

ДЕТОНАЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТЭНА, ИНИЦИИРУЕМАЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Б. П. Адуев, Г. М. Белокуров, С. С. Гречин, А. В. Пузынин

Кемеровский филиал Института химии твердого тела и механохимии СО РАН, 650099 Кемерово
lira@kemsu.ru

Исследовано развитие свечения в объеме монокристаллов тэна (тетранитропентаэритрита) в реальном масштабе времени при воздействии электронным пучком (длительностью 20 нс) с плотностью энергии 15 Дж/см², превышающей порог взрывного разложения. При действии ионизирующего импульса наблюдаются радиолюминесценция и свечение, связанное с критической электронной эмиссией из диэлектрика, переходящей в вакуумный разряд. Зона свечения распространяется от поверхности образца в вакуум со скоростью 5 000 ÷ 6 500 м/с. Поглощение энергии пучка электронов в облученном слое (0.25 мм) вызывает формирование и распространение ударной волны, усиленной химической реакцией в кристалле. При отражении ударной волны от преграды на тыльной стороне образца увеличивается ее амплитуда. Это приводит к детонации, сопровождается свечением, распространяющимся от тыльной к облучаемой поверхности образца со скоростью 7 500 ÷ 8 500 м/с с последующим разлетом продуктов взрывного разложения в вакуум.

Ключевые слова: тэн, детонация, электронный пучок, свечение.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрос интерес к бесконтактным методам инициирования взрывчатых веществ, таким как лазерное и электронно-пучковое воздействие.

В наших предыдущих работах по инициированию взрыва кристаллов тэна электронными пучками наносекундной длительности, а также при воздействии на кристаллы импульсными пучками электронов пикосекундной длительности в допороговом режиме и стационарным рентгеновским излучением установлен ряд закономерностей физико-химических процессов при радиационном облучении. Показано, что при радиационном воздействии в допороговом режиме наблюдается свечение экситонов и первичных продуктов — возбужденных радикалов NO₂, характерное время свечения не превышает временное разрешение регистрирующего тракта (2 нс) [1, 2]. Радикалы NO₂ зарегистрированы также методом ЭПР после γ -облучения и являются нестабильными при комнатной температуре [3, 4]. В спектрах оптического поглощения регистрируются также стабильные нитрит-ионы NO₂⁻ [3, 4].

Согласно квантово-химическим расчетам [5, 6] образование радикалов NO₂ сопровождается выделением энергии, которая, как следует из эксперимента [2], в значительной мере расходуется на излучение и не приводит к дальнейшему развитию экзотермической химической реакции.

При воздействии электронным пучком наносекундной длительности с плотностью энергии, превышающей порог взрывного разложения, в спектрах свечения уже на радиолюминесцентном этапе наряду со свечением экситонов и радикалов NO₂ появляется дополнительная полоса свечения с максимумом при 1.5 эВ [2, 5, 7]. В спектрах свечения на последующих этапах развития реакции взрывного разложения тэна наблюдается только эта полоса, которую, к сожалению, однозначно идентифицировать не удалось. Однако установлено, что спектр свечения этой полосы не является тепловым, следовательно, имеет люминесцентную природу [7]. Измерение спектров нестационарного оптического поглощения тэна при воздействии электронным пучком с плотностью энергии ниже и выше порога взрывного разложения позволило установить, что в первом случае в момент воздействия пучка электронов регистрируется полоса поглощения радикалов NO₂, а во втором случае наряду с радикалами NO₂ регистрируется полоса поглощения, связанная

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-02-96009).

с радикалами NO_3 [8]. Сопоставляя результаты, можно предположить, что полоса свечения 1.5 эВ соответствует радикалам NO_3 .

По нашим оценкам нагрев облученной части кристалла уже на стадии термализации горячих электронов и дырок, как минимум, достигает температуры плавления [2]. В условиях высокой температуры возможен термоактивированный отрыв радикала NO_3 от ионизированной молекулы тэна, что подтверждается экспериментально [8]. Для этого процесса нужны относительно небольшие энергетические затраты — согласно квантово-химическим расчетам 44.7 кДж/моль (0.45 эВ) [5, 6].

