
**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ
ПЛАЗМА**

УДК 533.9;537.521.7;533.924

МИКРОВОЛНОВЫЙ РАЗРЯД В ГАЗЕ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ РЕГОЛИТА

© 2022 г. Г. М. Батанов^а, В. Д. Борзосекон^а, Е. В. Воронова^а, В. В. Качмар^{а, *},
Л. В. Колик^а, Е. М. Кончечков^а, А. А. Летунов^а, Д. В. Малахов^а, А. Е. Петров^а,
К. А. Сарксян^а, Н. Н. Скворцова^а, В. Д. Степахин^а, Н. К. Харчев^а

^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*e-mail: vv.kachmar@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 15.12.2021 г.

После доработки 10.01.2022 г.

Принята к публикации 10.01.2022 г.

Слой порошка реголита с содержанием Al 1.35% облучали в реакторе со стороны подложки микроволновым импульсом с интенсивностью $10\text{--}15\text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (длина волны 4 мм) и длительностью 1.5 мс и 3.5 мс. В реакторе создавалось разрежение воздуха ~ 76 Торр. Возникновение разряда в воздухе происходило при превышении отношения $E_0/N_0 = 1.03 \times 10^{-15}\text{ В} \cdot \text{см}^2$ (E_0 – поле на оси реактора, N_0 – концентрация молекул воздуха). Разряд по поверхности реголита возникал только при микроволновом пробое воздуха с задержкой более 200 мкс. При этом возникает испарение частиц реголита и их разлет в объем реактора. Установлено, что при увеличении микроволнового импульса до 3.5 мс возникает длительное искрение частиц реголита. Это может быть объяснено выделением энергии при протекании реакции $2\text{Al} + 3\text{FeO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Fe}$, инициированной испарением окисла железа при совместном действии микроволновой энергии и УФ-излучения разряда в воздухе.

Ключевые слова: микроволновый разряд, гиротрон, реголит, экзотермические реакции

DOI: 10.31857/S0367292122040035

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность создать микроволновый разряд внутри порошка, в его порах была показана в [1] для смеси порошков диэлектриков и металлов. Инициация микроволнового разряда в таких смесях происходит по свободной поверхности частиц в контакте металл-диэлектрик. Порог пробоя не зависит от давления окружающего газа и происходит при плотности энергии в импульсе $\approx 0.1\text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ и интенсивности микроволн выше $1\text{--}3\text{ кВт см}^{-2}$ [2]. В [3] было предложено использовать такой разряд для моделирования процессов взаимодействия микрометеоров с реголитом. В основе этого предложения лежат два механизма выделения энергии в порошковых частицах. Первый из них – это микроволновый пробой в контакте металл-диэлектрик, сопровождающийся испарением частиц порошка как металла, так и диэлектрика [4]. Второй механизм – это инициация экзотермических реакций между частицами порошка при их нагреве при микроволновом пробое [5, 6]. При моделировании воздействия микрометеоритов на порошок реголита при составах порошков, обычно использовавшихся при атмосферном давлении, существенное влияние на протекающие в реголите процессы может оказывать высокая концентрация металлического

порошка и плотность окружающего воздуха. Поэтому представляет интерес максимально понизить концентрацию металлической фазы и давления воздуха, сохраняя энергию, вкладываемую от микроволнового разряда. Это возможно сделать, используя одновременное воздействие на реголит микроволн и УФ-излучения, создающего в частицах порошка наведенную проводимость [7]. В настоящей работе изучается микроволновый разряд в реголите при 10-кратном (по сравнению с нормальной воздушной атмосферой) понижении давления воздуха, инициируемый микроволновым пробоем воздуха у поверхности порошка. При этом использован состав с понижением концентрации металлической фазы до 1%.

Исследование инициации разряда над поверхностью реголита является частью комплексных экспериментов по моделированию лунных условий в лаборатории [8–10]. Подобные работы ведутся в настоящее время во многих исследовательских центрах [например, 11–15] в связи с реализацией лунных программ по всему миру.

