

## Способ эффективного повышения скорости разложения перхлората аммония в твердом ракетном топливе

К.А. Молдосанов\*, В.М. Лелевкин

Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, Кыргызстан

\*altair1964@yandex.ru

**Аннотация.** Перхлорат аммония (ПА) является распространенным окислителем в твердых ракетных топливах. Для устройств, важнейшим параметром которых является скорость движения, ключевая корреляция – между реактивной тягой и скоростью горения топлив и, следовательно, скоростью термического разложения ПА. Для повышения скорости разложения ПА, горючее, порошок алюминия, применяют в виде наночастиц. Цель этой работы – выявление механизма разложения молекул ПА в условиях, когда наночастицы алюминия, помимо выполнения роли горючего, являются и катализаторами разложения ПА. Рассматривается результат распыления наночастиц алюминия на множество нанокластеров в зоне горения топлива из-за плавления ядер наночастиц и разрушения оболочек оксида алюминия. При этом нанокластеры алюминия становятся источниками спонтанного терагерцевого (ТГц) излучения. Поскольку частоты колебательных и вращательных осцилляций в молекулах ПА находятся в ТГц диапазоне, облучение молекул ПА ТГц фотонами способствует их разложению, так как вынужденные осцилляции молекул ослабляют внутримолекулярные связи. Имеющиеся данные о катализе снижения температуры разложения ПА при использовании горючего в виде наночастиц подтверждают эту гипотезу. Предлагается использовать спонтанную эмиссию ТГц фотонов нанокластерами алюминия, повысив её интенсивность путём внедрения в алюминий *3d*-примесей, повышающих плотность состояний электронов вблизи уровня Ферми алюминия.

**Ключевые слова:** катализ, нанокластер, наночастица алюминия, перхлорат аммония, терагерц.

### 1. Введение

Повышение характеристик твердого ракетного топлива за счет уменьшения масштаба размера частиц окислителя, перхлората аммония (ПА)  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  [1], и горючего, дисперсного алюминия [2], – с микрометрического до нанометрического уровня – предмет поисков последнего десятилетия. Одной из главных целей исследований было найти способ эффективного повышения скорости термического разложения ПА в топливе с целью увеличения реактивной тяги.

Особую ценность представляют исследования о распылении в зоне горения топлива наночастиц алюминия в нанокластеры [3–6] – в результате плавления ядра наночастиц, разрыва окисной оболочки на них и разбрызгивания расплава алюминия из-за высокого внутреннего давления в расплавленном ядре. Нанокластеры представляют собой фрагменты расплавленных наночастиц алюминия размером в несколько нанометров.

Эти работы, [3–6], наводят на мысль, что в зоне горения топлива, помимо ускорения разложения ПА за счёт измельчения наночастиц алюминия (увеличения площади взаимодействия алюминия с окислителем), нанокластеры алюминия становятся источниками спонтанного терагерцевого (ТГц) излучения, которое может быть использовано для ускорения разложения молекул ПА.

Хотя данных о спектрах поглощения ПА в ТГц диапазоне недостаточно, а имеющиеся сведения противоречивы и фрагментарны, все же известно, что частоты вибраций решётки кристалла  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  и вращения иона  $\text{NH}_4^+$  в кристалле [7–9] лежат в ТГц диапазоне.

Физическая природа спонтанной эмиссии ТГц фотонов нанокластерами алюминия рассмотрена ниже, в п.2, а на Рис. 1 представлены обнаруженные в литературе спектры механических колебаний (фононов) в молекуле ПА в ТГц диапазоне [10, 11].

