Письма в ЖЭТФ, том 106, вып. 4, с. 240 – 246

Инициация пылевых структур в цепных реакциях под воздействием излучения гиротрона на смесь порошков металла и диэлектрика с открытой границей

Н. Н. Скворцова[a,b,c1)], *Д. В. Малахов*[a,b,d], *В. Д. Степахин*[a,d], *С. А. Майоров*[a], *Г. М. Батанов*[a], *В. Д. Борозосеков*[a,d], *Е. М. Кончеков*[a,d], *Л. В. Колик*[a], *А. А. Летунов*[a], *Е. А. Образцова*[a,b], *А. Е. Петров*[a,d], *Д. О. Поздняков*[b], *К. А. Сарксян*[a], *А. А. Сорокин*[e], *Г. В. Укрюков*[b], *Н. К. Харчев*[a]

[a] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

[b] *Московский технологический университет "МИРЭА", 119454 Москва, Россия*

[c] *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Москва, Россия*

[d] *Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, 117997 Москва, Россия*

[e] *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия*

Поступила в редакцию 31 мая 2017 г.

После переработки 4 июля 2017 г.

Представлено описание пылевой плазмы, образующейся в цепных экзотермических реакциях, инициируемых излучением мощного гиротрона в смесях порошков металла и диэлектрика. В экспериментах был обнаружен колебательный характер таких цепных реакций и появление пылевых частиц на первой (взрывной) стадии. Измерены свойства пылевых частиц – треки, скорости, размеры. Обнаружено, что после выключения гиротрона в реакторе на фоне развития имических реакций возникают ансамбли пылевых частиц, время существования которых на 3–4 порядка превышает длительность импульса сверхвысокочастотного излучения. Квазистационарное состояние низкотемпературной плазмы с заряженными макрочастицами возникает в результате химического разогрева смеси в реакторе и термофореза. Показано, что пылевые частицы необходимы как очаги кристаллизации при создании (или осаждении) сложных композитов веществ нано и микроразмеров, возникающих во вторичном плазмохимическом синтезе.

DOI: 10.7868/S0370274X17160111

1. Введение. Плазменные методы, среди которых искровой, дуговой, тлеющий, высокочастотный, микроволновый и другие разряды, являются одними из наиболее привлекательных и широко используемых для синтеза, модификации и обработки микро- и наноструктур. Однако, до настоящего времени излучение гиротрона, являющегося одним из наиболее мощных источников микроволновых разрядов, не было использовано для синтеза веществ. Ранее нами был предложен новый подход к синтезу веществ в сильнонеравновесных условиях развития во времени всех фаз микроволнового разряда, инициированного гиротроном в смесях порошков металла и диэлектрика [1]. Для этого были проведены эксперименты с подводом сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения гиротрона снизу на смесь порошков, размещенной на пластине в реакторе; верхняя граница смеси оставалась открытой. С этой границы, порошок–газ, возможен режим свободного разлета исходных веществ, а также плазмы и продуктов реакций в объем реактора, с дальнейшим участием веществ в химических реакциях и закалки вторичных продуктов.

Нами было продемонстрировано, что для синтеза новых веществ необходимо развитие неравновесных процессов в реакторе после выключения гиротрона. Оказалось, что в таких условиях взвесь пылевых частиц является важным компонентом синтеза композитов микро- и наноразмеров [2, 3].

Данная работа посвящена наблюдению, исследованию и анализу неравновесных процессов. Показано, что на первой стадии СВЧ-разряда с границы порошок–газ заряженные пылевые частицы инжектируются в объем реактора. После выключения импульса гиротрона в объеме реактора образуются плазменно-пылевые структуры. Нами представлено описание неравновесной плазмы, формируемой по-

1)e-mail: nina@fpl.gpi.ru, mukudori@mail.ru

сле окончания импульса СВЧ гиротрона в результате развития цепных экзотермических реакций, из-за которых первоначально появляющиеся продукты принимают участие в образовании новых продуктов. В эксперименте показано, что процесс проходит три характерные для цепных реакций стадии [4, 5]: зарождения (инициирования), развития и обрыва цепи.

