

Горение частиц при взаимодействии излучения гиротрона со смесью порошков металл/диэлектрик

© З.А. Заклецкий, Н.Г. Гусейн-Заде, Д.В. Малахов, Л.В. Бадьянова, Е.В. Воронова, В.Д. Степахин

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: fiveziggen@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 мая 2023 г.
В окончательной редакции 17 июля 2023 г.
Принято к публикации 20 июля 2023 г.

Рассмотрен многостадийный процесс развития физико-химических процессов в реакторе с учетом воспламенения частиц на стадии поддержания плазменного разряда, включая синтез керамических микрочастиц сложной морфологии в результате взаимодействия СВЧ импульса гиротрона со смесью порошков Al/Al_2O_3 . После окончания СВЧ импульса наблюдалось облако, состоящее из горячих частиц оксида алюминия и горящих частиц алюминия. Определено влияние процесса горения частиц алюминия на продукты плазмохимического синтеза. Также определена средняя скорость разлета частиц из порошковой смеси, время горения частиц алюминия, температура поверхности частиц порошковой смеси и температура газовой среды в верхней части плазмохимического реактора.

Ключевые слова: микроволновые технологии, плазма, горение, гиротрон.

DOI: 10.21883/JTF.2023.09.56214.127-23

Введение

Физико-химические процессы, происходящие при гетерогенном горении микро- и наночастиц, позволяют синтезировать материалы с новыми механическими, термодинамическими, каталитическими и электромагнитными свойствами [1]. Особый интерес представляют реакции горения металлов в различных окислительных средах с образованием оксидов, шпинелей и азотированных частиц [2].

Широко распространен метод пламенно-распылительного пиролиза (flame-spray pyrolysis, FSP) в газовой среде [3–4], при котором аэрозоль с частицами распыляется через пламя горелки или плазменный факел. В таких исследованиях плазма с высокой газовой температурой до 10^4 К генерируется высокочастотным полем или электрической дугой в потоке газа. За время взаимодействия частиц с плазменным факелом — несколько ms — частица успевает претерпеть фазовые и морфологические изменения.

Основным механизмом образования и модификации частиц в FSP является процесс испарения мелкоаэрозольной фракции металлических частиц и конденсации ее паров на более крупных оксидных или металлических частицах [5]. При использовании в качестве плазмообразующего газа окислительной среды (кислород, воздух) происходят процессы воспламенения металлических частиц после прохождения высокотемпературной области факела. В результате вместо испарения поверхность частицы начинает окисляться с дополнительным энерговыделением, которое может существенно повлиять на теплофизические параметры синтеза частиц. Поэтому

в экспериментах, проводимых в окислительной среде, необходимо точно определять характерные времена воспламенения частиц и плазменной обработки.

Наши предыдущие работы [6–8] были посвящены высокотемпературному синтезу веществ при взаимодействии порошков металл-диэлектрик с импульсным излучением гиротрона. Условия синтеза были схожи с FSP, мы наблюдали достаточно плотный для низкотемпературной плазмы (плотность электронов $n_e > 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) слой с газовой температурой более 3000 K, с которым на протяжении более 1 ms взаимодействовали разлетающиеся частицы порошка. Большинство наших экспериментов с открытой верхней границей проводилось в атмосфере азота при пониженном давлении, либо в воздушной атмосфере.

При синтезе представленным в настоящей работе методом образуются сложные металл-диэлектрические частицы, которые находят широкое применение в химической промышленности при использовании их как катализаторов в различных реакциях с участием жидких органических носителей водорода. Однако при синтезе частиц в окислительной среде в продуктах реакций могут наблюдаться продукты горения исходных металлических частиц, которые будут уменьшать количество синтезируемого материала, тем самым влияя на активность частиц-катализаторов в химических реакциях.

В настоящей работе мы решили провести исследование воспламенения и горения металлических частиц алюминия, получить значения газовой температуры в верхней области реактора, где влияние плазменного разряда минимально, а также провести оптические измерения внутри плазмохимического реактора с целью

получения дополнительной информации об этапах плазмохимического синтеза и о влиянии процесса горения на продукты синтеза.

1. Материалы и техника эксперимента

Для развития разряда в наших экспериментах необходимо присутствие как металла, так и диэлектрика. Смесь Al/Al₂O₃ была выбрана на основе известных обширных исследований воспламенения и горения частиц алюминия [9]. В качестве оксида была выбрана высокотемпературная фаза α -Al₂O₃, чтобы избежать дополнительных химических превращений.

В экспериментах использовалась смесь порошков из металлического алюминия в концентрации 20% от общей массы в 1.54 г и порошка оксида алюминия α -фазы. Порошки состояли из частиц микронного размера алюминия (ГОСТ ПА-4, линейный размер частиц от 1 до 100 μm , чистота 99.5%), и оксида алюминия (номинальный диаметр частиц до 50 μm , чистота 99.8%). Форму и размер частиц дополнительно исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (EVO 10 from GmbH Zeiss Microscopy (Jena, Germany)) (рис. 1). Большинство частиц алюминия имеют нерегулярную форму, тогда как оксид алюминия имеет сферическую форму с резкими выступами субмикронного размера.

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из мощного импульсного гиротрона, плазмохимического реактора, в котором происходит синтез частиц, СВЧ диагностики и оптической диагностики, состоящей из набора спектрометров, фотодетектора и быстрых камер.