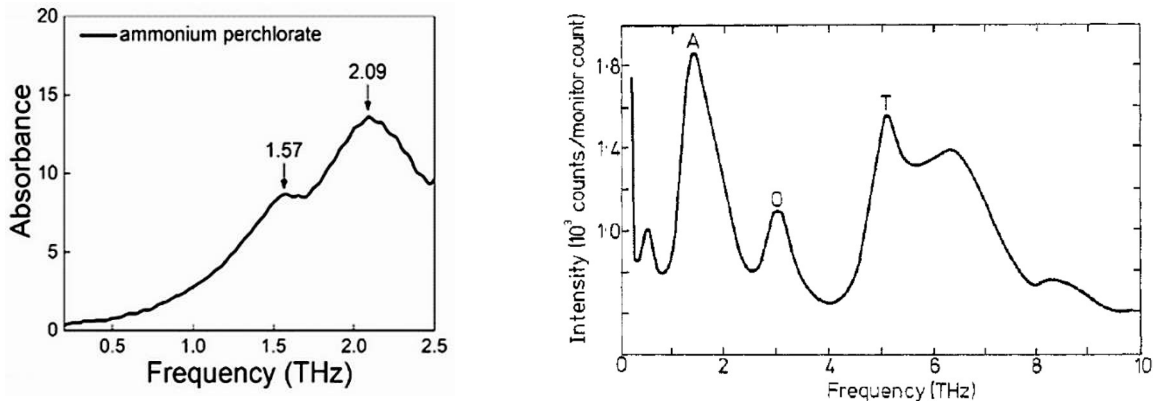


Рис. 1. Спектры механических колебаний (фононов) в молекуле перхлората аммония [10, 11].

## 2. Спонтанная эмиссия ТГц фотонов нанокластерами алюминия

Физический механизм эмиссии ТГц фотонов нанокластером алюминия иллюстрирует Рис. 2, где фермиевский электрон с импульсом  $p_F$  поглощает вибрационную моду (продольный фонон) с импульсом  $q^*_{vm}$ , распространяющуюся вдоль диаметра нанокластера  $D$ . Возбуждённый электрон с импульсом  $s$  движется по хорде  $H$ , Рис. 2а. В пространстве «энергия–импульс» этот процесс иллюстрируется на Рис. 2б, где параболоид – дисперсионная поверхность электронов, а конусовидные раструбы – дисперсионные поверхности продольных фононов.

- Релевантные формулы к Рис. 2 и численные значения параметров:
- энергия Ферми в Al:  $E_F = 11.7$  эВ [12];
  - энергия доминирующих продольных фононов в Al:  $E_{vm} \approx 34.8$  мэВ;
  - величина импульса доминирующих продольных фононов в Al:  $q^*_{vm} \approx 1.2 \cdot 10^{-19}$  г·см·с $^{-1}$ ;
  - при этих параметрах угол  $\gamma = 71^\circ$ .

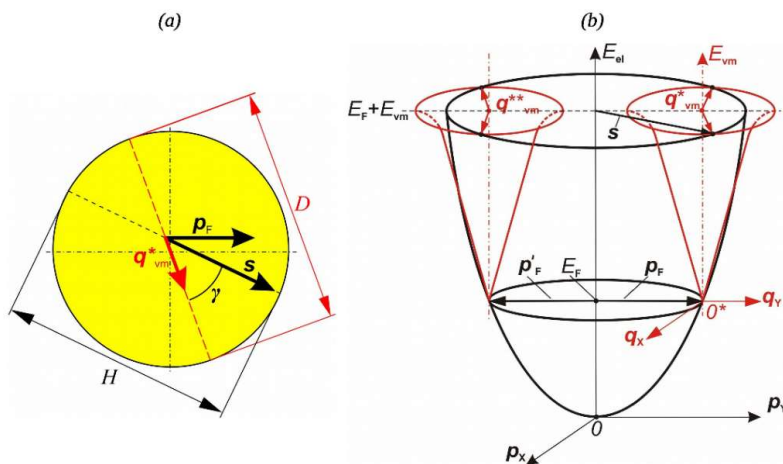


Рис. 2. Поглощение вибрационной моды (продольного фонона) с импульсом  $q^*_{vm}$  фермиевским электроном с импульсом  $p_F$  в нанокластере алюминия. Возбуждённый электрон с импульсом  $s$  движется вдоль хорды  $H$ .

Возбуждённый электрон, вследствие кулоновского взаимодействия с положительными ионами алюминия, мог бы индуцировать вторичный продольный фонон с импульсом, коллинеарным импульсу  $s$ ; и это было бы способом релаксации возбуждённого электрона. Однако, в нанокластерах размером меньше длины свободного пробега электронов этот механизм невозможен, и релаксация происходит путём эмиссии фотона. Другие причины, учитывающие конфайнмент электронов и продольных фононов в нанокластерах, следующие.