Известно инициирование цепных реакций различными источниками – светом, ядерным излучением, термической (тепловой) энергией, анионами или катализаторами [6]. Например, цепная реакция молекулярного хлора Cl_2 с молекулярным водородом H_2 инициируется светом, при этом поглощение одного фотона вызывает превращения сотен тысяч молекул по следующему механизму:

$$\begin{gathered} Cl_2 + hv \to Cl_2^* \\ Cl_2^* \to Cl\cdot + Cl\cdot \\ Cl\cdot + H_2 \to HCl + H\cdot \\ H\cdot + Cl_2 \to HCl + Cl\cdot \end{gathered}$$

Как можно видеть, на каждой из стадий образования хлороводорода радикальная частица воспроизводится, поддерживая, тем самым, ход процесса. Другим характерным примером является реакция радикальной полимеризации олефинов [7].

В нашем эксперименте цепной процесс инициируется микроволновым излучением мощного гиротрона в смеси порошков с верхней поверхности смеси с границы порошок–газ и носит взрывной характер. На первой стадии происходит выброс частиц конденсированного вещества в объем реактора и образование интермедиатов (промежуточных продуктов) из нейтральных атомов, ионов и молекул порошков и газовой среды (азота, воздуха).

На следующей стадии, после выключения СВЧ-импульса гиротрона, промежуточные продукты реагируют с исходными реагентами, образуя новые интермедиаты и конечные продукты. Особенностью реализованного нами процесса синтеза является то, что стадия развития цепной реакции после выключения гиротрона многократно повторяется, приводя к образованию определенных, заданных исходными реагентами, конечных и промежуточных продуктов [3]. На этой стадии за счет экзотермических реакций происходит дополнительный нагрев веществ в реакторе, с образованием температурного градиента от поверхности порошка до верхней крышки реактора. В реакторе в течение времени, превышающего длительность импульса гиротрона на 3–4 порядка образуется низкотемпературная плазма с пылевыми частицами. При этом пылевые частицы частично сохраняют свой заряд [7] и, как мы предполагаем, являются очагами кристаллизации новых композитных материалов.

На третьей стадии процесса происходит прекращение цепной реакции с осаждением на стенки реактора сложных композитов веществ в виде частиц нано- и микроразмеров [8].

В статье детально исследованы свойства пылевой плазмы на трех стадиях цепной реакции, инициируемой излучением гиротрона в воздухе и азоте при атмосферном давлении. Рассмотрены смеси порошков металлов (молибден, вольфрам, титан и др.) и диэлектриков (бора, нитрида бора и др.). Показана роль пылевых частиц для формирования вторичных композитов микро- и наноразмеров в таких процессах.

2. Описание эксперимента и методов. Стенд для плазмохимических экспериментов создан с использованием одного из гиротронов комплекса МИГ-3 электронно-циклотронного нагрева плазмы стелларатора Л-2М [9].Для этого между двумя зеркалами квазиоптического тракта комплекса был расположен плазмохимический реактор с комплексом необходимых диагностик. Схема эксперимента и основных диагностик параметров разряда представлена на рис. 1. В реактор на нижнюю пластину помещают кварцевые цилиндры разной длины с держателями для металлических и диэлектрических пластин (рис. 1а). На подложке, служащей дном цилиндров, слоями толщиной 0.5...0.7 мм располагаются порошки диэлектрика и металла, верхняя поверхность порошков остается свободной.

Эксперименты проводили в смесях различных металлов и диэлектриков (Mo+B, W+B, Mo+BN, Ti+B, Ti+BN, Al+AlN, Mg+AlN, $Ti+KBF_4$ и др.) при атмосферном давлении в воздухе и азоте. Размеры частиц в смесях варьируются в широких пределах при средних размерах ~ 10 мкм: так использован порошок Mo с размером частиц от 1 до 40 мкм и средним размером 10–12 мкм; порошок B с частицами от 0.1 мкм до 25 мкм со средним размером 5–6 мкм, порошок BN с частицами от 0.5 до 40 мкм, со средним размером 10–12 мкм.