2. УСЛОВИЯ И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент выполняется в реакторе, описание которого дано в [16, 17]. Расположение реги-

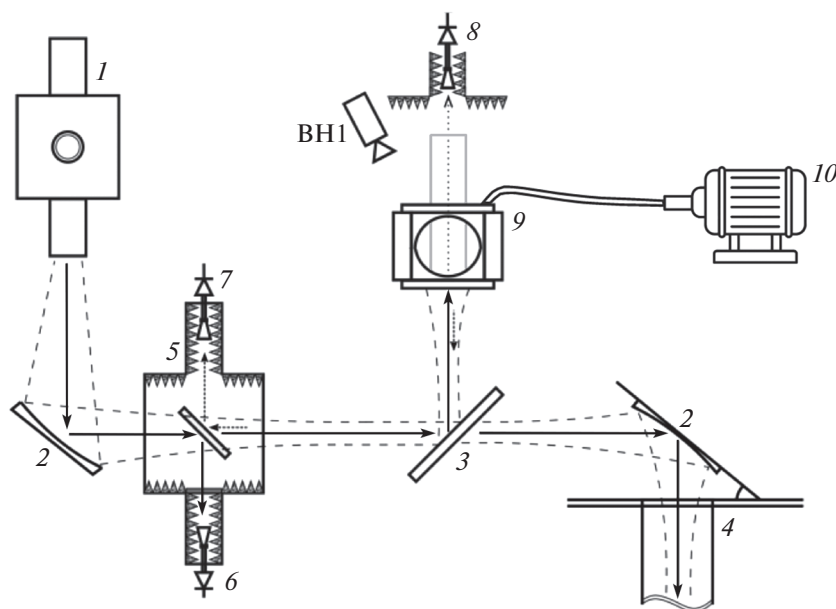


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – гиротрон, 2, 3 – система зеркал, 4 – поточный калориметр, 5 – квазиоптический ответвитель, 6–8 – детекторы падающего, отраженного и прошедшего излучения, 9 – плазмохимический реактор, 10 – вакуумный насос, ВН1 – высокоскоростная камера.

стрирующей аппаратуры приведено на рис. 1. Микроволновые измерения прямого и отраженного излучения были выполнены с помощью квазиоптического ответвителя [18], а прошедшее через реактор излучение регистрировалось с помощью коллимированного детектора, расположенного на оси реактора на удалении ≈ 60 см от него. Порошок реголита толщиной 0.1–0.3 мм насыпной плотности равномерно покрывал кварцевую пластину реактора. Состав реголита: 49.45% SiO_2 , 12.16% Al_2O_3 , 1.35% Al, 0.63% TiO_2 , 8.7% FeO, 10.8% MgO, 16.92% CaO.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены сигналы прямого, отраженного и прошедшего через реактор излучения микроволнового импульса. По сигналу прошедшего излучения видно, что пробой воздуха происходит на переднем фронте микроволнового импульса при достижении максимума мощности. По сигналу отраженного излучения видно, что задержка в формировании разряда составляет ≈ 200 мкс. Мощности 200 кВт соответствует интенсивность излучения на оси реактора ≈ 10 кВт см $^{-2}$. При давлении 76 Торр, полученном при непрерывной откачке реактора, такой интенсивности соответствует величина параметра $E_0/N_0 = 1.03 \times 10^{-15}$ В · см 2 , где E_0 – поле на оси реактора, N_0 – концентрация молекул воздуха. При этой интенсивности микроволнового излучения

10 кВт · см $^{-2}$ пробоя ни по поверхности порошка, ни в объеме не происходит. При увеличении мощности до 250 кВт, что соответствует интенсивности ≈ 13 кВт · см $^{-2}$ и $E_0/N_0 = 1.16 \times 10^{-15}$ В · см 2 происходит пробой воздуха в объеме реактора и разряд контактирует с поверхностью порошка.