Первая причина, обуславливающая эмиссию, – разница в шагах квантования импульсов и энергий у продольных фононов, распространяющихся вдоль диаметра нанокластера  $D$  и вдоль хорды  $H$ . Шаги квантования импульсов у фононов, распространяющихся вдоль диаметра и хорды, равны, соответственно,  $h/D$  and  $h/H$  (здесь  $h$  – константа Планка). Так как  $D > H$ , то шаги квантования импульсов различны; следовательно, и шаги квантования энергий для этих двух направлений распространения фононов тоже не совпадают. Из-за несовпадения квантованных уровней энергий, переход энергии от возбуждённого электрона к вторичному фонону – невозможен (фермиевский электрон получил от первичного фонона энергию, квантованную с определённым шагом, и он не может генерировать вторичный фонон, у которого энергия была бы квантована с другим шагом).

Другая причина, исключая возбуждение вторичного фонона и, следовательно, благоприятствующая эмиссии фотона, следующая. При уменьшении диаметра наночастицы зазор между энергетическими уровнями продольных фононов для направления распространения вдоль вектора  $s$  увеличивается, и в конце концов может иметь место ситуация, когда зазор превысит полную ширину на половине высоты пика распределения продольных фононов по энергиям  $\text{FWHM}_L$ . На Рис. 3 показано пороговое состояние, при котором шаг по энергии вибрационных мод в нанокластере  $\Delta E_{vmH}$ , распространяющихся вдоль хорды  $H$  с импульсом  $s$ , превышает величину  $\text{FWHM}_L$ . В результате, энергетический уровень возбуждённого электрона «повисает» между уровнями продольных фононов для направления  $s$ : отсутствуют уровни, которым электрон мог бы передать свою энергию. Следовательно, электрон будет релаксировать, рассеиваясь на границе нанокластера, с эмиссией фотона (электрон не может покинуть наночастицу, так как его энергия меньше работы выхода электрона из алюминия,  $\approx 4.25$  эВ [12]).

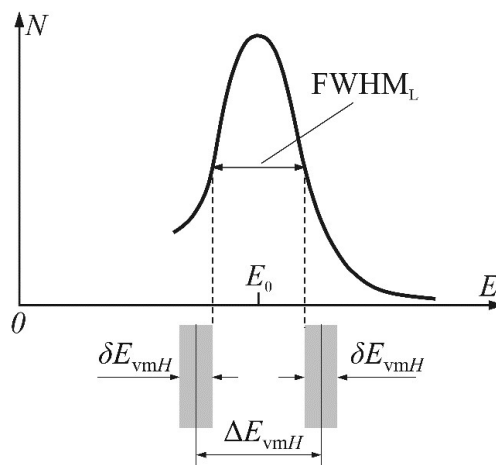


Рис. 3. Пороговое состояние, при котором шаг по энергии вибрационных мод в нанокластере  $\Delta E_{vmH}$ , распространяющихся вдоль хорды  $H$  с импульсом  $s$ , превышает величину  $\text{FWHM}_L$  для энергетического распределения продольных фононов в нанокластере алюминия.

Для направления «вдоль хорды  $H$ » шаги квантования вибрационных мод по импульсу и энергии равны, соответственно,  $h/H$  и  $\Delta E_{vmH} \approx v_L^* \cdot (h/H)$ , где  $v_L^*$  – скорость распространения продольных фононов с энергиями в пределах области  $\text{FWHM}_L$ . Величина скорости  $v_L^*$  меньше номинальной скорости звука в алюминии  $v_L = 6.51 \cdot 10^5 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  из-за искривления дисперсионной кривой продольных фононов около границы зоны Бриллюэна, где расположены энергии продольных фононов, соответствующие  $\text{FWHM}_L$ .

Очевидно, расхождение уровней энергии должно учитывать следствие соотношения неопределённостей Гейзенберга. В качестве критерия «полного расхождения» уровней

фононов была выбрана ситуация, при которой два соседних энергетических уровня раздвинулись на величину, превышающую  $\text{FWHM}_L$  с учётом неопределённости в энергии уровней. Такая пороговая ситуация изображена на Рис. 3, где величина  $\delta E_{vmH}$  рассчитана с учетом соотношения неопределённостей Гейзенберга для импульса фонона и координаты,  $\delta E_{vmH} \geq v_L^* \cdot h / (2\pi H)$ . Неравенство, определяющее соответствующую пороговую длину хорды (такую, что при меньших длинах хорд происходит интенсивная эмиссия фотонов), выглядит так:

$$\Delta E_{vmH} > \text{FWHM}_L + (\delta E_{vmH}/2) + (\delta E_{vmH}/2) \geq \text{FWHM}_L + v_L^* \cdot h / (2\pi H). \quad (1)$$