Образующийся первичный карбокатион по данным [9] перестраивается в третичный с выделением энергии 96 кДж/моль. Это приводит к увеличению температуры и амплитуды давления в ударной волне, формирующейся и распространяющейся из облученной области кристалла, и, по-видимому, инициирует дальнейшую цепочку экзотермического распада молекулы тэна [2]. Экспериментально установлено, что одним из конечных продуктов разложения молекулы тэна является молекулярный азот в возбужденном состоянии, который проявляется в спектрах свечения продуктов взрыва [2, 7].

Такова, с нашей точки зрения, картина первичных физико-химических процессов в кристаллах тэна при электронно-пучковом инициировании, которая приводит к развитию экзотермической химической реакции и взрыву.

Поскольку экстраполированный пробег электронов используемого нами ускорителя в монокристалле тэна составляет величину примерно 0.25 мм [2], возникает вопрос о характере физико-химических процессов, развивающихся в необлученной части кристалла, или хотя бы об установлении характеристик взрыва: нормальная детонация, адиабатический взрыв и т. д.

Попытки ответить на этот вопрос предпринимались в работах [10–12], в которых использовались прессованные образцы тэна. Основные выводы сводятся к следующему: при воздействии электронного пучка происходит объемный электрический пробой тэна из облученной области кристалла, при этом каналы пробоя исполняют роль «горячих точек», в которых начинается химическая реакция. Одновременно происходят газодинамическая разгрузка, диспергирование и выброс продуктов

абляции навстречу электронному пучку. При этом ударная волна, формирующаяся в облученной зоне, вызывает детонацию образца со скоростью $D \approx 10^4$ м/с с последующим разлетом продуктов детонации со скоростью $v \approx 5 \cdot 10^3$ м/с [10].

С нашей точки зрения, эти выводы носят общий характер и недостаточно подтверждены экспериментом. В частности, в экспериментах [10–12] не наблюдался объемный пробой образца. Явно завышена оценка скорости ударной волны, которая согласно [13] при плотности образцов, близкой к плотности монокристаллов, не может превышать значения $D \approx 8500$ м/с. При этом скорость разлета продуктов детонации в вакууме должна превышать скорость детонации [13].

Нам представляется, что экспериментальная методика, используемая авторами [10–12], недостаточно точна для пространственно-временных измерений. В частности, наблюдаемая длительность свечения может быть меньше фактической длительности процесса взрывного разложения из-за реабсорбции свечения продуктами химической реакции.

В настоящей работе проведено измерение скорости взрывного разложения монокристаллов тэна по усовершенствованной методике, позволяющей дать более однозначную интерпретацию результатов о характере процессов взрывного разложения в объеме кристалла.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе использовались монокристаллы тэна толщиной от 1.1 ÷ 1.8 мм и поперечных размеров $\approx 3 \div 5$ мм. Для инициирования тэна применялся ускоритель электронов ГИН-600. Катод представлял собой трубку из нержавеющей стали диаметром 3 мм, анод — стальную пластину с отверстием диаметром 3 мм для вывода пучка электронов. Параметры пучка: эффективная энергия электронов 0.25 МэВ, длительность импульса 20 нс. Суммарная энергия пучка электронов, измеренная калориметрическим методом, ≈ 1 Дж. В месте расположения экспериментального образца диаметр облученной зоны, измеренный по отпечатку на латунной пластине, примерно равен 3 мм, следовательно, плотность энергии, выводимой на образец, составляет 15 Дж/см². При таких параметрах взрывное разложение

монокристаллов тэна осуществляется с вероятностью $P \approx 1$.

Для определения порога взрывного разложения необходимо измерение зависимости вероятности взрыва от плотности энергии. Однако такой эксперимент с использованием электронного пучка требует чрезвычайно больших трудозатрат, поэтому была сделана следующая оценка. Уменьшали плотность энергии путем увеличения расстояния между анодом и образцом. Уже при небольшом ее снижении до значений $12 \div 13$ Дж/см² вероятность взрыва составляла величину $P < 1$. Иногда взрыв образца был неполным. При этом на стенках вакуумной камеры наблюдался осадок порошка тэна в виде узкого кольца, лежащего в плоскости образца. Этот факт свидетельствует о том, что газообразные продукты распространяются преимущественно перпендикулярно направлению электронного пучка, разбрасывая остатки невзорвавшейся части образца. На основе совокупности данных мы сделали вывод, что используемая в экспериментах плотность пучка электронов $W = 15$ Дж/см² близка к критической плотности энергии $W_{0,99}$.