1.1. Гиротрон

Для инициирования синтеза новых частиц в плазмохимическом реакторе используется импульсное СВЧ излучение гиротрона. Гиротрон (производитель ГИКОМ,

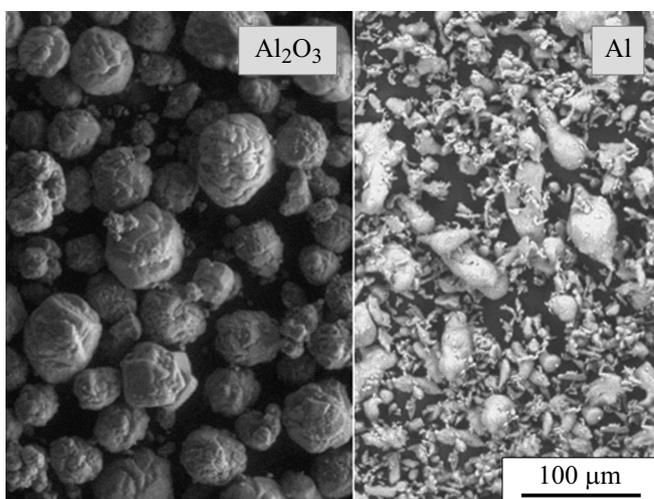


Рис. 1. СЭМ изображения исходных частиц алюминия и оксида алюминия в α -фазе.

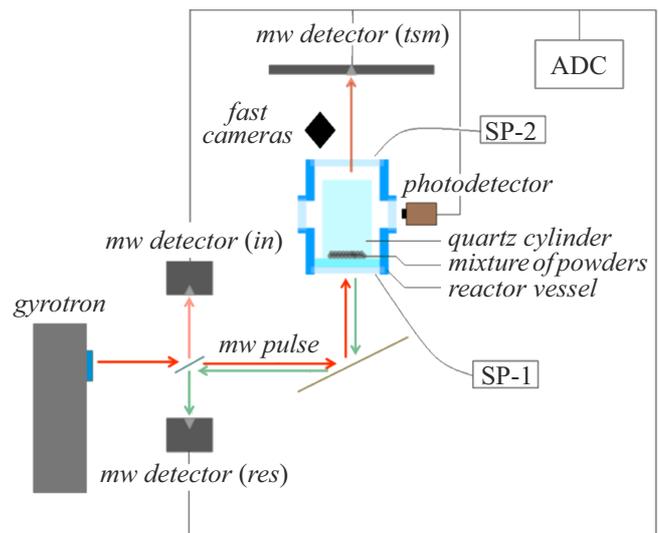


Рис. 2. Экспериментальная установка для плазмохимического синтеза веществ при взаимодействии СВЧ импульса гиротрона со смесью порошков: СВЧ детекторы, регистрирующие входящую (*in*), прошедшую (*tsm*) и отраженную (*ref*) мощность излучения, SP-1 и SP-2 — спектрометры, ADC — аналого-цифровой преобразователь.

Нижний Новгород, РФ) генерирует микроволновое излучение на заданной частоте 75.0 GHz мощностью до 600 kW, длительность одного СВЧ импульса может быть задана от 1 до 20 ms. Распределение интенсивности пучка на выходном окне гиротрона аппроксимируется гауссианой. После выходного окна гиротрона микроволновое излучение попадает в ответвитель, в котором происходит отражение малой части СВЧ мощности пучка на диагностический детектор (*mw in*, рис. 2). Ответвитель представляет собой кварцевый куб с расположенной в центре под углом 45° слюдяной четвертьволновой пластинкой. После прохождения ответвителя пучок попадает на зеркало и фокусируется на нижнее окно реактора. Диаметр гауссова пучка, проходящего на нижнюю кварцевую пластину реактора, составляет 5 см. После реактора микроволновое излучение попадает на участок с керамическими поглотителями, в центре которых расположен микроволновый детектор прошедшего излучения (*mw tsm*, рис. 2). В случае инициирования разряда часть микроволновой энергии пучка будет отражаться навстречу пучку в ответвитель, откуда она будет попадать на микроволновый детектор отраженного излучения (*mw ref*, рис. 2).

1.2. Реактор

Плазмохимический реактор включает в себя два блока. Первый блок состоит из дюралюминиевого шестигранного корпуса высотой 100 mm с цилиндрическим вырезом по центру диаметром 120 mm, в нижней и верхней части корпуса расположены кварцевые окна для

ввода и вывода СВЧ импульса гиротрона. На двух боковых гранях корпуса расположены оптические кварцевые окна диаметром 35 mm, одно из которых не пропускает ультрафиолетовое излучение (< 300 nm), а также два патрубка для напуска и откачки газа.

Второй блок представляет собой кварцевую цилиндрическую трубку высотой 70 mm и диаметром 70 mm и кварцевую подложку с вырезанным концентрическим пазом для фиксации цилиндра. Исходная смесь порошков засыпается на кварцевую подложку, закрывается кварцевой цилиндрической трубкой и впрессовывается при помощи тефлонового кольца внутрь блока 1.

2. Диагностика

2.1. СВЧ диагностика

Для определения падающей и отраженной мощности СВЧ пучка используется три микроволновых датчика Д-407 (*mw detector*, рис. 2), которые работают в линейном режиме. Мощность СВЧ излучения, приходящая на каждый измерительный детектор, не превышает 10^{-4} W.

2.2. Оптическая диагностика

В наших условиях существует две характерные области: вблизи поверхности порошка, где поддерживается плазменный разряд, и в верхней части реактора, где находятся разлетающиеся частицы, поэтому в настоящей работе мы использовали два спектрометра, один из которых направлен на нижнюю часть реактора в область верхней поверхности порошковой смеси SP-1, а второй — в верхнюю часть реактора SP-2.

С помощью SP-1 мы оцениваем температуру частиц в порошковой засыпке в процессе облучения микроволновым излучением и плазменным разрядом [10,11]. Оценка температуры поверхности частиц производится по методу Планка. Спектральная интенсивность теплового излучения частиц описывается формулой

$$I = \varepsilon C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2/\lambda T) - 1],$$

где ε — спектральный коэффициент излучения, $C_1 = 37418 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{cm}^2$, $C_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, λ — длина волны, [μm], T — температура объекта, [K]. В случае если максимум температуры объекта попадает в область Вина $C_2/\lambda T \gg 1$, формула преобразуется:

$$\ln(\lambda^5 I) - \ln(\varepsilon C_1) = -C_2/(\lambda T).$$

При использовании модели „серого“ тела $\varepsilon(\lambda, T) = \text{const}$ температура поверхности частиц будет определяться наклоном прямой в виновских координатах.