Последовательные кадры видеокамеры приведены на рис. 3 при длительности микроволнового излучения 1.5 мс. На первом кадре регистрируется слабое однородное диффузное свечение плазмы микроволнового пробоя в воздухе. Такой вид свечения характерен для импульсных микроволновых разрядов в разреженном воздухе при давлениях 10–100 Торр [19]. На втором кадре регистрируется яркая вспышка свечения с интенсивностью, при которой происходит перегрузка приемников видеокамеры. В третьем кадре регистрируется яркое свечение всей поверхности порошка и отдельные яркие точки свечения отдельных частиц, улетевших с поверхности и из объема кварцевого цилиндра. Четвертый и пятый кадры демонстрируют затухающее свечение вылетевших с поверхности порошка пылинок. Поскольку длительность экспозиции каждого кадра 200 мкс, то собственно микроволновый разряд при воздействии микроволнового излучения протекает только за время продолжительности первого кадра видеокамеры (4 мс), т.е. на первом кадре видеокамера регистрирует только свечение пробоя воздуха в микроволновом поле. Все последующие фото сделаны после окончания микроволнового импульса. Таким образом, фиксируемое на вто-

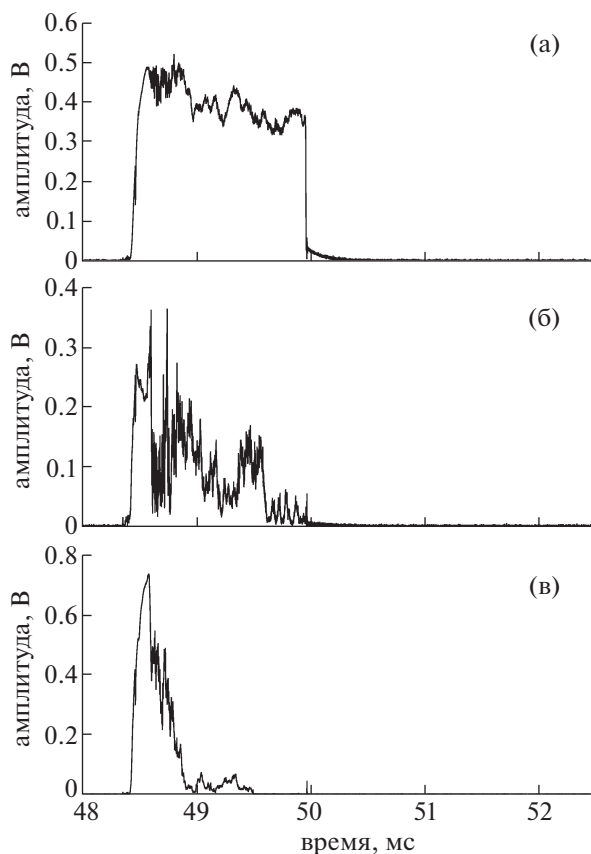


Рис. 2. Детектированные сигналы микроволнового излучения: а) прямого (“падающего”), б) отраженного и в) прошедшего через реактор излучения в импульсе 57252. Мощность излучения гиротрона 250 кВт.

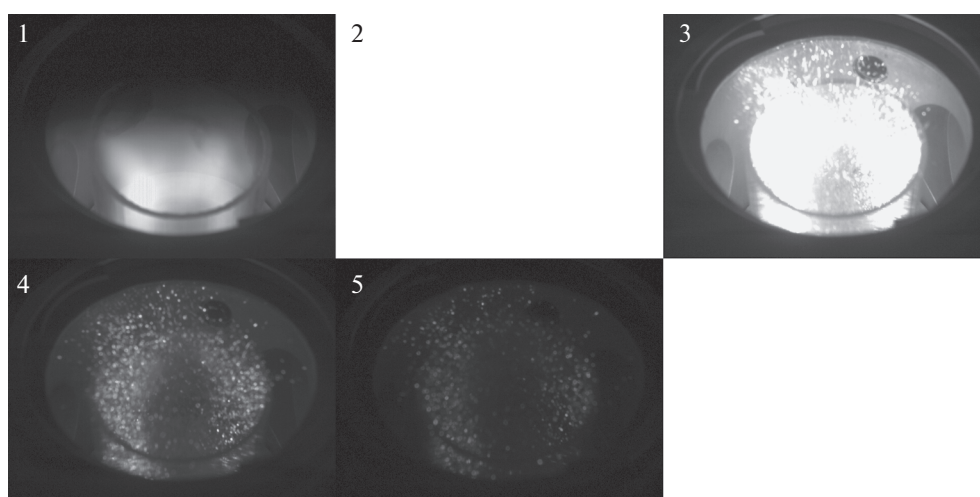


Рис. 3. Последовательные кадры свечения разряда в том же импульсе, что и на рис. 2. Мощность микроволнового излучения гиротрона 250 кВт, длительность импульса 1.5 мс. Время экспозиции кадра 200 мкс, частота повторения 250 Гц.