Свечение кристаллов, возникающее в результате воздействия пучка электронов, регистрировалось стрик-камерой, на базе электронно-оптического преобразователя «Взгляд-2А». Экспериментальная установка подробно описана в работе [14].

Образцы приклеивали тыльной стороной к заземленной медной пластине и помещали в вакуумную камеру ускорителя электронов. Расстояние между облучаемой поверхностью и анодом ускорителя составляло ≈ 3 мм.

Изображение образца с помощью оптической системы проектировалось на фотокатод стрик-камеры. После этого в оптическую схему устанавливали щель шириной 0.1 мм, которая выделяла зону в центре образца по направлению распространения электронного пучка. Временная развертка стрик-камеры перпендикулярна оси ввода излучения. Поскольку пучок электронов поглощается в слое кристаллов толщиной ≈ 0.25 мм [2], то в такой геометрии возможно наблюдение временного развития свечения, возникающего при воздействии пучка электронов, по толщине образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее типичные временные развертки

свечения для двух образцов представлены на рис. 1.

При воздействии пучка электронов наблюдаются радиолуминесценция в облученном слое кристалла и зона свечения со стороны облучаемой поверхности, распространяющаяся в вакуум со скоростью v_1 (см. рис. 1).

Далее, как правило, в течение некоторого интервала времени свечение не регистрируется. На следующем этапе свечение начинает распространяться от тыльной поверхности образца со стороны медной пластины к внешней поверхности со скоростью v_2 . После выхода на поверхность свечение распространяется в область вакуумного промежутка между образцом и вакуумным диодом ускорителя электронов (см. рис. 1).

Для набора статистических данных по скоростям v_1 и v_2 проведено инициирование взрыва 40 образцов. Во всех случаях процессы на временных развертках свечения качественно соответствуют процессам в образцах, представленным на рис. 1. Однако корректная обработка регистрограмм для определения скоростей v_1 и v_2 оказалась возможной только для 9 образцов, поскольку в большинстве случаев яркость свечения при взрыве превышала динамический диапазон измерения. В таких случаях, в силу особенности работы стрик-камеры, светящаяся область расширяется, что приводит к завышению значений измеряемой скорости. Результаты обработки данных по 9 образцам приведены в таблице. Погрешность определения скоростей v_i связана с некоторым произволом проведения линий 1 и 2 на рис. 1 из-за размытости свечения и составляет ≈ 5 %. Погрешности калибровки временной и пространственной осей менее существенны — около 1 %.

Наблюдаемую картину можно интерпретировать следующим образом.

На глубине проникновения электронного пучка, как указывалось выше, наблюдается радиолуминесценция, спектральный состав которой и идентификация центров свечения, ответственных за люминесценцию, описаны во введении.

Свечение, распространяющееся в вакуум, можно было бы связать с вылетающими продуктами химической реакции, которая начинается непосредственно во время действия ионизирующего импульса и приводит к взрыву облученной части кристалла. Для проверки этого предположения был проведен аналогичный экс-