Подставив величину  $\Delta E_{vmH} \approx v_L^* \cdot (h/H)$  в левую часть неравенства (1), получим:

$$v_L^* \cdot (h/H) > \text{FWHM}_L + v_L^* \cdot (h/2\pi H)$$

или

$$H < [1 - (1/2\pi)] \cdot v_L^* \cdot (h/\text{FWHM}_L). \quad (2)$$

При выполнении этого неравенства значительная часть возбуждённых электронов не сможет релаксировать с возбуждением вторичных фононов – они будут эмитировать фотоны, и интенсивность эмиссии будет повышенной. При этом энергии эмитированных фотонов будут соответствовать ТГц диапазону, так как энергии доминирующих первичных фононов принадлежат области ТГц энергий: в алюминии область  $\text{FWHM}_L$  распределения продольных фононов по энергии лежит в полосе  $\approx 31\text{--}38$  мэВ [13], то есть, в диапазоне частот  $\approx 7.5\text{--}9$  ТГц.

Отметим, что могут иметь место так называемые двухфононные процессы: возбужденный электрон, если не может возбудить вторичный фонон с энергией, точно равной приобретённой энергии  $E_1$  от первичного фонона, может возбудить вторичный фонон меньшей энергии  $E_2$ , а разницу в энергиях первичного и вторичного фононов  $\Delta E = E_1 - E_2$  передать электрону [14]. А электрон не сможет релаксировать с возбуждением фонона и эмитирует фотон. Тогда область генерируемых нанокластером частот расширится и, возможно, охватит достаточную часть спектра фононов в молекуле ПА (Рис. 1).

Подставив в неравенство (2) численные значения величин ( $v_L^* \approx 4.7 \cdot 10^5$  см·с<sup>-1</sup>;  $\text{FWHM}_L \approx 7.9$  мэВ), получим оценку длин хорд, для которых уровни вибрационных мод расходятся на энергетический зазор  $\Delta E_{vmH} > \text{FWHM}_L$ :  $H < 2.1$  нм.

Пусть «пороговая» хорда длиной  $H_0 = 2.1$  нм – хорда минимальной длины из всех хорд, образующих с диаметром нанокластера угол  $\gamma = 71^\circ$ ; она соприкасается с диаметром нанокластера на его поверхности. Тогда «пороговый» диаметр нанокластера  $D_0 = H_0 / \cos \gamma = 6.45$  нм. Нанокластеры алюминия размером меньше  $D_0$  будут наиболее интенсивными источниками ТГц фотонов.

Пусть  $\Delta E_D \approx v_L^* \cdot (h/D)$  – шаг по энергии для продольных фононов, бегущих по диаметру нанокластера. Чем больше кратность укладки шага по энергии  $\Delta E_D$  в пределах ширины  $\text{FWHM}_L$  (например, при увеличении диаметра нанокластера  $D$ ), то есть чем больше величина  $(\text{FWHM}_L / \Delta E_D)$ , тем выше вероятность наложения энергетического уровня, расширенного до  $\delta E_{vmH}$ , на уровень энергии первичного фонона, что приведёт к релаксации возбуждённого электрона с генерацией вторичного фонона (с энергией первичного фонона). И тем ниже интенсивность спонтанной эмиссии фотонов, и ниже каталитическая активность нанокластера.

### 3. Способ повышения интенсивности эмиссии ТГц фотонов нанокластерами алюминия

Спонтанную эмиссию ТГц фотонов нанокластерами алюминия можно использовать для ускорения разложения молекул ПА. Для этого нужно использовать наночастицы из алюминия,

содержащего примесные атомы так называемых  $3d$ -металлов, элементов 4-го ряда Периодической Таблицы Д.И.Менделеева: V, Cr, Mn. В таких системах энергии электронных  $d$ -уровней примесных атомов располагаются вблизи уровня Ферми алюминия, благодаря чему заметно повышается плотность состояний фермиевских электронов. Использование наночастиц из систем Al-V, Al-Cr и Al-Mn позволило бы получить в нанокластерах этих систем повышенное число электронов-участников процессов поглощения продольных фононов и эмиссии ТГц фотонов, за счет чего можно было бы повысить интенсивность облучения молекул ПА ТГц излучением и ускорить их разложение.