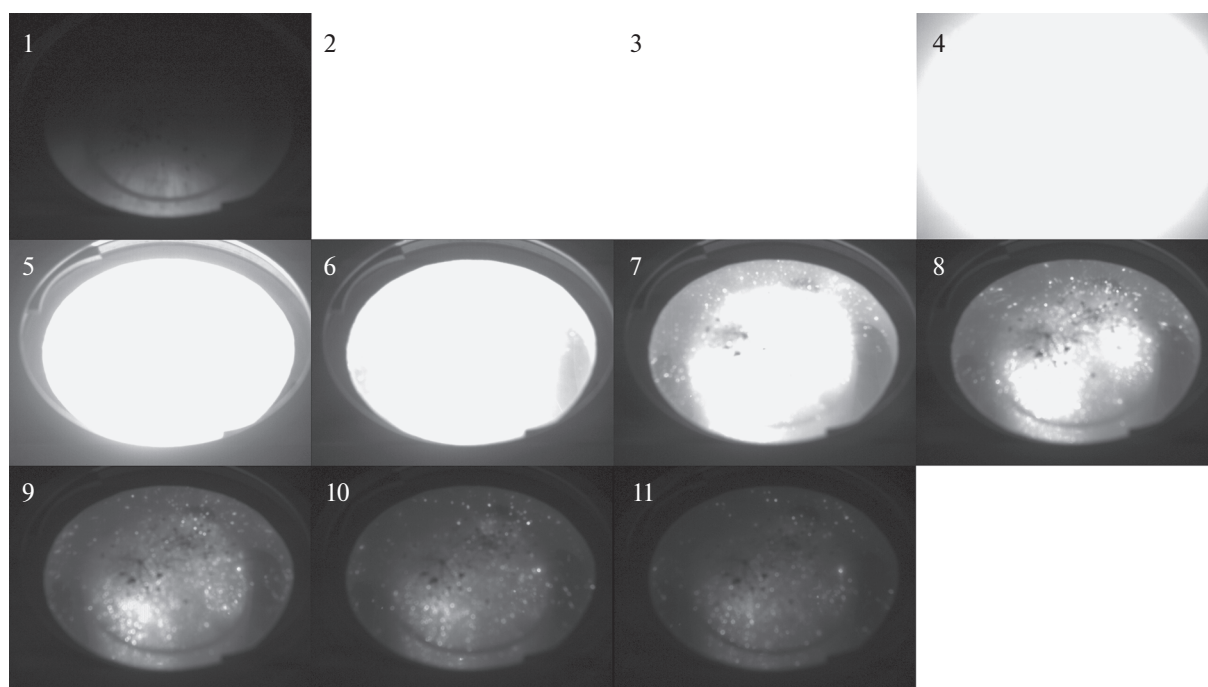
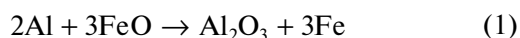


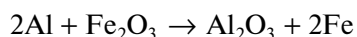
Рис. 4. Последовательные кадры свечения разряда в импульсе 57257. Мощность микроволнового излучения гиротрона 250 кВт, длительность импульса 3.5 мс. Время экспозиции кадра 200 мкс, частота повторения 250 Гц.

ром кадре яркое свечение — это выделение энергии, сопровождающее разряд на поверхности порошка, который инициируется СВЧ-импульсом и разрядом в газе. Яркое свечение на втором кадре видекамеры, т.е. спустя 2.5 мс после окончания микроволнового импульса, свидетельствует также об инициации в порошковом слое экзотермической реакции между частицами порошка. Увеличение длительности импульса микроволнового излучения до 3.5 мс увеличивает длительность протекания реакций в порошковом слое до более чем 2.4 мс. Ослабление свечения поверхности происходит лишь после 7 кадра (22 мс). При этом сохраняется свечение отдельных пылинок (рис. 4), т.е. протекание реакций на поверхности сопровождается эмиссией пылинок в объем реактора.