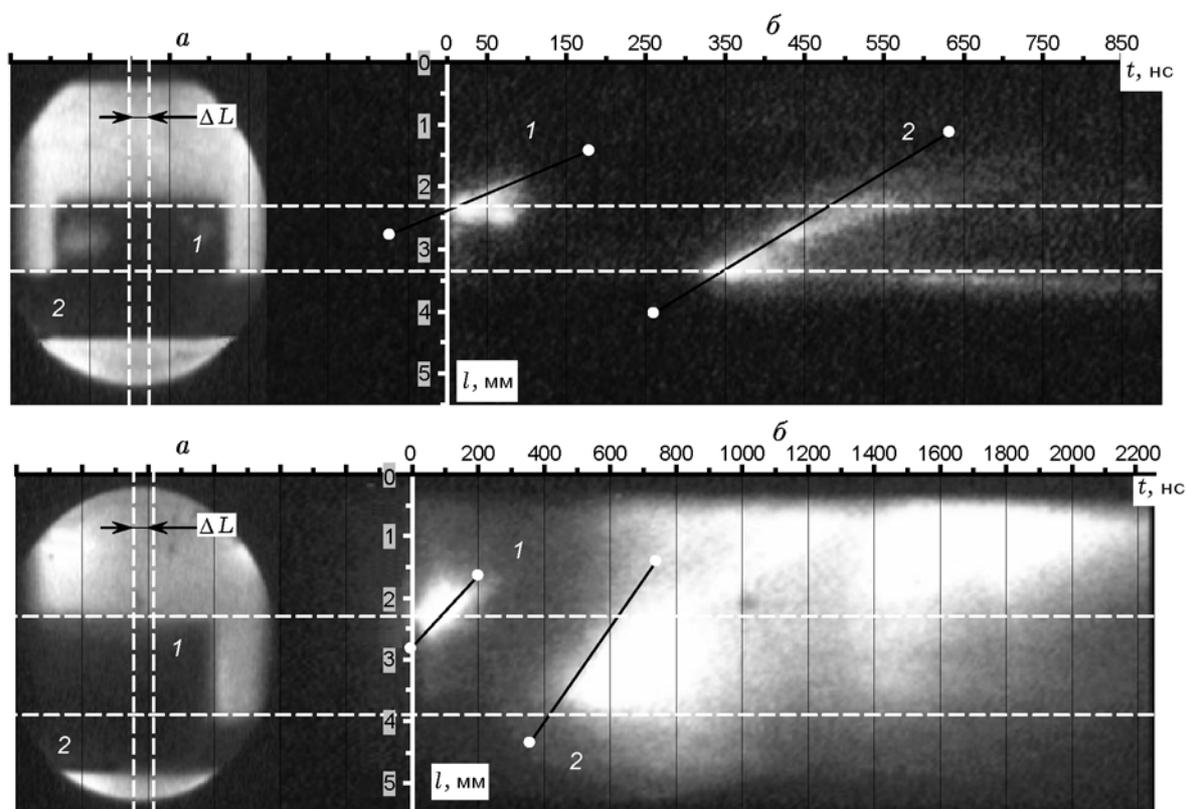


Рис. 1. Статическое изображение и временная развертка свечения образца, регистрируемые стрик-камерой, при $W = 15 \text{ Дж/см}^2$:

a — статическое изображение образцов № 31 и 38 на выходном экране стрик-камеры без оптической щели, возникающее при подсветке источником света, 1 — образец, 2 — медная подложка, ΔL — участок кристалла, выделяемый оптической щелью; b — временная развертка свечения участка кристалла, выделенного оптической щелью, после воздействия импульсом электронов с плотностью энергии $W = 15 \text{ Дж/см}^2$, воздействие пучка электронов на образец соответствует моменту времени $t = 0$, 1 — распространение свечения в вакуум (для образца № 31 $v_1 = 5500 \text{ м/с}$, для образца № 38 $v_1 = 6500 \text{ м/с}$), 2 — распространение свечения, возникающего в результате детонации (для образца № 31 $v_2 = 7500 \text{ м/с}$, для образца № 38 $v_2 = 8000 \text{ м/с}$)

перимент с использованием кристалла CsI—Tl, в котором не возникают химические реакции, протекающие во взрывчатых веществах (ВВ). Оказалось, что в этом кристалле в момент воздействия пучка электронов также наблюдается свечение, распространяющееся в вакуум со скоростью 5000 м/с (рис. 2).

В связи с этим более верной представляется следующая интерпретация. При облучении электронным пучком за время импульса облучения в кристалл вносится заряд плотностью $q > 10^{-5} \text{ Кл/см}^2$. Если сток заряда не обеспечен, то напряженность электрического поля, как показывают простые оценки, должна достигать значения $E > 10^7 \text{ В/см}$. На практике это должно приводить к электрическому про-

бою на фронте импульса облучения по направлению, имеющему наименьшую электрическую прочность. В частности, возможен электрический пробой кристалла. В случае ВВ каналы пробоя можно рассматривать как «горячие точки», из которых развивается реакция взрывного разложения, как это предполагается в [10–12]. Однако свечение, связанное с объемным электрическим пробоем кристалла, в условиях эксперимента не наблюдалось.

По нашему мнению, в данном эксперименте инжекция избыточного заряда происходит в результате вакуумного пробоя промежутка между кристаллом и анодом ускорителя электронов. При этом возникает свечение остаточного газа в вакуумной камере ускорителя.