Для частиц в объеме нас будет интересовать газовая температура пламени горящих частиц алюминия, излучение из которого в основном происходит благодаря вращательно-колебательным переходам в двухатомной

молекуле AlO. Для этого мы рассчитываем интенсивность молекулярных полос AlO для перехода $B^2 - X^2\Sigma$ (460–530 nm) и подгоняем расчетный спектр к экспериментальному, варьируя температуру по методу наименьших квадратов [12,13]. Интенсивность излучения в молекулярной полосе $I_{j'j''}$ находится по формуле

$$I_{j'j''} = C_{em} \frac{S_{j',j''} q_{v',v''}}{Q_{rot} v'} (v_{j',j''})^4 e^{-F' J' hc/kT_{rot}} e^{-G' v' hc/kT_{vib}},$$

где C_{em} — коэффициент излучения, $S_{j',j''}$ — фактор Холна-Лондона, $q_{v',v''}$ — коэффициент Франка-Кондона, $v_{j',j''}$ — колебательный переход волнового числа (v', v'') , Q_{rot} — вращательная статистическая функция, F' и G' — колебательные и вращательные термы, T_{vib} и T_{rot} — колебательная и вращательная температуры.

Для определения интегральной светимости внутри реактора во времени использовался фотодетектор с диапазоном длин волн от 300 до 550 nm, расположенный вблизи бокового окна реактора. Полоса пропускания фотодетектора в экспериментах составляла 80 kHz.

Фотодетектор и СВЧ датчики были подключены к АЦП (ADC1250, Pulse electric) с частотой дискретизации 50 MHz и разрядностью 12 bit.

Разлет частиц фиксируется на высокоскоростную камеру Phantom VEO710, работающую с частотой 7400 кадров в секунду и выдержкой до $1 \mu\text{s}$. Камера расположена на расстоянии 50 cm под углом 60° относительно плоскости верхнего окна реактора. В нашей геометрии масштаб изображения составляет $185 \mu\text{m}/\text{px}$. Для получения информации о проекции скорости движения частиц изображения обрабатывались при помощи оригинальной программы, основанной на принципе наложения двух изображений и отслеживания смещения пика двумерной автокорреляции выбранной области для двух последовательных наложений. Также в том же месте была установлена быстрая цветная камера Contrastech MARS640-815uc, работающая с частотой 500 кадров в секунду для визуализации процессов, происходящих в реакторе на протяжении всего эксперимента.

3. Результаты и обсуждение

Эксперимент состоял из 15 последовательных СВЧ импульсов мощностью 300 kW и длительностью 6 ms, порошковая засыпка не заменялась на протяжении эксперимента. Для описания процессов внутри реактора были выбраны характерные изображения, которые соответствуют общей картине динамики развития разряда и разлета частиц на протяжении всех экспериментов. На рис. 3 представлены последовательные фотографии, полученные с цветной быстрой камеры. Временной интервал между кадрами составляет 2 ms с выдержкой $500 \mu\text{s}$. Так как в камере нет синхронизации с началом СВЧ импульса, время T_0 соответствует первому кадру после начала СВЧ импульса. Голубой цвет ($\lambda < 500$ nm)

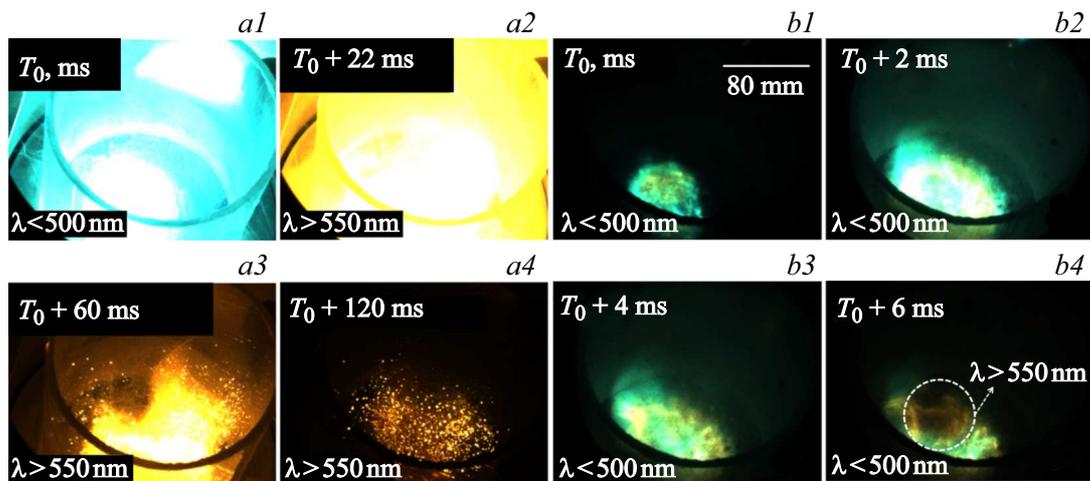


Рис. 3. $a1$ – $a4$ — светящееся облако разлетевшихся частиц в воздушной атмосфере (время экспозиции — $500\mu\text{s}$); $b1$ – $b4$ — развитие разряда над поверхностью порошка во время СВЧ импульса (время экспозиции — 5 ms).