Излучение гиротрона с частотой 75 ГГц (длина волны 4 мм) подавали снизу через сфазированное кварцевое окно на смесь порошков. Образцы облучали одиночными импульсами. Временные интервалы между импульсами длительностью 2–12 мс составляли не менее 20 с. Мощность излучения гиротрона составляла 150–450 кВт, что соответствовало интенсивности в порошке 10–30 $кВт \cdot см^{-2}$. Пучок микроволн гауссовой формы с характерным радиу-

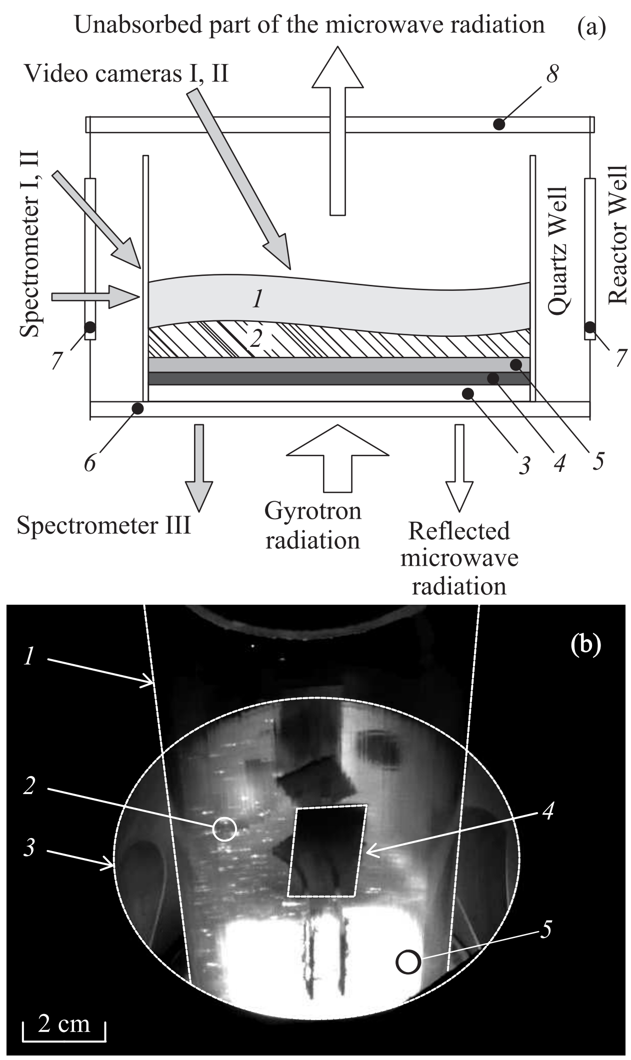

Рис. 1. (a) – Схема эксперимента.*1*, *2* – плазменный и газовые слои с частицами; *3*, *6*, *8* – кварцевые пластины; *4* – слой диэлектрика; *5* – слой порошков металла с диэлектриком; *7* – реакторные патрубки. Стрелками схематически показаны области приема излучения двумя видеокамерами (I, II) и тремя спектрометрами (I, II, III). (b) – Светящиеся частицы *2* над поверхностью порошка в реакторе после выключения гиротрона на фоне взрывного процесса в порошке (5). Стрелками показаны: *1* – стенка кварцевого цилиндра; *3* – стенка реактора; *4* – дополнительные пластины для сбора осажденных частиц. Смесь порошков Mo+B. Атмосфера. Энергия СВЧ-импульса равна 1200 Дж за 4 мс

сом 40 мм пронизывал объем реактора. Для поглощения излучения, не использованного при взаимодействии с порошком, на удалении 60 см за верхней кварцевой пластиной реактора были установлены керамические поглотители. На рис. 1a схематически показан образующийся над поверхностью порошка плазменно-газовый слой с пылевыми частицами, а также прошедшая через реактор непоглощенная часть микроволнового излучения. Полученные в результате протекания цепных реакций продукты вторичного синтеза осаждались на все внутренние поверхности, включая дополнительные пластины, показанные на рис.1b.

Для наблюдения эволюции свечения разряда и частиц во времени использовали две видеокамеры "Activecam AC-D1020" и "FastecImaging IN250M512". Вторая (с интервалом между кадрами 4 мс) была синхронизирована с тремя спектрометрами, по измерениям которых оценивается температура поверхности порошка, газа и плазмы [1, 3]. Изображения частиц, анализ их размеров и состава выполняли методами электронной микроскопии и рентгенофазового анализа [3, 10].

