки с помощью камеры можно следить за изменением во времени интенсивности отдельной спектральной линии (рис. 8). Таким образом, представленная диагностическая система дает возможность регистрировать динамику исследуемых процессов во времени и пространстве.

Установка позволяет также проводить эксперименты в различных газовых средах (рис. 9).

Система крепления образцов, предназначенных для исследования процессов конденсации продуктов лазерного нагрева (см. рис. 1, С), поз-

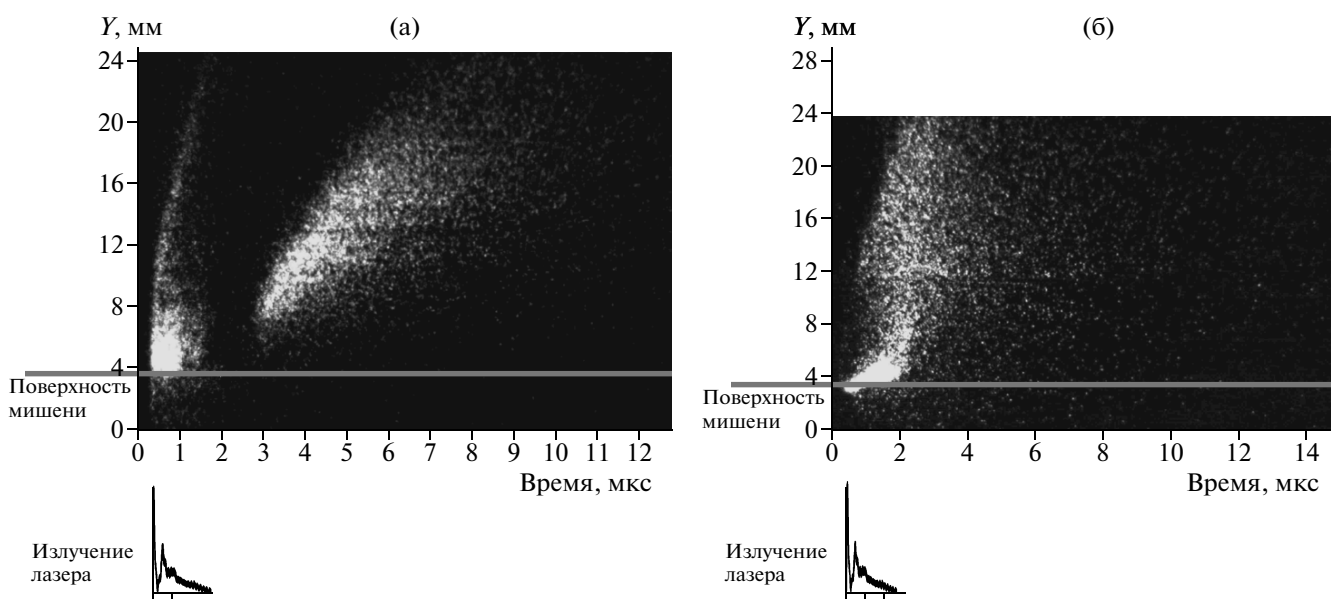


Рис. 8. Временные развертки интенсивности излучения в воздухе при давлении 10^{-1} Торр: **а** — на длине волны 486 нм (молекула AlO : $B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$, $\Delta v = 0$); **б** — на длине волны 396.15 нм (атом Al : $3s^24s^2S_{1/2} \rightarrow 3s^23p^2P_{3/2}^0$).

