

12

Взрывчатое разложение монокристаллов гексогена, инициированное импульсным электронным пучком

© Б.П. Адуев, Г.М. Белокуров, С.С. Гречин, И.Ю. Лисков

Институт углехимии и химического материаловедения СО РАН, Кемерово
E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Поступило в Редакцию 21 июля 2014 г.

Впервые проведены исследования взрывчатого разложения монокристаллов гексогена под воздействием сильнофокусированного пучка электронов (0.25 MeV , 20 ns , 15 J/cm^2). В реальном режиме времени измерены кинетика и спектры свечения. Показано, что во время действия пучка электронов наблюдается люминесценция кристаллов, в микросекундном временном интервале происходит взрывчатое разложение. Методом спектральной пирометрии установлена тепловая природа взрывчатого свечения. Сделана оценка температуры взрыва $T = 3500 \text{ K}$.

Относительно новым направлением исследования инициирования бризантных взрывчатых веществ (БВВ) является использование импульсных электронных пучков, которое представляет интерес как в общенаучном плане, так и в перспективе применения электронных пучков в специальных условиях, например глубоком вакууме.

До настоящего времени объектами исследований являлись инициирующие взрывчатые вещества (ИВВ) с низким порогом взрывного разложения [1] и тетранитропентаэритрит (тэн) — наиболее чувствительный материал из БВВ [2–4].

В данной работе методом оптической спектроскопии с временным разрешением впервые проведено исследование кинетики и спектров свечения при взрывчатом разложении монокристаллов гексогена при воздействии пучка электронов. Гексоген относится к классу циклических нитраминов, более стойкий к внешним воздействиям, чем тэн, и имеет более широкий спектр практических применений.

В качестве источника инициирования использовался ускоритель электронов ГИН-600 с эффективной энергией электронов $E = 250 \text{ keV}$,

длительностью импульса $\tau = 20$ ns, плотностью тока пучка $I = 3$ kA/cm².

Образцы монокристаллов гексогена толщиной 1.5–2 mm с поперечными размерами ~ 3 –4 mm крепились в вакуумной камере ускорителя электронов к медному кристаллодержателю на расстоянии 3 mm от анода ускорителя. Анод ускорителя представляет собой стальную пластину с центральным отверстием диаметром 2 mm для вывода пучка электронов из вакуумного диода. Расстояние между стальным катодом диаметром 2 mm и анодом в вакуумном диоде составляло 3 mm. В таких условиях плотность энергии, выводимая на образец, составляла 15 J/cm². Эксперименты проводились при 300 K в вакууме 10^{-2} Torr.

Измерялась вероятность взрыва образцов под действием пучка электронов с указанными выше параметрами. Взрывное разложение с признаками детонации (отсутствие порошка в экспериментальной камере, разрушение оптических окон экспериментальной камеры, повреждение вакуумного диода) наблюдалось на трех из десяти образцов. В остальных случаях наблюдался частичный взрыв, по-видимому, облученного слоя и разбрасывание порошка гексогена в экспериментальной камере. Отметим, что в аналогичных условиях вероятность взрыва тэна составляет $P \geq 0.9$ [2].

Измерялась кинетика и спектры взрывного свечения гексогена с использованием спектрофотохронографа, подробно описанного в [5]. Основные элементы установки: полихроматор для разложения свечения на спектральные составляющие и фотохронограф, работающий в режиме линейной развертки (стрик-камера). Информация с выходного экрана фотохронографа считывается ПЗС-матрицей и передается в компьютер для последующей обработки. Аппаратура позволяет регистрировать спектр свечения при воздействии единичного импульса на образец в спектральном интервале 350–650 nm с разверткой во времени. Временное разрешение составляет 10 ps, спектральное разрешение — 10 nm. Учет спектральной чувствительности регистрирующего тракта производился с помощью нахождения коэффициента коррекции $k(\lambda)$ с использованием калибровочной лампы накаливания ТРШ 2850-3000 с известной цветовой температурой.

Кинетика свечения на двух длинах волн ($\lambda = 420$ и $\lambda = 590$ nm) представлены на рис. 1. Первый пик свечения возникает под действием пучка электронов и наблюдается на всех исследованных образцах. Второй пик свечения в микросекундном временном интервале наблюдается только в случае взрывчатого разложения образца.