Полученные в результате синтеза материалы были проанализированы методами комбинационного рассеяния света и растровой электронной микроскопии. Для регистрации спектров комбинационного рассеяния был использован спектрометр Jobin-Yvon S-3000 с возможностью возбуждения в широком спектральном диапазоне. Изображения были получены с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss Merlin, оснащенного спектрометром для энергодисперсионного анализа и определения элементного состава образца.

3. Эволюция плазменных и химических процессов под воздействием излучения гиротрона на смеси порошков. Типичные характеристики нашего эксперимента: энергия в импульсе 60–120 Дж/см^2 за 2–10 мс. При превышении пороговых условий по плотности потока энергии и проценту металла в описанном выше реакторе осуществляется режим инициирования цепных реакций. В результате развиваются плазменные и химические процессы, формируются вторичные сложные композиты микро- и наноразмеров, состав которых определяется исходной смесью порошков и газом. Исходя из данных оптической спектроскопии и анализа продуктов синтеза мы подразделяем цепные реакции, протекающие после включения гиротрона на три основных стадии: инициирование, развитие и обрыв цепи.

Инициирование. Во время воздействия микроволнового излучения на смесь порошков видеокамеры сначала в течение 1–2 мс фиксируют отдельные центры слабого свечения на поверхности порошка (см. рис. 1). Мы это явление связываем с микропробоями на контактах металл–диэлектрик. Затем, еще до окончания импульса СВЧ-излучения, в реакторе наблюдается яркая вспышка с засветкой всех спектрометров и видеокамер (динамического диапазона работы всей аппаратуры недостаточно для одновременных измерений всех стадий процессов.). После окончания импульса СВЧ-излучения наблюдается медленное, по сравнению с его длительностью, примерно 10–20 мс уменьшение яркости свечения. За время импульса происходит поглощение от 70 до 95 % СВЧ-энергии в порошке, в зависимости от состава порошковой смеси [11]. На рис. 1 показана фотография поверхности порошка в реакторе через 24 мс после выключения гиротрона.

В результате взрывного процесса на поверхности порошка в объем реактора вылетают микрочастицы, свечение которых становится заметным на фоне затухающего излучения от поверхности (см. рис. 1). Вблизи нее образуется слой плазмы с наблюдаемыми спектральными линиями атомов и однократно ионизированных ионов. В ходе контрольных экспериментов при закрытой верхней поверхности порошка кварцевым стеклом образования ионов [12, 13] не наблюдалось. Таким образом, несмотря на возможность возникновения локальных пробоев между частицами внутри порошка, основной взрывной процесс развивается на верхней поверхности порошка (на границе раздела порошок–газ). Анализ экспериментальных данных показал, что электронная температура в этом слое достигала значений порядка 1 эВ.

Свечение пылевых частиц связано с их достаточно высокой температурой. По континууму спектра, излучаемого с поверхности порошка, можно оценить температуру пылинок на поверхности, составившую до 0.5 эВ, что выше температуры плавления диэлектрика [1, 3]. По характеру вплавления этих пылинок в кварцевую пластину над порошком делаем вывод, что такая температура пылинок сохраняется на расстоянии нескольких сантиметров от поверхности.

Развитие. Вторая стадия развития цепного процесса наблюдается после выключения СВЧ-импульса и ее длительность достигает десятков секунд. Данная стадия характеризуется протеканием экзотермических химических реакций, которые обеспечивают высокие температуры газа внутри реакторного объема и горение. На этой стадии формируется очень сильный перепад температуры газа от границы раздела порошок–газ до верхней части кварцевой трубки реактора. В результате термофореза пылевые частицы, сформировавшиеся на взрывной стадии, остаются внутри реактора и наблюдаются в течение сотен миллисекунд. При этом в спектрах свечения над порошком наблюдаются молекулярные полосы двух- и трехатомных молекул (нитриды, бориды, оксиды). Из-за вторичного синтеза на этом этапе весь объем реактора заполняется взвесью частиц из синтезированных веществ, которая уже через 1–2 с затрудняет оптические измерения внутри реактора.