В качестве реакции, инициированной в порошковом слое, может быть рассмотрена реакция окисла железа с алюминием



Инициация данной реакции могла бы возникать и при микроволновом пробое контакта крупинки Al с крупинками FeO аналогично тому, как это имело место в [6] при инициации реакции



По-видимому, разгоранию такого процесса без разряда в воздухе препятствует низкая концентрация в реголите Al. Действительно, при мощности в 200 кВт, когда пробой в разреженном воздухе отсутствует, отсутствуют и испарения на поверхности порошка. Инициация реакции (1) возможна при нагреве и испарении FeO, когда пары окисла заполняют поры и омывают поверхность. В этом случае оказывается возможен контакт паров FeO с крупинками Al. Нагрев и испарение крупинки FeO возможно за счет поглощения энергии микроволн в случае возникновения в крупинках FeO наведенной проводимости, созданной УФ-излучением микроволнового разряда в воздухе. Поскольку теплопроводностным оттоком тепла от отдельных крупинок можно пренебречь, то при интенсивности излучения $12.5 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$ возможно повышение проводимости до $10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, удельное энерговыделение при размере крупинки 10^{-4} см и длительности разряда 1 мс составит $\approx 250 \text{ кДж} \cdot \text{см}^{-3}$, что вполне достаточно для сублимации микронных крупинок по всему сечению микроволнового пучка.

Остановимся теперь на динамике разряда в течение длительности микроволнового импульса (рис. 5). В отсутствие разряда сигнал прошедшего излучения повторяет форму сигнала прямой мощности гиротрона. При пробое на переднем фронте сигнал прошедшего излучения сначала достигает своего максимального значения, а за-

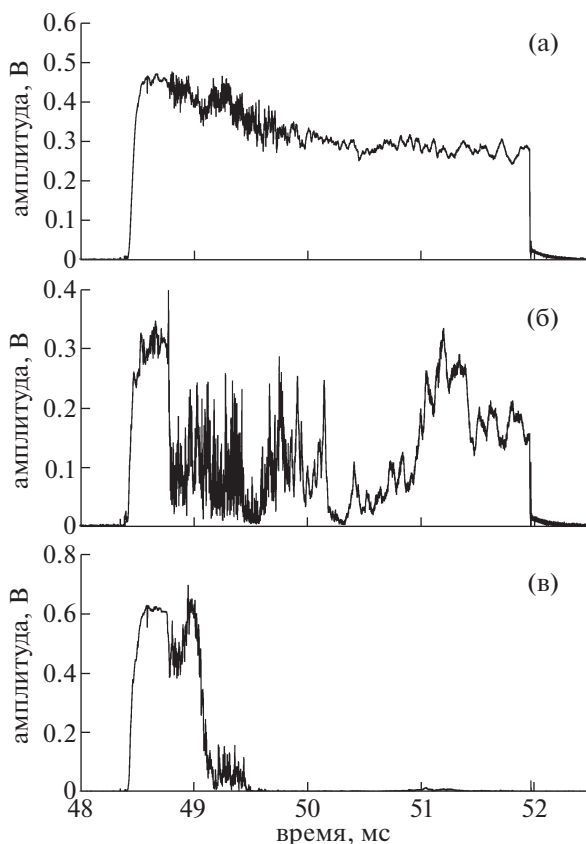


Рис. 5. Сигналы: а) прямого, б) отраженного и в) прошедшего через реактор микроволнового излучения в том же импульсе, что и на рис. 4. Мощность микроволнового излучения гиротрона 250 кВт, длительность импульса 3.5 мс.

тем происходит быстрое падение его уровня, вызванное поглощением в разряде. Далее следует новый короткий всплеск и падение до нуля за 0.5 мс.

В сигнале отраженного микроволнового излучения первому всплеску прошедшего излучения соответствует пик, повторяющий сигнал в отсутствие пробоя. Затем следует провал, аналогичный провалу в сигнале прошедшего излучения. Далее за плавным падением сигнала прошедшего излучения следуют высокочастотные колебания сигнала отраженного излучения, последующий провал уровня и возрастание до начального уровня.