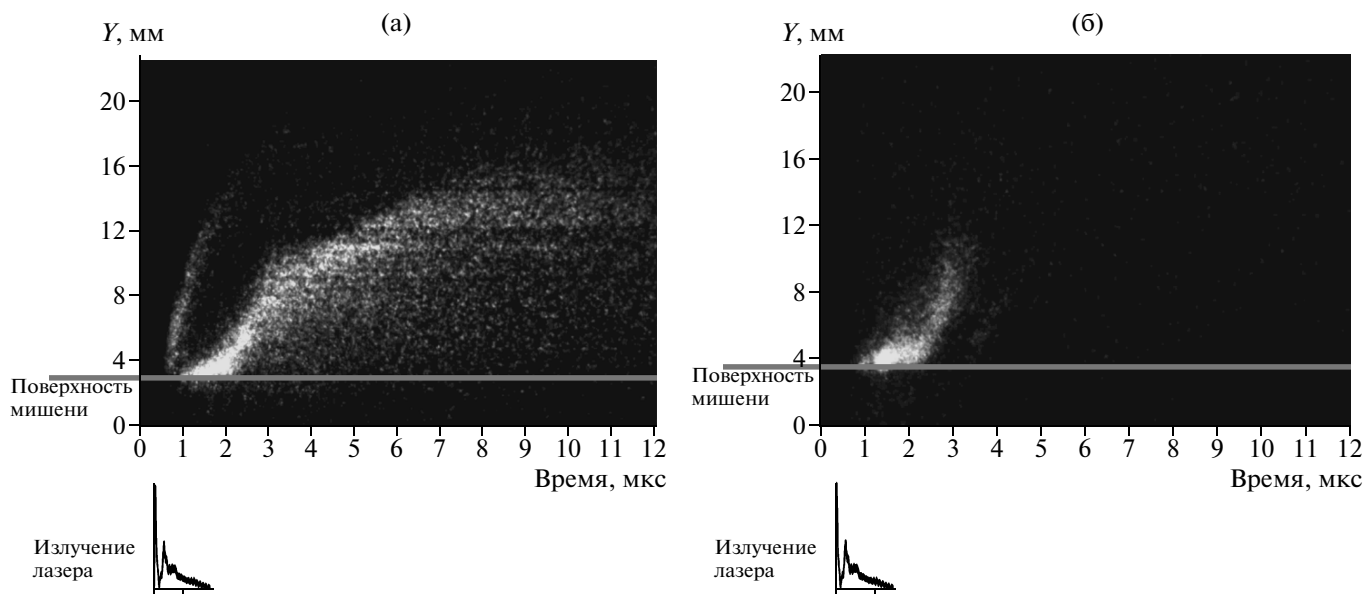


Рис. 9. Временные развертки интенсивности излучения: **а** – на длине волны 396.15 нм (атом Al: $3s^24s^2S_{1/2} \rightarrow 3s^23p^2P_{3/2}^0$) в аргоне при давлении $3.1 \cdot 10^{-1}$ Торр; **б** – в гелии при давлении $2.2 \cdot 10^{-1}$ Торр.