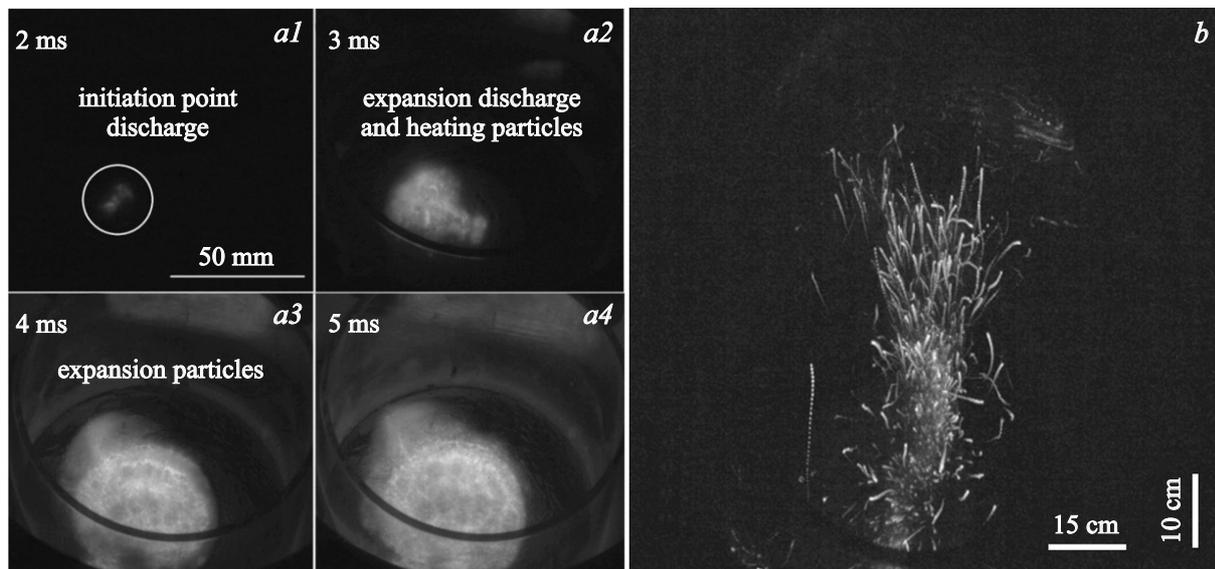


Рис. 4. $a1$ – $a4$ — светящееся облако над поверхностью порошков во время СВЧ импульса (время экспозиции — $5\mu\text{s}$); b — изображение, синтезированное из 250 последовательно наложенных кадров от 6 до 38 ms после начала СВЧ импульса.

является характерным для начальной стадии развития разряда на поверхности смеси порошков металл-диэлектрик вне зависимости от состава смеси. Спектр излучения в этом случае состоит из атомарных линий алюминия и молекулярных полос N_2 , CN , O_2 , а также континуума. По мере нагрева порошка возрастает интенсивность теплового излучения, а также излучение линий щелочных металлов (NaI , KI), которое соответствует яркому желтому излучению ($\lambda > 550\text{ nm}$). На кадре, соответствующем 60 ms после начала первого кадра, хорошо видно желтое облако движущихся частиц внутри кварцевого стакана реактора. Наблюдается резкая граница свечения, которая со временем порядка 120 ms исчезает. Характерное время остывания частиц, когда

на изображении отсутствуют яркие точки, составляет порядка 200 ms.

При времени экспозиции камеры $5\mu\text{s}$ (рис. 3, $b1$ – $b4$) можно наблюдать начало развития разряда. В момент времени T_0 наблюдается свечение пятна диаметром 30 mm. Через 2 ms увеличивается интенсивность свечения, и размер области светящегося пятна достигает 50 mm, что соответствует диаметру СВЧ пучка. Можно наблюдать, что при окончании СВЧ импульса в момент $T_0 + 6\text{ ms}$ плазменный разряд уже не поддерживается.

На рис. 4 изображены кадры, полученные при помощи высокоскоростной камеры Phantom VEO710 с экспозицией $133\mu\text{s}$ и скоростью съемки 7300 кадров в секунду. Интенсивность пикселей аппаратно увеличена

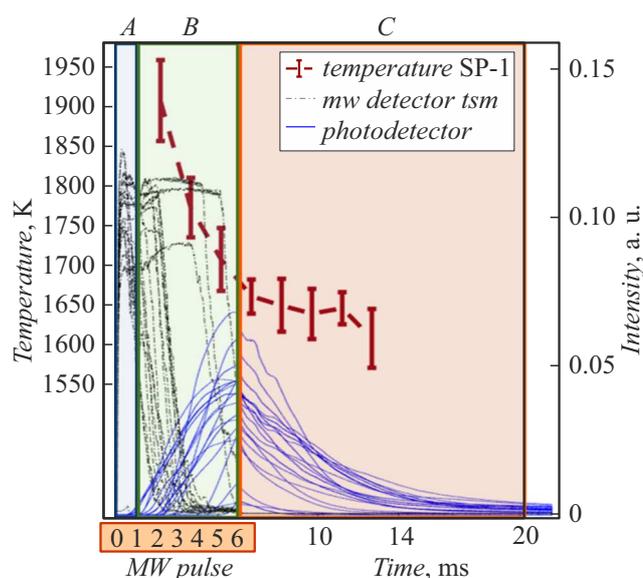


Рис. 5. Зависимости интенсивности излучения фотодетектора, прошедшего сигнала СВЧ детектора (t_{sm}) и температуры поверхности порошковой смеси от времени.

для более наглядного представления движения частиц. Камера синхронизирована с началом СВЧ импульса. Через $500\ \mu\text{s}$ – $2\ \text{ms}$ после начала СВЧ импульса на кадрах появляется локальная яркая точка, от которой происходит расширение светящегося облака во всех направлениях. Из точки инициирования разряда начинается разлет частиц, в то время как плазменный слой продолжает формироваться над поверхностью порошковой смеси. Полное формирование плазменного слоя происходит через $2\ \text{ms}$ после инициирования разряда. Разлет частиц является преимущественно вертикальным. По трекам частиц (рис. 4, a_1 – a_4) мы можем оценить их среднюю скорость подъема, которая составляет от 2 до $5\ \text{m/s}$. В данном случае интенсивность пикселей связана не с собственным свечением частиц, а пропорциональна времени от начала импульса, так, темные точки соответствуют $6\ \text{ms}$, наиболее яркие — $38\ \text{ms}$.