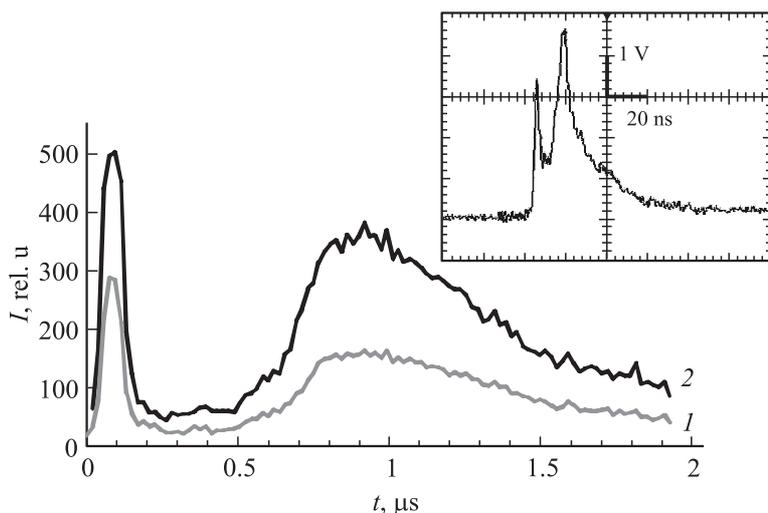


Рис. 1. Кинетика свечения монокристалла гексогена при воздействии импульсным электронным пучком (1 — $\lambda = 420$ nm, 2 — $\lambda = 590$ nm). Врезка: тонкая структура свечения первого пика.

При регистрации первого пика свечения с лучшим временным разрешением с помощью фотоумножителя ЭЛУФ-К и осциллографа Tektronix 7404 оказалось, что он имеет тонкую структуру (см. врезку на рис. 1), которую не позволяет разрешить используемая развертка стрик-камеры. Подобный эффект в аналогичных условиях облучения мы наблюдали на монокристаллах тэна [6]. Первый пик тонкой структуры можно связать соответственно с люминесценцией, возникающей в облученном слое образца, второй — со сбросом заряда, внесенного пучком электронов в образец, сопровождающегося взрывом тонкого поверхностного слоя и разлетом люминесцирующих микрочастиц кристалла, аналогично таковому процессу в тэне [4].

На рис. 2, а представлены спектры свечения через 10 ns (кривая 1) и 30 ns (кривая 2) от начала импульса. Здесь же представлен разностный спектр (кривая 3), который позволяет сделать вывод, что под действием пучка электронов одним из компонентов свечения является люминесценция синглетного экситона, которую наблюдали при фотовозбужде-

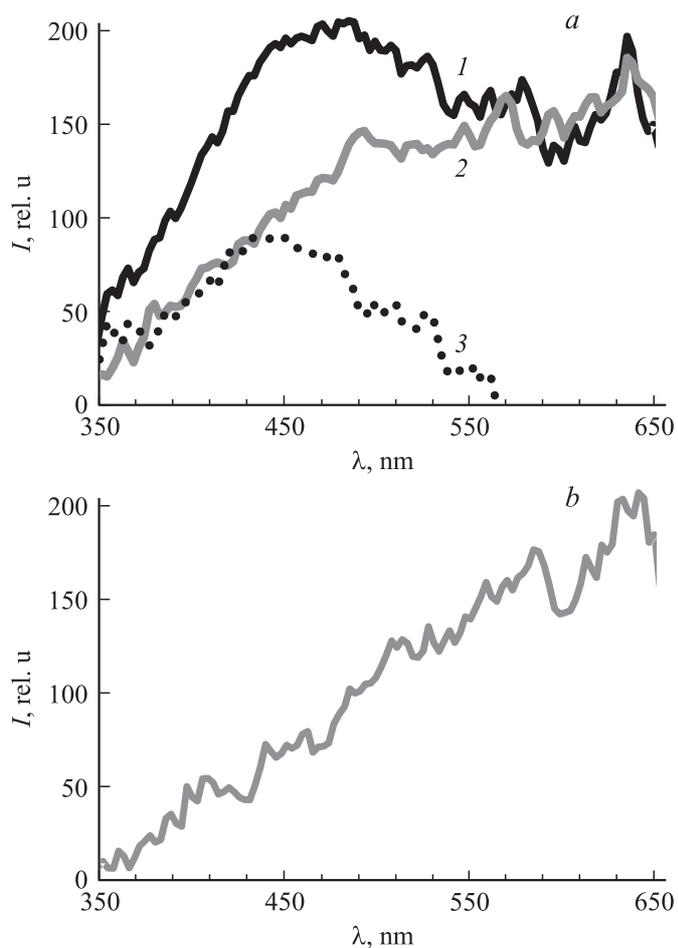


Рис. 2. Спектры свечения монокристалла гексогена: *a* — спектры свечения во время воздействия пучка электронов (*1* — через 10 ns от начала импульса; *2* — через 30 ns от начала импульса; *3* — разностный спектр); *b* — спектр свечения при взрыве образца через 1.5 μs от начала импульса.