Такая эволюция сигналов прошедшего и отраженного излучения может быть объяснена следующей картиной развития разряда. Падение уровня сигнала прошедшего излучения за передним фронтом импульса возникает в результате возникновения волны пробоя в воздухе внутри реактора и роста концентрации плазмы. Пробой происходит в расходящемся пучке микроволн, когда максимальная напряженность поля находится на поверхности порошка. Вследствие этого, и максимальная скорость роста плазмы наблюдается вблизи поверхности порошка.

Колебания сигнала отраженного микроволнового излучения вызваны изменением уровня отраженного излучения и его фазы. Поскольку пики отраженного сигнала остаются примерно одного уровня, то основные колебания его уровня вызваны изменением фазы. Уровень отраженного микроволнового излучения является результатом интерференции отражения от входного окна, слоя порошка и выходного окна реактора. Изменение фазы происходит за счет изменения оптической толщины плазмы при пробое газа.

Уровень сигнала прошедшего микроволнового излучения не зависит от фазы волны, прошедшей через реактор, и определяется поглощением и отражением. Таким образом, отсутствие сигнала прошедшего излучения после 1.0 мс от фронта означает полное поглощение микроволнового излучения в разряде как в присутствии сигнала отраженного излучения, так и при его нулевом значении.

Увеличение длительности микроволнового импульса до 3.5 мс не приводит к росту уровня прошедшего излучения (рис. 5). Однако спустя 1.5 мс исчезают быстрые осцилляции сигнала отраженного излучения и происходит медленное

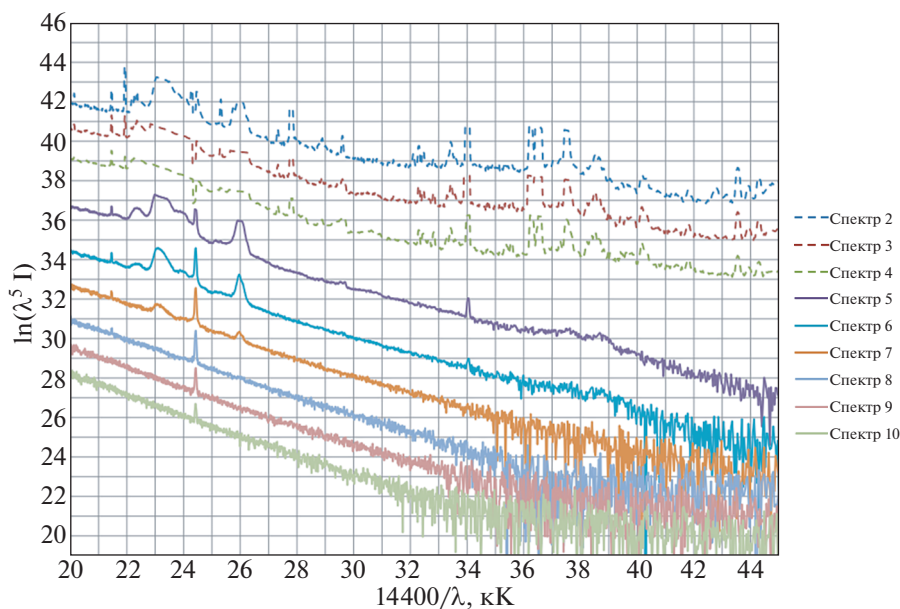
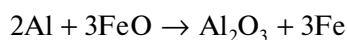


Рис. 6. Спектры излучения плазмы в виновских координатах для импульса 57256. Свечение зарегистрировано через 1.9 (спектр 2), 3 (спектр 3), 4.1 (спектр 4), 5.2 (спектр 5), 6.3 (спектр 6), 7.4 (спектр 7), 8.5 (спектр 8), 9.6 (спектр 9) и 10.7 (спектр 10) мс после включения микроволнового импульса гиротрона.

изменение отраженного сигнала к концу разряда. Этот интервал времени медленных изменений отраженного сигнала можно приписать протекающей разряда внутри порошкового слоя.