На рис. 5 приведен вид зависимости напряжения СВЧ детектора (t_{sm}) для прошедшей компоненты СВЧ мощности и фотодетектора от времени для каждого из 15 импульсов, масштабирование выполнено относительно $2\ \text{V}$ (правая координатная ось). Кроме этого, на рис. 5 приведена зависимость температуры поверхности порошковой смеси SP-1 от времени. Полученные, нормированные на максимальную интенсивность в серии импульсов и скорректированные с учетом чувствительности каждого спектрометра спектры с нижней (SP-1) и верхней (SP-2) частей плазмохимического реактора приведены на рис. 6, 7.

На основании проведенных экспериментов и полученных результатов можно сделать следующие выводы. Весь процесс синтеза частиц можно разделить на три характерные фазы, которые определяются ключевыми

физико-химическими процессами (фаза А, В и С на рис. 5). Все времена указаны от начала СВЧ импульса.

Фаза А (0 – $1\ \text{ms}$) характеризуется только физическими процессами: поглощение и рассеяние СВЧ энергии на частицах порошковой смеси, инициирование поверхностного плазменного разряда.

Падение сигнала прошедшего СВЧ детектора (t_{sm}) связано с поглощением СВЧ мощности пучка в плазменном разряде. Характерное время задержки перед инициированием разряда составляет порядка $500\ \mu\text{s}$ для первых 7 – 8 импульсов. Увеличение задержки в остальных импульсах связано с процессами уменьшения металлической фазы в порошковой смеси, из-за чего для выполнения условий поджига разряда необходима большая длительность импульса. Нагрев смеси порошков начинается в центрах инициирования разряда и распространяется по всему порошку (рис. 3).

Фаза В (1 – $6\ \text{ms}$) характеризуется активными физико-химическими превращениями: плавлением частиц порошковой смеси, воспламенением металлических частиц, переносом вещества между отдельными частицами.

После инициирования разряда необходимо время на нагрев частиц порошка, которое мы можем оценить по началу роста сигнала фотодетектора, который в среднем запаздывает на $500\ \mu\text{s}$ от начала поглощения СВЧ энергии в разряде. За это время температура поверхности порошковой смеси достигает значений от 1850 до $1950\ \text{K}$. Данные температуры значительно превышают температуру плавления алюминия $950\ \text{K}$, но остаются меньше температуры плавления для оксида алюминия $2310\ \text{K}$. Однако, как известно, температура фазового перехода может быть занижена, если нагреваются наночастицы [14]. Таким образом, максимум температуры в порошке может быть ограничен процессами испарения металлической и плавления оксидной фазы. С $3\ \text{ms}$ после начала СВЧ импульса наблюдается полное поглощение СВЧ мощности гиротрона (рис. 5) вплоть до окончания импульса, это означает, что вся энергия микроволнового импульса может быть передана порошковой смеси через плазменный разряд. При этом температура поверхности частиц начинает убывать по мере увеличения поглощения излучения в разряде. В таком случае единственным путем охлаждения порошковой смеси является разлет частиц с верхних слоев. Соответственно, в процессе поддержания разряда мы можем выделить две области: в первой находятся разряд и порошковая смесь, а во второй — вылетающие нагретые частицы. При этом нагретые металлические частицы после преодоления области разряда попадают в сильно окислительную среду, которой в нашем эксперименте является воздух при атмосферном давлении. В этой среде металлические частицы воспламеняются. Характерная рассчитанная температура пламени частиц алюминия (рис. 8) в верхней части реактора SP-2 соответствует диапазону от 3500 до $4000\ \text{K}$ как во время, так и после окончания СВЧ импульса.

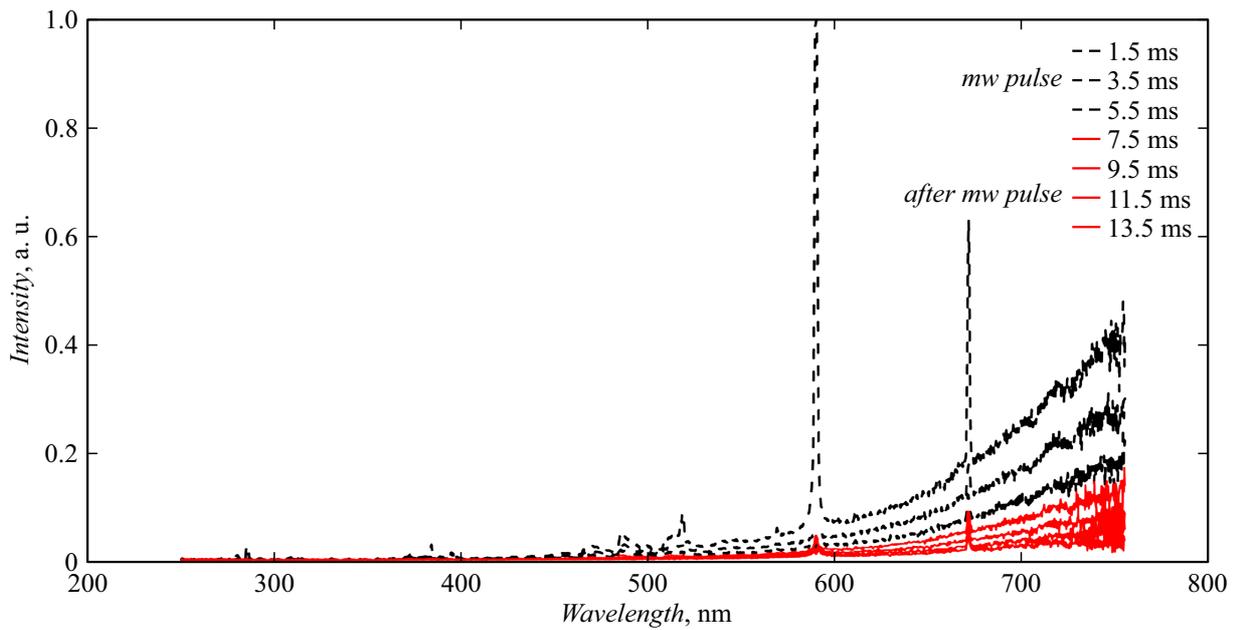


Рис. 6. Характерный спектр SP-1 с нижней части плазмохимического реактора.