Время существования плазменно-пылевых образований в реакторе превышает длительность импульса гиротрона на 2–3 порядка. На рис. 2 показаны фотографии светящихся пылевых частиц, которые

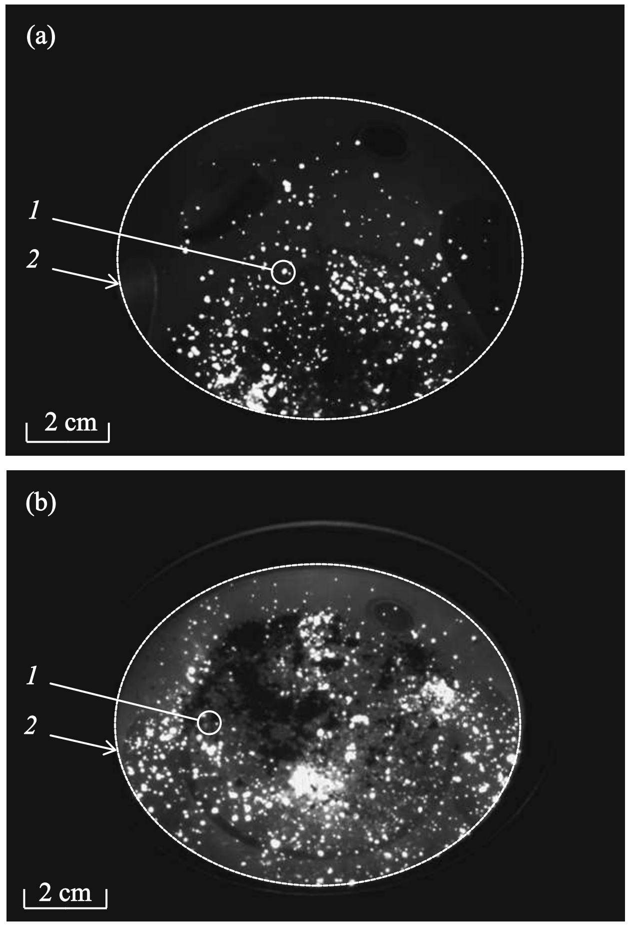

Рис. 2. Светящиеся частицы *1* в объеме реактора на второй стадии цепного процесса на фоне слабо светящейся взвеси через 50 мс после выключения СВЧ (a), Mo+B в воздухе, энергия в импульсе 1200 Дж за 8 мс и через 100 мс (b), Ti+B с катализатором H3BO в воздухе, энергия в импульсе 1300 Дж за 4 мс. *2* – стенка кварцевого цилиндра

хорошо видны на фоне остывающей поверхности порошка. Снимки были сделаны для смесей порошков Mo+B (a) и Ti+B с катализатором H_3BO_3 (b) через 50 мс и 100 мс после выключения гиротрона соответственно.

Добавление малого объема катализатора увеличивает количество полученных вторичных материалов за счет более активного протекания экзотермических реакций. Тогда из-за разогрева границы порошок–газ, происходит дополнительное поступление частиц порошка в реактор. Соответственно, возрастает число наблюдаемых частиц в реакторе (см. рис. 2).

На рис. 3a показаны треки движения пылевых частиц в течение первой секунды после выключения