На Рис. 4 приведена сводная картина плотности состояний электронов в алюминии с примесями  $3d$ -элементов (по результатам работ [15–20]). На оси энергий указано положение уровня Ферми  $E_F$  для интерметаллида FeAl.

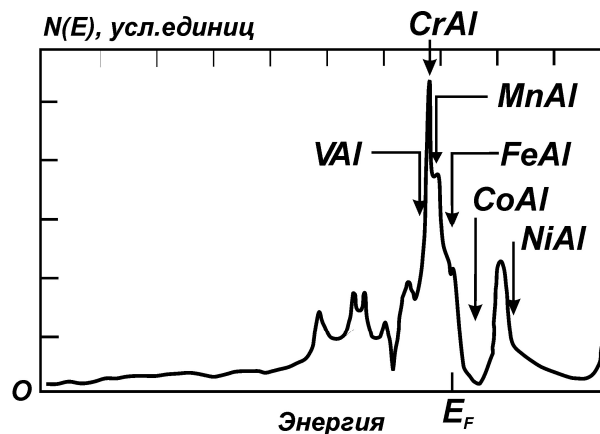


Рис. 4. Сводная картина расположения уровней Ферми (указаны стрелками) в интерметаллидах Al и  $3d$ -металлов на распределении плотности состояний электронов по энергии (по результатам работ [15–20]).

Подтверждением целесообразности предлагаемого подхода являются экспериментальные данные о поведении удельной электропроводности алюминия при внесении в него даже небольшого количества примесей V, Cr и Mn ( $\sim 1$ –4 масс.%) [21] (Рис. 5). Из Рис. 5 видно, что при примесях  $\sim 1$  масс.% V или Cr проводимость Al уменьшается примерно в 2 раза; значит, длина свободного пробега электронов  $l_{mfp}$  уменьшается тоже в 2 раза. У объёмного алюминия (*bulk aluminum*)  $l_{mfp} \approx 18.9$  нм [22]. Значит, у алюминия с 1 масс.% V или Cr длина свободного пробега электронов  $l_{mfp} \approx 9.45$  нм. Приблизительно такая же длина  $l_{mfp} \approx 9$  нм будет у алюминия с 2 масс.% Mn. Следовательно, если размер нанокластеров-брызг алюминия, содержащего такие концентрации примесных атомов V, Cr или Mn, меньше 9 нм, то они будут эмитировать ТГц фотоны и станут катализаторами распада молекул ПА. Известна грубая оценка размеров нанокластеров-брызг алюминия, получающихся в результате дисперсии расплава наночастиц размером 20–120 нм [3, 4]: 5–10 нм. Таким образом, нанокластеры алюминия (как с примесями V, Cr и Mn, так и без них) с размерами меньше 10 нм представляют особый интерес, так как имеют прикладной потенциал. Нанокластеры алюминия размером 5–10 нм с неокисленной поверхностью уже производятся в виде полимерных нанокомпозитов (связующее вещество – полибутадиев с концевыми гидроксильными группами, *hydroxyl-terminated polybutadiene* (НТРВ), содержащий нанокластеры алюминия, выращенные *in situ*) и демонстрируют высокую скорость горения, более, чем в пять раз превышающую скорость горения обычных нанопорошков алюминия ALEX [23].

К концепции образования нанокластеров *in situ* («на месте») в полимерных нанокомпозитах [24], в принципе, принадлежит и идея получения нанокластеров-брызг

расплавленного алюминия *in situ* – в зоне горения, в уже горящем топливе, с горючим из смеси полимерного связующего и наночастиц алюминия, и окислителя, ПА.