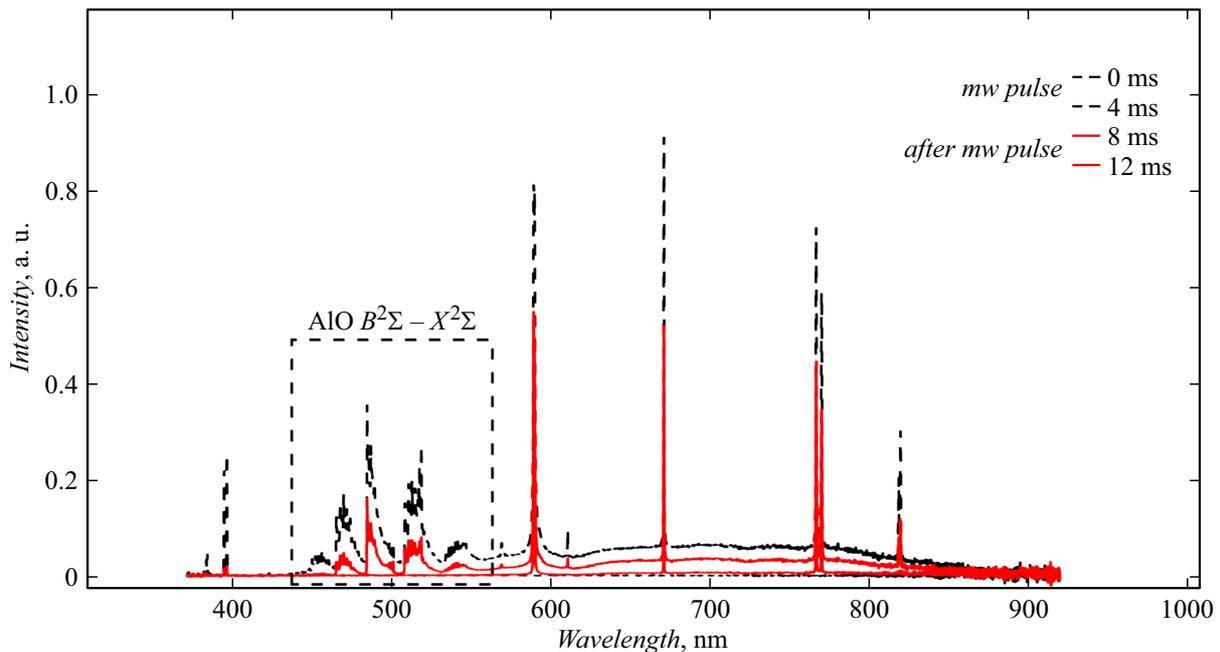


Рис. 7. Характерный спектр SP-2 с верхней части плазмохимического реактора.

Провзаимодействовавшие с разрядом частицы в отличие от исходных частиц состоят в основном либо из округлых частиц Al_2O_3 (рис. 9, *b, c*), либо агломератов микрочастиц оксида и металла (рис. 9, *a*). Размер металлических включений в агломератах составляет от 1 до $10\ \mu\text{m}$.

Поскольку в продуктах синтеза не было обнаружено металлических частиц вне агломератов, мы приходим к выводу, что практически все взлетающие частицы алюминия претерпевают воспламенение.

Характерными продуктами сгорания частиц алюминия являются полупрозрачные сферы (рис. 9, *b*), на поверхности которых также наблюдаются трещины в оксидной оболочке (рис. 9, *c*), размер таких частиц сопоставим с размером исходных частиц алюминия и составляет от 10 до $80\ \mu\text{m}$ (рис. 9, *b, c*).

Горение частиц является негативным фактором, влияющим на количество продуктов синтеза. При этом горение частиц является экзотермической реакцией, которая в свою очередь может вносить вклад в рас-

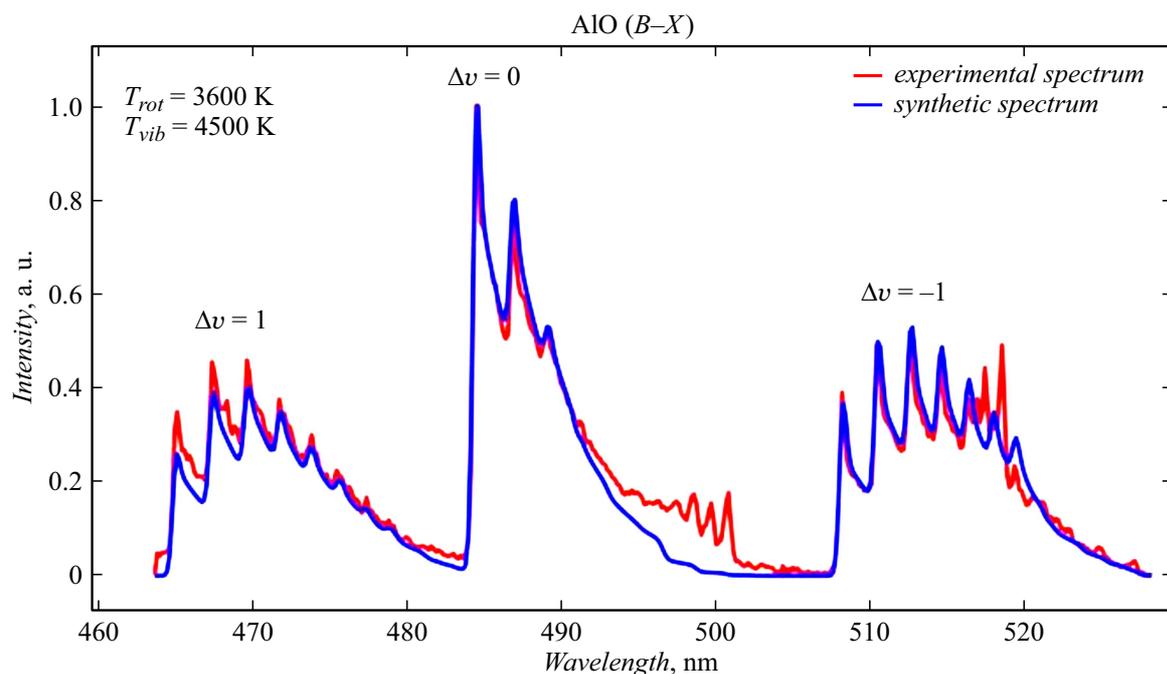


Рис. 8. Зарегистрированный и рассчитанный спектр излучения AlO с помощью SP-2 во время СВЧ разряда.