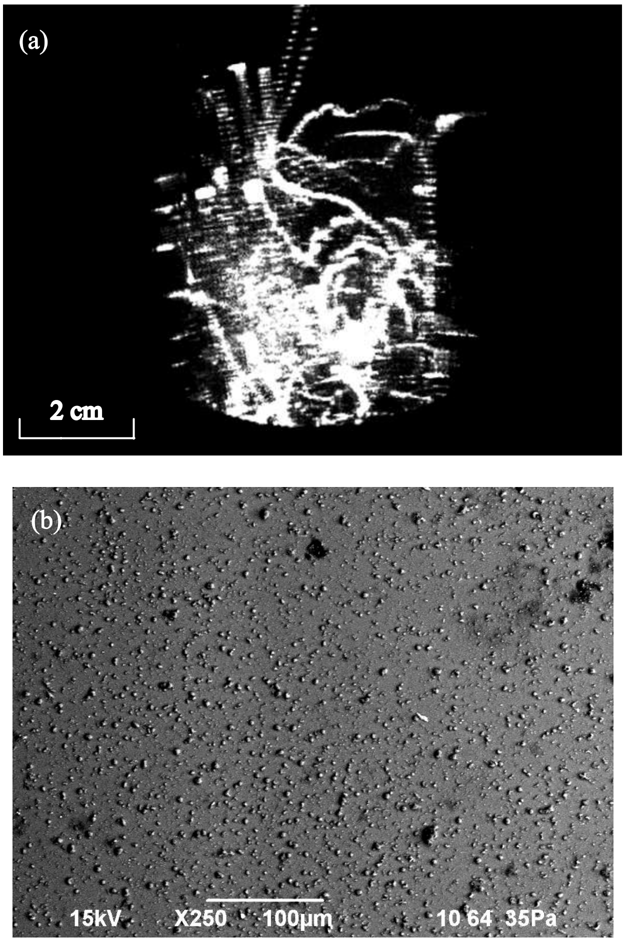

Рис. 3. (a) – Треки пылевых частиц в течение 1 с после выключения гиротрона без внешнего магнитного поля. (b) – Решетка осажденных на кварц частиц бора. Смесь порошков Mo+B в воздухе, энергия в импульсе 1200 Дж за 4 мс

гиротрона. Расстояние между двумя точками на треке при визуализации камерой (250 кадров/с) позволяет вычислять скорость частиц, которая составляла порядка 10–100 см/с.

Материал частиц был определен по физико-химическому анализу осажденных на пластинки частиц. На рис. 3b представлена фотография пластины из кварца с осажденными на нее частицами (смесь Mo+B). Пылевые частицы состоят из бора, их средний диаметр от 1 до 10 мкм.

Обрыв цепи. На третьей стадии происходит прекращение цепной реакции. Вторичные продукты, состоящие из синтезированных сложных веществ, осаждаются на пластины и стенки реактора в виде нано- и микрочастиц. При этом пылевые частицы играют важную роль, являясь центрами кристаллизации сложных композитов. На рис. 4 и 5 показаны фо-

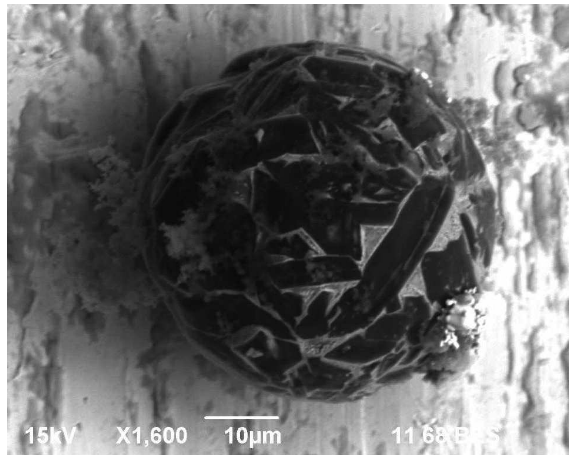

Рис. 4. Микрочастица на пластине молибдена. Смесь Mo+B в воздухе. Энергия в импульсе 1200 Дж за 8 мс

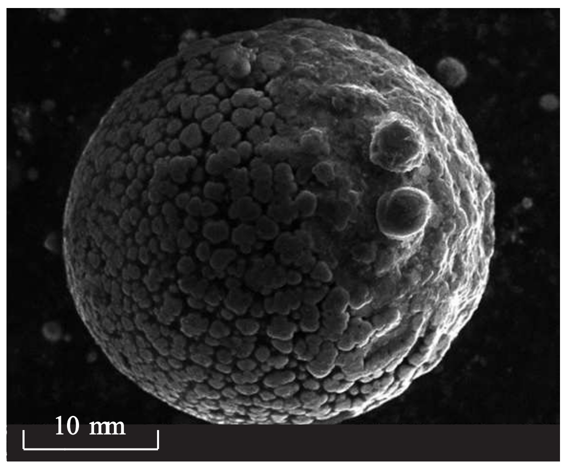

Рис. 5. Микрочастица со стенки кварцевого цилиндра. Смесь Ti+B с катализатором H_3BO_3. Энергия в импульсе 1300 Дж за 4 мс

тографии микрочастиц. В смеси порошков Mo+B в воздухе на расстоянии 5 см от поверхности раздела порошок–газ на молибденовой пластине была осаждена микрочастица размером около 40 мкм, имеющая вид матрицы из бор-углеродных зерен, разделенных прослойками молибденсодержащей фазы (см. рис. 4).В смеси порошков Ti+B с катализатором H_3BO_3 на расстоянии 10 см от поверхности порошка на кварцевом цилиндре была осаждена микрочастица размером около 30 мкм, состоящая из оксида и нитрида титана (см. рис. 5).