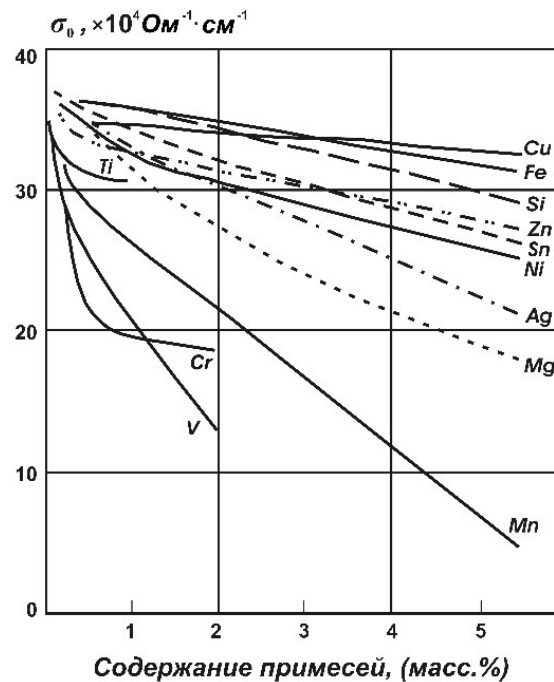


Рис. 5. Изменение удельной электропроводности Al на постоянном токе при внесении в него примесей [21].

К сожалению, нам не удалось найти данных о поглощении полибутадиена с концевыми гидроксильными группами в ТГц диапазоне частот.

Один из возможных путей дальнейшего повышения интенсивности спонтанной эмиссии ТГц фотонов нанокластерами – использование в алюминии примесных атомов *f*-элементов вместо *3d*-примесей. Известны так называемые электронные системы с «тяжёлыми фермионами» [25, 26], характеризующиеся очень высокой плотностью состояний *f*-электронов вблизи уровня Ферми – более значительной, чем в случае применения примесей *3d*-элементов, например, соединение  $\text{CeAl}_3$ . Представляется целесообразным проведение исследований скорости разложения перхлората аммония при использовании дисперсного алюминия в виде смеси из наночастиц обычного алюминия и наночастиц  $\text{CeAl}_3$  с вариацией состава смеси.

#### 4. Обсуждение

Как реализовать подход с использованием наночастиц алюминия с примесями *3d*-металлов? Существуют промышленно производимые алюминиевые сплавы с примесным элементом Mn («легирующим компонентом»), из которых перспективным сплавом представляется сплав АМц1 (см. Таблицу 1), содержащий достаточное количество марганца. Этот сплав мог бы стать сырьём для производства наночастиц.

**Таблица 1.** Состав промышленных алюминиевых сплавов.

Марка сплава	Легирующие компоненты, масс.%			
	Al	Cu	Mg	Mn
АМц [21]	Основа	–	–	1.0–1.6
АМц1 [27]	то же	?	?	2.0–4.5
ММ [21]	то же	–	0.2–0.5	1.0–1.4
АМг6 [21]	то же	–	5.8–6.8	0.5–0.8
Д16 [21]	то же	3.8–4.9	1.2–1.8	0.3–0.9

Из Таблицы 2 [28] видно: по сравнению с другими 3d-металлами, растворимость Mn в Al повышена. Наночастицы интерметаллидов алюминия можно было бы изготавливать из сплавов, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза алюминидов [29–31] или методом взрывающихся проволок из сплава AMц1 – этот метод промышленного производства нанопорошков металлов освоен [32].

**Таблица 2.** Максимальная растворимость ряда 3d-металлов в алюминии [28].

Система	Максимальная растворимость, масс.%	
	Равновесная растворимость	Неравновесная растворимость
Al-Ti	0.24	0.35
Al-Cr	0.77	5.7
Al-Mn	1.82	10.2
Al-Fe	0.052	0.2

## 5. Заключение

В последнее время в разработке полимерных композитов получила развитие концепция о формировании наночастиц *in situ* («на месте») – непосредственно в матрице или связующем. Она нашла применение и в производстве полимерного горючего в виде нанокластеров алюминия размером 5–10 нм, выращенных *in situ* в полимерном связующем (в полибутадиене с концевыми гидроксильными группами, *hydroxyl-terminated polybutadiene* (HTPB)).

В данной работе предлагается развить эту концепцию до получения нанокластеров-брызг расплавленного алюминия, содержащего примесные атомы V, Cr или Mn, *in situ* – в горящем топливе, с горючим, состоящим из полимерного связующего (полибутадиена с концевыми гидроксильными группами) и наночастиц из интерметаллидов Al-V, Al-Cr или Al-Mn размером 20–120 нм, и окислителя (перхлората аммония).