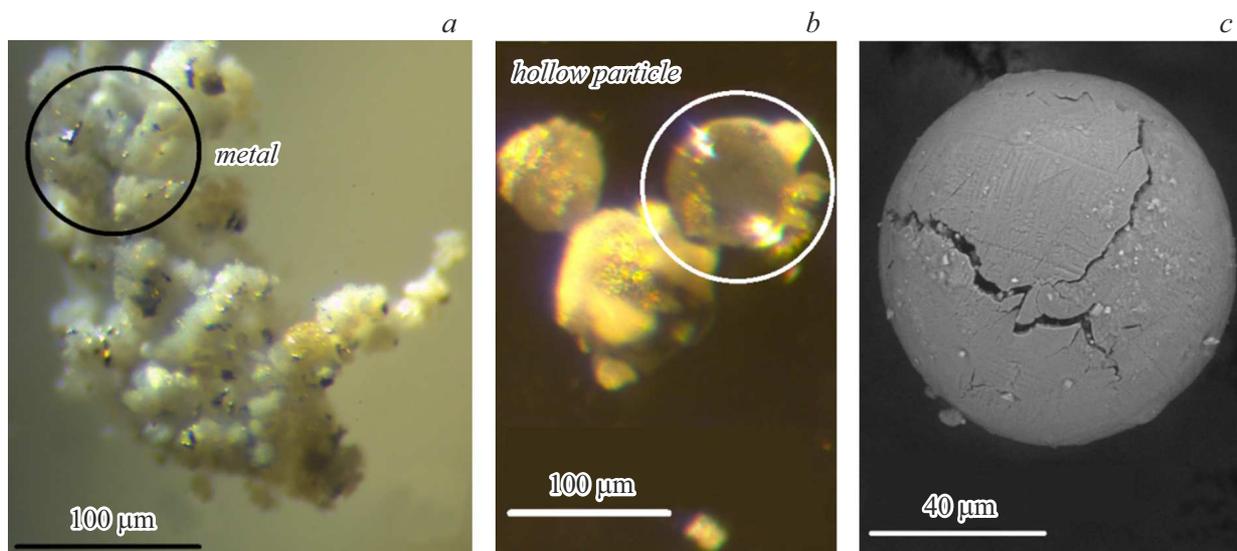


Рис. 9. *a* — оптическое изображение синтезированных частиц после проведения эксперимента; *b* — СЭМ изображение; *c* — оптическое изображение сгоревших частиц алюминия, обнаруженных в продуктах синтеза.

плавление металлических частиц для образования агломератов (рис. 9, *a*). Для того чтобы показать, что вкладываемая в плазменный разряд энергия достаточна для плавления частиц алюминия, проведем следующую оценку.

Удельная энергия, передаваемая СВЧ импульсом в течение 6 ns для пучка диаметром 50 mm составляет $E = 37.5 \text{ J/cm}^2$. Учтем, что поглощение СВЧ энергии в порошковой смеси мало, поскольку большую часть составляют частицы оксида алюминия.

Тогда вкладываемая в разряд мощность будет соответствовать мощности в СВЧ пучке. Для нагрева одной частицы алюминия диаметром $10 \mu\text{m}$ от 300 до 950 K с учетом постоянства плотности, теплоемкости и энергии фазового перехода при плавлении необходимо затратить количество энергии, равное $3 \cdot 10^{-6} \text{ J}$. Примем, что коэффициент преобразования микроволновой энергии в тепловую с помощью плазменного разряда соответствует 0.1 (данная величина выбрана на основании работ [15,16]), тогда в пересчете энергии СВЧ пучка

на сечение частицы получаем величину вкладываемой энергии, равной $1.8 \cdot 10^{-6}$ J, что по порядку величины соответствует необходимой энергии для полного плавления частицы алюминия.

Поскольку в нашем эксперименте наблюдается движение частиц, необходимо также оценить образование микрокапель металла на поверхности оксида в результате дробления крупных (более $10 \mu\text{m}$) капель алюминия при их вертикальном подъеме через соотношение между числом Вебера и Огнесорга. Вязкость и плотность для алюминия при температуре плавления 950 K можно взять из работы [17] для жидкой частицы алюминия диаметром $10 \mu\text{m}$ при движении в среде с температурой $T < T_{\text{mel}}$ со скоростью 5 m/s. Рассчитанное значения числа Вебера составляет $We \ll 1$ при числе Огнесорга $Oh = 0.004$. Следовательно, при движении большая капля испытывает лишь слабые деформации [18] (увеличение линейного размера менее чем на 5%) и не может разбиться на маленькие капли.

Фаза С (> 6 ms) характеризуется релаксацией процессов горения и радиационным охлаждением частиц в реакторе.

После СВЧ импульса интенсивность сигнала с фотодетектора экспоненциально убывает и составляет менее 10% от максимальной интенсивности на 14–20 ms после инициирования разряда. Это можно объяснить уменьшением фракции горящих частиц, в результате чего падает интенсивность молекулярных полос, что также подтверждается результатами спектрометра SP-2 (рис. 7). Время уменьшения сигнала фотодетектора, интенсивности молекулярных полос на SP-2 и интегральной интенсивности на кадрах высокоскоростной камеры соответствует временному диапазону от 10 до 20 ms.