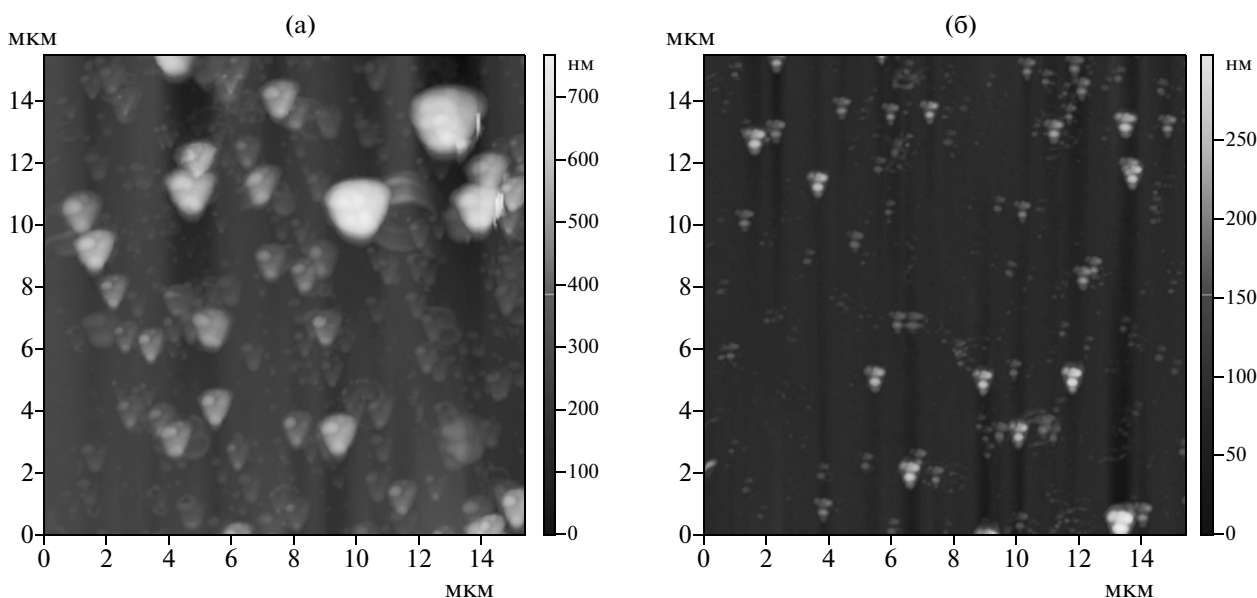


Рис. 10. Структурно подобные формы продуктов конденсации на стеклянной поверхности (область сканирования 14×14 мкм): **а** – рельеф 700 нм; **б** – рельеф 250 нм на расстоянии 3.2 мм от точки **а** на той же поверхности. Среда – Ar ($6 \cdot 10^{-2}$ Торр).

воляла устанавливать такие образцы в горизонтальной плоскости на различных высотах от точки, в которой происходило испарение материала мишени. Состояние поверхности образцов в различных точках до и после проведения облучения мишени контролировалось атомно-силовым микроскопом “Smena” (фирма NT-MDT, Зеленоград)

с минимальным шагом сканирования 0.01 нм и с головкой кантилевера \varnothing до 10 нм.

На рис. 10а, б показаны новообразования, появляющиеся на поверхности стеклянного образца *С* в области, расположенной вблизи точки испарения Al_2O_3 (рис. 10а), и в области, удаленной от этой точки на расстояние 3.2 мм в горизонталь-

ной плоскости в направлении от лазерного пучка (рис. 106). Испарение проводилось в атмосфере аргона при давлении $6 \cdot 10^{-2}$ Торр. Область сканирования поверхности в обоих случаях составляла 14×14 мкм. Анализ снимков указывает на существование структурно подобной формы продуктов конденсации. Количество и характерный размер подобных форм конденсации зависит от расстояния до мишени, что является предметом дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная экспериментальная установка и используемые диагностические методы позволяют измерять пространственно-временные характеристики промежуточных и конечных продуктов, образующихся как в газовой, так и в конденсированной фазах при взаимодействии лазерного излучения высокой плотности энергии с веществом. Облучение вещества можно проводить как в вакууме ($\approx 10^{-6}$ Торр), так и в газовой смеси контролируемого состава. Работоспособность установки продемонстрирована на примере экспериментального исследования процесса формирования молекулярного соединения АЮ при испарении его атомарных предшественников с поверхности кристаллического Al_2O_3 (сапфир).

Авторы благодарят доцента МИРЭА, ведущего инженера ЗАО “БИФО” М.А. Карпова за помощь в освоении камеры К008.

Работа проводится в рамках выполнения проекта РФФИ № 10-08-00940а “Исследование горения порошков алюминия в водяном паре применительно к проблеме создания высокотемпературного рабочего тела для м.г.д.-генератора”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Beckstead M.W.* VKI Special Course “Internal Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion”. Rhode-Saint-Genève, Belgium, 27–31 May 2002. // RTO-EN-023, 2004.
2. *Жук А.З., Клейменов Б.В., Школьников Е.И. и др.* Алюмоводородная энергетика / Под ред. А.Е. Шейндлина. М.: ОИВТ РАН, 2007.
3. *Бураков В.С., Севастенко Н.А., Тарасенко Н.В.* // Журн. прикл. спектроскопии. 1999. Т. 66. № 1. С. 109.
4. *Piehler T.N., DeLucia F.C.Jr., Munson C.A. et al.* // ARL-TR-3371. 2004.
5. *Dors I.G., Parriger C., Lewis J.W.* // Opt. Lett. 1998. V. 23. № 22. P. 1778.
6. *Itina T.E., Hermann J., Delaporte P. et al.* // Phys. Rev. E. 2002. V. 66. P. (066406-1)–(066406-12).
7. *Смит Р.* Полупроводники. М.: Мир, 1982. С. 396–397.
8. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Физматлит, 2003. С. 737–739.