Показано, что нанокластеры из алюминия, содержащего примесные атомы V, Cr или Mn, размером меньше 9 нм, могут стать источниками терагерцевого излучения и способствовать ускорению разложения молекул перхлората аммония в твердом ракетном топливе. Это должно привести к увеличению реактивной тяги.

Перспективной разработкой представляется исследование скорости разложения перхлората аммония при использовании дисперсного алюминия в виде смеси из наночастиц обычного алюминия и наночастиц  $\text{CeAl}_3$  – с вариацией состава смеси.

## 6. Список литературы

- [1] M. Abdelhafiz, M. Yehia, H.E. Mostafa, and T. Wafy, Self-catalyzed nanoscale ammonium perchlorate for advanced composite solid rocket propellant, *Nano Express*, vol. **2**, no. 3, 030008, 2021; doi: 10.1088/2632-959X/ac2568
- [2] Y.-L. Zhu, H. Huang, H. Ren, and Q.-J. Jiao, Effects of aluminum nanoparticles on thermal decomposition of ammonium perchlorate, *Journal of the Korean Chemical Society*, vol. **57**, no. 1, 109, 2013; doi: 10.5012/jkcs.2013.57.1.109
- [3] V.I. Levitas, Mechanochemical mechanism for reaction of aluminium nano- and micrometre-scale particles, *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. **371**, 20120215, 2013; doi: 10.1098/rsta.2012.0215
- [4] V.I. Levitas, Burn time of aluminum nanoparticles: strong effect of the heating rate and melt-dispersion mechanism, *Combustion and Flame*, vol. **156**, no. 2, 543, 2009, doi: 10.1016/j.combustflame.2008.11.006
- [5] K.W. Watson, M.L. Pantoya, and V.I. Levitas, Fast reactions with nano- and micrometer aluminum: A study on oxidation versus fluorination, *Combustion and Flame*, vol. **155**, no. 4, 619, 2008; doi: 10.1016/j.combustflame.2008.06.003