Итак, максимальное время нагрева порошка составляет длительность импульса за вычетом длительности ненулевого значения прошедшего сигнала. При длительности импульса 1.5 мс это время составляет 0.5–1.0 мс, а при длительности 3.5 мс время нагрева возрастает до 2.5–3.25 мс. При этом длительность интенсивного свечения порошка растет от 4–8 мс до 24–28 мс. Поскольку процесс нагрева предшествует свечению порошка и возникающих при разряде паров, то можно сделать вывод, что увеличение длительности свечения определяется увеличением количества испаренного окисла FeO, если скорость расхождения образованного пара слабо меняется во времени.

Измерения оптических спектров свечения разряда позволяют сделать некоторые заключения о временной эволюции протекания реакции



На рис. 6 приведены спектры свечения в координатах Вина [20], измеренные с помощью спектрометра AvaSpec-2048. Излучение регистрировалось со стороны входного радио прозрачного окна реактора. Как видно на рис. 6, при длительности импульса 3.5 мс отдельные спектральные линии и полосы регистрируются на фоне континуума только в первые 4 мс. Причем из-за низкой интенсивности свечения не удается зарегистрировать спектр континуума в течение первой мс. Не удастся также построить спектр континуума и при длительности микроволнового импульса 1.5 мс, когда свечение поверхности сохраняется только на третьем кадре, т.е. не более 8 мс (рис. 3).

Так как в спектре свечения порошка, контактирующего с кварцевой подложкой, регистрируются отдельные спектральные линии и полосы, то можно сделать заключение, что в течение первой мс разряд уже распространяется на всю толщину слоя реголита.

Интенсивные спектральные полосы в течение четырех мс от фронта импульса затрудняют определение температуры по спектру континуума. Однако нетрудно видеть (рис. 6), что в течение второй мс в длинноволновой части спектра ($T < 30$ кК) температура превышает 3 кК, в то время как в коротковолновой ($T > 35$ кК) лежит около 10 кК. Для 4-й мс, т.е. спустя 0.5 мс после включения микроволнового импульса, оценка температуры по длинноволновой части континуума дает значение ~ 3 кК, а по коротковолновой — ~ 6 кК. В пятом спектре свечение спектральных линий и полос практически отсутствует и спектр континуума описывается одной спектральной температурой в 2.5 кК во всем спектральном диапазоне измерений. Эта величина температуры слабо падает еще 4–6 мс (до 2.2 кК). Столь медленное спадание температуры свидетельствует о продолжении энерговыделения в порошке. Тем

не менее, процесс горения затухает и не переходит в процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), как это часто имеет место в случае уплотненных порошков стехиометрического состава [4, 5].

Последовательное повторение разрядов друг за другом с интервалом ~ 1 мкс между ними демонстрирует повторяемость картины свечения и эволюции температуры. Эта повторяемость процесса от импульса к импульсу означает слабое истощение количества реагентов, вступающих в реакцию.

Увеличение продолжительности высвечивания реакций, протекающих в реголите при увеличении длительности микроволнового импульса, т.е. при увеличении энерговыделения и, как следствие, количества испаренного вещества, свидетельствуют о том, что дополнительный нагрев за счет процесса горения пропорционален энерговыделению микроволнового излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Десятикратное понижение давления воздуха, окружающего порошок реголита, позволяет инициировать в реголите с низким содержанием (1.35%) порошка Al процесс энерговыделения с помощью микроволнового пробоя воздуха у поверхности реголита при интенсивности микроволн больше $10 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$ и длительности импульсов более 1 мс. Таким процессом, по-видимому, является реакция $2\text{Al} + 3\text{FeO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Fe}$, возникающая при испарении окисла железа, заполняющего поры и поверхность реголита. Испарение частиц окисла происходит в результате их нагрева микроволновым излучением при возникновении наведенной проводимости, вызванной УФ-излучением разряда в воздухе.

Инициация высокотемпературной реакции с выделением тепла происходит с задержкой ≈ 1 мс относительно импульсного микроволнового нагрева окислов, входящих в состав реголита. А продолжительность нагрева порошка и его испарения за счет экзотермической реакции определяется количеством испаренного окисла железа во время воздействия микроволнового излучения на порошок.