4. Параметры плазменно-пылевого образования при воздействии излучения гиротрона. Для анализа факторов, приводящих к образованию пылевых частиц и формированию газопылевой плазмы был проведен расчет параметров СВЧ-разряда, скоростей дрейфа и нагрева электронов. Оценим параметры СВЧ-разряда в реакторе. Плотность потока энергии электромагнитного излучения связана с напряженностью электрического поля соотношением $I = cE^2/4\pi$, соответственно, среднеквадратичное значение напряженности электрического поля $E[\text{В/см}] = 2(30\pi I[\text{Вт/см}^2])^{1/2}$. При плотности потока энергии $I = 10^4[\text{Вт/см}^2]$ значение электрического поля равно 1942 В/см, соответственно, при атмосферном давлении с числовой плотностью атомов $N_a = 2.69 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$ приведенная напряженность электрического поля равна $E/N = 7.2$ Тд. Для максимальных напряженностей поля в экспериментах $3 \cdot 10^4$ В/см^2 – $E/N = 21.6$ Тд, что достаточно для формирования лавины электронов в газе.

Оценим скорость нагрева электрона в электрическом при дрейфе в азоте. Она определяется частотой упругих столкновений, которая для электрона с энергией 1 эВ в азоте при атмосферном давлении имеет порядок величины $v_{ea} = \sigma_{ea} N_a V_T \sim 10^{12}$ с$^{-1}$. Здесь полагалось, что сечение упругих столкновений электрона с молекулами азота $\sigma_{ea} = 10^{-15}$ см^2, их числовая плотность $N_a = 2.69 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$, тепловая скорость электрона $V_T = 6 \cdot 10^7$ см/с, [14]. Поскольку частота упругих столкновений электрона с молекулами азота значительно превышает частоту излучения гиротрона 75 ГГц,то движение электрона в электрическом поле волны будет носить диффузионно-дрейфовый характер.

Скорость дрейфа электрона в азоте при $E/N = 7.2$ Тд равна $W = 10^6$ см/с [14]. За время импульса излучения гиротрона каждый электрон за счет хаотизации направленного движения в упругих столкновениях (обратно-тормозной нагрев) наберет достаточную тепловую энергию, которая будет затрачиваться на возбуждение, ионизацию и нагрев газа, что приведет к образованию лавин, пробоя и плазмы.

Взаимодействие плазмы с зернами порошка на границе раздела порошок–газ приведет к накоплению на них отрицательного электрического заряда. Для частиц диаметром 10 мкм, значениях температур электронов $T_e = 1$ эВ и ионов $T_i = 0.026$ эВ величина заряда имеет порядок $Q = -10^4 e$, e – элементарный заряд [15]. Заряд, накопленный пылевыми частицами, приведет из-за их взаимного отталкивания к разлету с поверхности в объем – “кулоновский взрыв”, причем не одной частицы, а их ансамбля. Дополнительным фактором, вызывающим разлет пылинок вверх – в газ, является появление плавающего потенциала между плазмой и заряженной поверхностью [16].

5. Заключение. Обнаружено,что после воздействия мощного импульса излучения гиротрона на смесь порошков металла и диэлектрика со свободной границей порошок–газ в объеме реактора над поверхностью раздела инициируются цепные экзотермические реакции с участием пылевых частиц. Развитие цепных реакций приводит к синтезу вторичных веществ из исходных материалов, которые в виде гранул оседают на стенках реактора. Показано, что эти реакции проходят три стадии развития: инициация взрывным образом; развитие цепных реакций; завершение реакций синтеза и осаждение продуктов на стенки реактора.

Предложен механизм взрывного процесса, инициирующего развитие цепного процесса в объеме реактора – это кулоновский взрыв отрицательно заряженных частиц на границе раздела порошок–газ, приводящий к их разлету с поверхности в объем реактора. Дополнительным фактором, вызывающим разлет пылевых частиц в газ, является появление плавающего потенциала между плазмой и заряженной поверхностью.