нии в работе [7]. Природу второго компонента свечения из данных измерений установить невозможно.

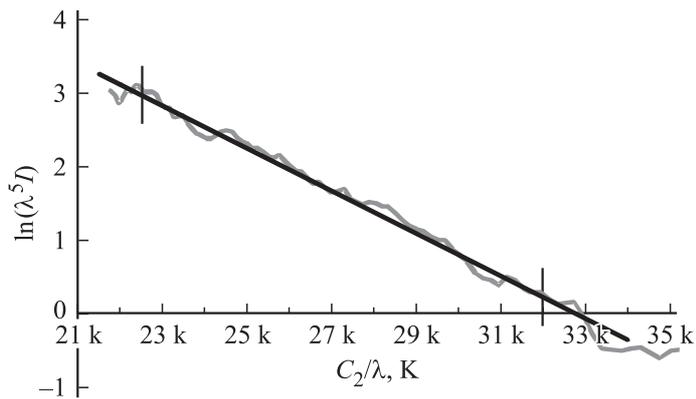


Рис. 3. Спектр свечения при взрыве образца (рис. 2, *b*) в координатах Вина. Вертикальными отрезками обозначен интервал $640 \div 450 \text{ nm}$, по которому определена температура продуктов взрыва гексогена.

На рис. 2, *b* представлен спектр свечения, возникающий при взрыве монокристалла для фиксированного момента времени. Наблюдается сплошной спектр, нарастающий в красную область. Природу спектра однозначно установить затруднительно. Однако можно сделать попытку ответить на вопрос, является ли это свечение тепловым или имеет люминесцентную природу. С этой целью мы применили метод спектральной пирометрии с использованием координат Вина, который заключается в следующем [8]:

Спектральная интенсивность теплового излучения реального объекта описывается формулой Планка и коэффициентом излучения ε .

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

где $C_1 = 37418 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{cm}^2$; $C_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.

В области Вина при:

$$C_2/\lambda T \gg 1 \quad (2)$$

формулу (1) можно представить в виде:

$$\ln(\lambda^5 I) - \ln(\varepsilon C_1) = -C_2/(\lambda T). \quad (3)$$

Если по оси абсцисс взять значение $x = C_2/\lambda$, а по оси ординат $\ln(\lambda^5 I)$, в случае теплового свечения должен выполняться линейный закон.

На рис. 3 представлен спектр рис. 2, b в координатах Вина. Как видно из рис. 3, линейность наблюдаемого спектра с большой вероятностью позволяет идентифицировать наблюдаемое при взрыве образца свечение как тепловое. Определяемая по наклону прямой температура дает значение $T = 3500$ К.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что воздействие пучка электронов наносекундной длительности при плотности энергии, превышающей пороговое значение, инициирует химическую реакцию в облученном слое кристалла, которая приводит к взрывчатому разложению гексогена в микросекундном временном диапазоне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-03-98032 р_сибирь_а с использованием оборудования Кемеровского центра коллективного пользования.

Список литературы

- [1] Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Белокуров Г.М., Захаров Ю.А., Кречетов А.Г. Предвзрывные явления в азидых тяжелых металлов. М.: ЦЭИ „Химмаш“, 2002. 116 с.
- [2] Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Пузынин А.В. // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. № 6. С. 111–118.
- [3] Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицин В.М., Ципилев В.П. // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 5. С. 87–89.
- [4] Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Лисков И.Ю. // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 1. С. 61–66.
- [5] Швайко В.Н., Кречетов А.Г., Адуев Б.П. и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 6. С. 59–62.
- [6] Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Швайко В.Н. // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. В. 2. С. 3–9.
- [7] Paul L. Marinkas Luminescence property of RDX and HMX. New Jersey: Picatinny Arsenal Dover, 1975. 80 p.
- [8] Магунов А.Н. // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 5–28.