Однородность диффузного свечения волны пробоя, по-видимому, свидетельствует об отсутствии кулоновского взрыва при контакте плазмы волны пробоя с поверхностью порошка.

Яркие точки свечения на поверхности и в объеме реактора в период интенсивного свечения и релаксации свечения реголита свидетельствуют о локальных взрывных процессах на поверхности с выбросом отдельных частиц порошка.

Для моделирования воздействия на поверхность солнечных батарей и другой аппаратуры распыления реголита при ударе микрометеоритов могут быть использованы оба процесса импульсного нагрева реголита микроволновым излучением при возбуждении волны пробоя в газе: и процесс испарения во время микроволнового импульса в порошках без примеси порошка металла, и процесс испарения за счет инициации реакций с участием частиц порошка металла. При этом во втором случае длительность испарения возрастает на время протекания экзотермических реакций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Косый И.А., Магунов А.Н., Силаков В.П. // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 7. С. 119.
2. Batanov G.M., Berezhetskaya N.R., Kosy I.A., Magunov A.N., Silakov V.P. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2004. V. 26. № 1. P. 11.
3. Скворцова Н.Н., Майоров С.А., Малахов Д.В., Степанхин В.Д., Образцова Е.А., Кенжебекова А.И., Шилилов О.Н. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 109. № 7–8. С. 452.
4. Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Косый И.А., Магунов А.Н. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 6. С. 571.
5. Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Копьев В.А., Косый И.А., Магунов А.Н., Щербаков В.А., Сачкова Н.В. // ДАН. 2006. Т. 407. № 6. С. 752.
6. Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Косый И.А., Магунов А.Н. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 6. С. 571.
7. Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Косый И.А., Магунов А.Н. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 12. С. 76.
8. Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Sorokin A.A., Malakhov D.V., Gusein-zade N.G., Akhmadullina N.S., Borzosekov V.D., Voronova E.V., Shishilov O.N. // Materials. 2021. V. 14. № 21. P. 6472.
9. Kachmar V.V., Moshkina K.G., Borzosekov V.D., Sorokin A.A., Skvortsova N.N. // J. Phys.: Conf. Ser. V. 2036. P. 012030.
10. Качмар В.В., Мошкина К.Г., Борзосеков В.Д., Скворцова Н.Н., Сорокин А.А. // Прикладная физика и математика. 2021. № 3. С. 11.
11. Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хораны М. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105 № 12. С. 594.
12. Семкин Н.Д., Видманов А.С. // Вестник СГАУ. 2013. № 2(40). С. 164.
13. Hood N., Carroll A., Wang X., Horanyi M. // Icarus. 2022. V. 371. № 114684.
14. Shu A., Collette A., Drake K., Grün E., Horanyi M., Kempf S., Mocker A., Munsat T., Northway P., Srana R., Sternovsky Z., Thomas E. // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. № 075108.

15. Tang H., Wang S., Li X. // Planet. Space Sci. 2012. V. 60. № 1. P. 322.
16. Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Kharchev N.K., Kolik L.V., Konchekov E.M., Letunov A.A., Malakhov D.V., Obraztsova E.A., Obraztsova E.D., Petrov A.E., Sarkisian K.A., Skvortsova N.N., Stepankhin V.D., Vasileva E.A., Iskhakova L.D., Zolotukhin A.N. // JNO. 2013. V. 8. № 1. P. 58.
17. Батанов Г.М., Колик Л.В., Харчев Н.К., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Борзосеков В.Д., Малахов Д.В., Кончечков Е.М., Степахин В.Д., Косый И.А., Щербачев И.А. Способ получения нанодисперсных порошков нитрида бора и диборида титана. Патент на изобретение RU 2523471 С1, 20.07.2014. Заявка № 2013102266/05 от 18.01.2013.
18. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Инженерная физика. 2013. № 10. С. 56.
19. Вихарев А.Л., Гильденбург В.Б., Ким А.В., Литвак А.Г., Семенов В.Е. / Под ред. А.Г. Литвака. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. С. 41.
20. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.