На второй стадии цепного процесса наблюдаются квазистационарные плазменно-пылевые образования из частиц порошка, как результат разогрева смеси под действием экзотермических реакций и термофореза. Эти отрицательно заряженные частицы являются наиболее легкой фракцией диэлектрика из смесей порошков с характерными размерами 1–10 мкм.

На завершающем этапе синтезируемые в реакторе гранулы композитной керамики осаждались на стенку реактора. Показано, что они состоят из сложных композитов веществ с контролируемым размером и химическим составом: при инициировании цепного процесса в газе при атмосферном давлении для определенных заранее смесей исходных порошков металла и диэлектрика.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-32-70014 мол_а_мос).

1. G. M. Batanov, N. K. Berezhetskaya, V. D. Borzosekov et al. (Collaboration), J. Nanoelectron. Optoelectron. **8**, 58 (2013).
2. Г. М. Батанов, Л. В. Колик, Н. К. Харчев, А. Е. Петров, К. А. Сарксян, Н. Н. Скворцова, В. Д. Борзосеков, Д. В. Малахов, Е. М. Кончеков, В. Д. Степа-

хин, И. А. Коссый, И. А. Щербаков, А. с. 2523471 РФ, МКИ. *Способ получения нанодисперсных порошков нитрила бора и диборида титана.* Заявл.16.05.2014.

3. G. M. Batanov, V. D. Borzosekov, D. Golberg, L. D. Iskhakova, L. V. Kolik, E. M. Konchekov, N. K. Kharchev, A. A. Letunov, D. V. Malakhov, F. O. Milovich, E. A. Obraztsova, A. E. Petrov, I. G. Ryabikina, K. A. Sarksian, V. D. Stepakhin, and N. N. Skvortsova, J. Nanophoton. **10**(1), 012520 (2016).
4. Н. Н. Семенов, Успехи химии **36**(1), 3 (1967).
5. Н. Н. Семенов, *Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения*, Знание, М. (1969).
6. В. А. Кабанов (гл. ред.), *Энциклопедия полимеров, т. 3, Советская энциклопедия* (1977),с. 260–271.
7. L. Couëdel, M. Mikikian, L. Boufendi, and A. A. Samarian, Phys. Rev. E **74**, 026403-1 (2006).
8. N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, D. V. Malakhov, A. A. Sorokin, G. M. Batanov, V. D. Borzosekov, M. Yu. Glyavin, L. V. Kolik, E. M. Konchekov, A. A. Letunov, A. E. Petrov, I. G. Ryabikina, K. A. Sarksyan, A. S. Sokolov, V. A. Smirnov, and N. K. Kharchev, Radiophysics and Quantum Electronics **58**, 701 (2016).
9. N. K. Kharchev, G. M. Batanov, L. V. Kolik, D. V. Malakhov, A. Y. Petrov, K. A. Sarksyan, N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, V. I. Belousov, S. A. Malygin, and Y. M. Tai, Rev. Scientific Instruments **84**, 013507 (2013).
10. Г. М. Батанов, Н. К. Бережецкая, В. Д. Борзосеков, Л. Д. Исхакова, Л. В. Колик, Е. М. Кончеков, А. А. Летунов, Д. В. Малахов, Ф. О. Милович, Е. А. Образцова, Е. Д. Образцова, А. Е. Петров, К. А. Сарксян, Н. Н. Скворцова, В. Д. Степахин, Н. К. Харчев, Физика Плазмы **39**, 942 (2013).
11. Г. В. Укрюков, Д. В. Малахов, Н. Н. Скворцова, В. Д. Степахин, А. А. Сорокин, Инженерная физика **2**, 27 (2017).
12. Г. М. Батанов, Н. К. Бережецкая, В. А. Копьев, И. А. Коссый, А. Н. Магунов, Химическая физика **32**, 52 (2013).
13. Л. Хаксли, Р. Кромптон, *Диффузия и дрейф электронов в газах*, Мир, М. (1977).
14. В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, С. А. Храпак, В. И. Молотков, О. Ф. Петров, УФН **174**, 495 (2004).
15. T. Antonova, C.-R. Du, A. V. Ivlev, B. M. Annaratone, L.-J. Hou, R. Kompaneets, H. M. Thomas, and G. E. Morfill, Phys. Plasmas **19**, 093709-1 (2012).
16. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда*, Наука, М. (1977).