- [6] V.I. Levitas, B.W. Asay, S.F. Son, and M. Pantoya, Mechanochemical mechanism for fast reaction of metastable intermolecular composites based on dispersion of liquid metal, *Journal of Applied Physics*, vol. **101**, 083524, 2007; doi: 10.1063/1.2720182
- [7] Q. Wu, C. Li, L. Tan, Z. Hang, and W. Zhu, Comparative DFT and DFT-D studies on structural, electronic, vibrational and absorption properties of crystalline ammonium perchlorate, *RSC Advances*, vol. **6**, no. 54, 48489, 2016; doi: 10.1039/c6ra09743j
- [8] W. Zhu, T. Wei, W. Zhu, and H. Xiao, Comparative DFT Study of Crystalline Ammonium Perchlorate and Ammonium Dinitramide, *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. **112**(20), 4688, 2008; doi: 10.1021/jp800693e
- [9] J.A. Janik, J.M. Janik, and J. Mayer, Quasi-free rotation of the ammonium ion in crystalline  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ , *Physica Status Solidi B*, vol. **44**, no. 1, 437, 1971; doi: 10.1002/pssb.2220440144
- [10] T. Kou, J. Ye, J. Wang, Y. Peng, Z. Wang, C. Shi, X. Wu, X. Hu, H. Chen, L. Zhang, X. Chen, Y. Zhu, H. Li, and S. Zhuang, Terahertz spectroscopy for accurate identification of *Panax quinquefolium* basing on nonconjugated 24(R)-Pseudoginsenoside  $\text{F}_{11}$ . Supplementary Material, Supplementary Figure 6. THz spectra of other 28 substances used for PCA analysis. (20) ammonium perchlorate, *Plant Phenomics*, vol. **2021**, 6793457, 2021; doi: 10.34133/2021/6793457
- [11] J.W. Hennel and Z.T. Lalowicz, Proton spin relaxation and phonons in ammonium salts, *J.Phys. C: Solid State Phys.*, vol. **11**, L707, 1978; doi: 10.1088/0022-3719/11/16/006
- [12] Н. Ашкрофт, Н. Мермин, *Физика твердого тела*, Москва: Мир, 1979.
- [13] M. Kresch, M. Lucas, O. Delaire, J.Y.Y. Lin, and B. Fultz, Phonons in aluminum at high temperatures studied by inelastic neutron scattering, *Phys. Rev. B*, vol. **77**, 024301, 2008; doi: 10.1103/PhysRevB.77.024301
- [14] A.V. Postnikov and K.A. Moldosanov, Suggested design of gold-nanoobjects-based terahertz radiation source for biomedical research, *Nanotechnology*, vol. **29**, no. 28, 285704, 2018; doi: 10.1088/1361-6528/aabf10, <http://arxiv.org/abs/1801.10248>
- [15] R.M. Nieminen and M. Puska, 3d impurities in Al: density functional results, *Journal of Physics F: Metal Physics*, vol. **10**, no. 5, L123, 1980; doi: 10.1088/0305-4608/10/5/001
- [16] J. Deutz, P.H. Dederichs, and R. Zeller, Local density of states of impurities in Al, *Journal of Physics F: Metal Physics*, vol. **11**, no. 9, 1787, 1981; doi: 10.1088/0305-4608/11/9/008
- [17] C. Müller, W. Blau, and P. Ziesche, Local partial DOS and experimental Al K spectra of transition metal aluminides. Charge transfer trend, *Phys. Stat. Sol. (b)*, vol. **116**, no. 2, 561, 1983; doi: 10.1002/pssb.2221160218
- [18] M. Morinaga, S. Nasu, H. Adachi, J. Saito, and N. Yukawa, Alloying effect on the electronic structure of aluminium, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. **3**, no. 35, 6817, 1991; doi: 10.1088/0953-8984/3/35/011
- [19] P.P. Singh, First-principles calculations of the electronic properties of 3d transition-metal impurities in Al, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. **3**, no. 19, 3285, 1991; doi: 10.1088/0953-8984/3/19/007
- [20] P.P. Singh, Self-consistent electronic structure of 3d-transition-metal impurities in aluminum using the recursion method, *Phys. Rev. B*, vol. **43**, no. 5, 3975, 1991; doi: 10.1103/physrevb.43.3975
- [21] А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, А.В. Белова, *Промышленные цветные металлы и сплавы, Справочник*, Москва: Металлургия, 1974, С. 381, 394–395.
- [22] D. Gall, Electron mean free path in elemental metals, *Journal of Applied Physics*, vol. **119**, no. 8, 085101, 2016; doi: 10.1063/1.4942216



- [23] M. Fisher, *In situ* manufacturing of polymer nanocomposites for energetic applications, *DSIAC Journal*, vol. 4, no. 1, 4, 2017; <https://dsiac.org/articles/in-situ-manufacturing-of-polymer-nanocomposites-for-energetic-applications>
- [24] A. Kellarakis, *In situ* generation of nanoparticles on and within polymeric materials, *Polymers*, vol. 16, 1611, 2024; doi: 10.3390/polym16111611
- [25] Д.И. Хомский, *Редкоземельные соединения с промежуточной валентностью: спектроскопические исследования*, Спектроскопия кристаллов, Сборник научных трудов, отв. редактор А.А. Каплянский, Ленинград: Наука, 1985, С. 118–149.
- [26] Д.И. Хомский, *Необычные электроны в кристаллах (Промежуточная валентность и тяжелые фермионы)*, Москва: Знание, 1987.
- [27] *Авиационные материалы*, Справочник в девяти томах, ВИАМ, ОНТИ–1982, т.4, Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Часть I, Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия, Книга 1, С. 36.
- [28] Н.И. Варич, Л.М. Буров, К.Е. Колесниченко, Влияние третьего компонента на состояние твердого раствора в системе Al–Cr, полученного при больших скоростях охлаждения. *Известия ВУЗов, серия «Цветная металлургия»*, № 3, 111, 1967.
- [29] В.И. Итин, Ю.С. Найбороденко, *Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений*, Томск: Издательство Томского университета, 1989.
- [30] В.А. Подергин, В.А. Неронов, В.Д. Яровой, М.Д. Маланов, *Синтез алюминидов некоторых переходных металлов*, Процессы горения в химической технологии и металлургии, Черноголовка, 1975, С. 118-127.
- [31] Е.Б. Письменская, *Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений в режиме динамического теплового взрыва*, Кандидатская диссертация, 2000.
- [32] Компания «Передовые порошковые технологии», <http://www.nanosized-powders.com/>