Эти времена соответствуют длительности горения частиц алюминия с размером $10\text{--}100 \mu\text{m}$ в воздушной атмосфере, которое, согласно [9], составляет от 10 до 100 ms. Также стоит отметить, что в этот момент рассчитанная температура пламени имеет значение выше 3000 K, что также свидетельствует о том, что частицы продолжают горение в верхней части реактора. После 100 ms в верхней части реактора остаются только нагретые оксидные частицы, которые могут некоторое время висеть в объеме, осажаться на стенки кварцевого стакана, либо возвращаться на поверхность порошка, формируя новый верхний слой.

Заключение

Экспериментально исследован процесс взаимодействия СВЧ импульса гиротрона со смесью порошков Al/Al₂O₃ при нормальных условиях в воздушной атмосфере. Рассмотрены все стадии развития этого процесса — от инициирования плазменного разряда до разлета частиц.

Был обнаружен эффект поджига микроразмерных частиц алюминия при взаимодействии с плазменным

разрядом. Показано, что условия поджига частиц в нашем эксперименте слабо влияют на температуру и длительность горения.

Продукты горения алюминия, которые после разлета возвращаются на поверхность, уменьшают количество исходного металла в порошковой смеси, что влияет на иницирование плазмохимического разряда за счет уменьшения количества металлических частиц.

Провзаимодействовавшие с СВЧ излучением частицы состоят в основном из более округлых по сравнению с исходными частицами Al₂O₃ ($10\text{--}80 \mu\text{m}$). Было показано, что среди них обнаружены характерные продукты сгорания алюминия в воздушной атмосфере, представляющие собой полые полупрозрачные сферы с наличием трещин в оксидной оболочке. Кроме этого, обнаружены крупные частицы (более $200 \mu\text{m}$) сложной формы оксида алюминия с расположенным на его поверхности микроразмерными включениями металлического алюминия (менее $10 \mu\text{m}$).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.P. Yasnó, R.F.K. Gunnewiek, R.H.G.A. Kiminami. Adv. Powder Technol., **30** (7), 1348 (2019). DOI: 10.1016/j.apt.2019.04.010
- [2] A. Goldstein, A. Goldenberg, Y. Yeshurun, M. Hefetz. J. Am. Ceram. Soc., **91** (12), 4141 (2008). DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02788.x
- [3] J.H. Kim, J.K. Kim, Y.C. Kang. Appl. Surf. Sci., **523**, 146470 (2020). DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146470
- [4] Y. Hu, H. Ding, C. Li. Particuology, **9** (5), 528 (2011). DOI: 10.1016/j.partic.2011.06.003
- [5] A.B. Haugen, I. Kumakiri, C. Simon, M.-A. Einarsrud. J. Europ. Ceramic Society, **31** (3), 291 (2011). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.10.006
- [6] N.S. Akhmadullina, N.N. Skvortsova, V.D. Stepakhin, E.M. Konchekov, A.A. Letunov, Y.F. Kargin, A.A. Konovalov, O.N. Shishilov. J. Phys.: Conf. Ser., **1347** (1), 012089 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1347/1/012089
- [7] G.M. Batanov, N.K. Berezhetskaya, V.D. Borzosekov, L.D. Iskhakova, L.V. Kolik, E.M. Konchekov, A.A. Letunov, D.V. Malakhov, F.O. Milovich, E.A. Obratsova, E.D. Obratsova, A.E. Petrov, K.A. Sarksyian, N.N. Skvortsova, V.D. Stepakhin, N.K. Kharchev. Plasma Phys. Rep., **39**, 843 (2013). DOI: 10.1134/S1063780X13100024
- [8] G.M. Batanov, N.K. Berezhetskaya, I.A. Kossyi, A.N. Magunov, V.P. Silakov. Eur. Phys. J. Appl. Phys., **26** (1), 11 (2004). DOI: 10.1051/epjap:2004016
- [9] M.W. Beckstead. Fizika Goreniya i Vzryva, **41** (5), 55 (2005). DOI: 10.1007/s10573-005-0067-2 [in Russian]
- [10] A.N. Magunov. Nauchnoe Priborostroenie, **20** (3), 22 (2010). [in Russian].
- [11] E.V. Voronova, A.V. Knyazev, A.A. Letunov, V.P. Logvinenko, N.N. Skvortsova, V.D. Stepakhin. Phys. Atom. Nucl., **84** (10), 1761 (2021). DOI: 10.1134/S1063778821090374

- [12] S. Acquaviva, *Spectrochim. Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **60** (8–9), 2079 (2004).
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2003.10.040>.
- [13] X. Bai, V. Motto-Ros, W. Lei, L. Zheng, J. Yu, *Spectrochim. Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **99**, 193 (2014).
DOI: 10.1016/j.sab.2014.07.004
- [14] P. Puri, V. Yang. *J. Phys. Chem. C.*, **111** (32), 11776 (2007).
DOI: 10.1021/jp0724774
- [15] Г.А. Аскарьян, Г.М. Батанов, И.А. Косский. *Письма в ЖТФ*, **15** (8), 18 (1989).
- [16] Г.А. Аскарьян, Г.М. Батанов, Н.К. Бережецкая, С.И. Грицинин, И.А. Косский, И.М. Раевский. *Письма в ЖЭТФ*, **29**, 706 (1979).
- [17] M.J. Assael, K. Kakosimos, R.M. Banish, J. Brillo, I. Egry, R. Brooks, P.N. Quested, K.C. Mills, A. Nagashima, Y. Sato, W.A. Wakeham. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **35**, 285 (2006).
DOI: 10.1063/1.2149380
- [18] Z. Dai, G.M. Faeth. *Intern. J. Multiphase Flow*, **27**, 217 (2001). DOI: 10.1016/S0301-9322(00)00015-X