Результаты обработки регистрограмм

Номер образца	Толщина, мм	Масса, мг	v_1 , м/с	v_2 , м/с
10	1.25	21	5 000	8 100
20	1.1	16	6 500	8 300
22	1.25	22	4 900	8 400
23	1.2	25	6 300	8 600
25	1.1	22	6 400	7 500
28	0.9	14	5 000	8 000
29	1.6	32	4 500	8 300
31	1.4	20	5 500	7 500
38	1.6	26	6 500	8 000

Возможно также, что наблюдаемое явление связано с критической электронной эмиссией из диэлектрика, переходящей в вакуумный разряд, которая исследовалась для ряда стабильных кристаллов в работах [15, 16]. Согласно этим работам при воздействии импульсным электронным пучком с плотностью заряда $> 10^{-6}$ Кл/см² происходит взрыв поверхности с образованием плазмы и эмиссией заряда, примерно равной внесенному заряду.

Рассмотрим природу свечения, которое начинается на тыльной стороне образца. Из-

меренная скорость распространения свечения v_2 для большинства образцов близка к скорости распространения нормальной детонации в кристалле тэна (см. таблицу). Расчетная скорость детонации в монокристаллах тэна $D = 8\,500$ м/с [13]. Следовательно, на данном этапе свечение связано с взрывным разложением образца в результате детонационного процесса. О наличии детонации свидетельствует разрушение медной пластины, в которой в результате взрыва образуется отверстие, его форма и размер примерно соответствуют образцу массой $25 \div 30$ мг. При использовании образца массой ≈ 40 мг наблюдается разрушение оптических окон экспериментальной камеры на расстоянии 45 мм от образца и происходит деформация анода.

Примечательно, что детонация развивается со стороны тыльной поверхности, а не из облученной области кристалла. Этот факт позволяет высказать предположение о характере инициирования взрывного разложения тонких монокристаллов тэна.

При воздействии на образец пучком электронов плотностью 15 Дж/см² в облученном слое кристалла образуются радиационные дефекты (см. введение). Кроме того, поглощение энергии пучка электронов вызывает формирование и распространение ударной волны со скоростью $v = 3\,000 \pm 300$ м/с, измеренной

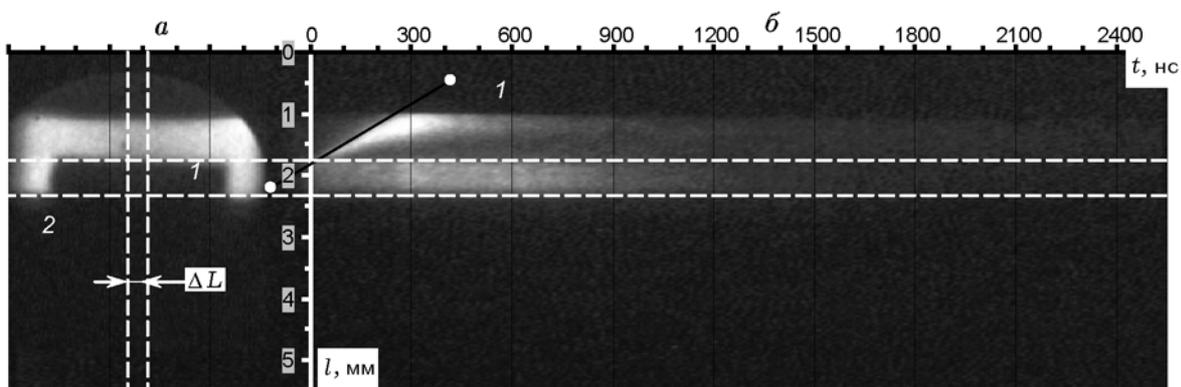


Рис. 2. Статическое изображение и временная развертка свечения кристалла CsI—Tl:

a — статическое изображение образца на выходном экране стрик-камеры без оптической щели, возникающее при подсветке источником света, *1* — образец, *2* — медная подложка, ΔL — участок кристалла, выделяемый оптической щелью; *б* — временная развертка свечения участка кристалла, выделенного оптической щелью, после воздействия импульсом электронов с плотностью энергии $W = 15$ Дж/см², воздействие соответствует моменту времени $t = 0$, после ионизирующего импульса наблюдается объемная люминесценция кристалла в течение 1 мкс, возбуждаемая тормозным рентгеновским излучением, *1* — распространение свечения в вакуум, $v = 5\,000$ м/с

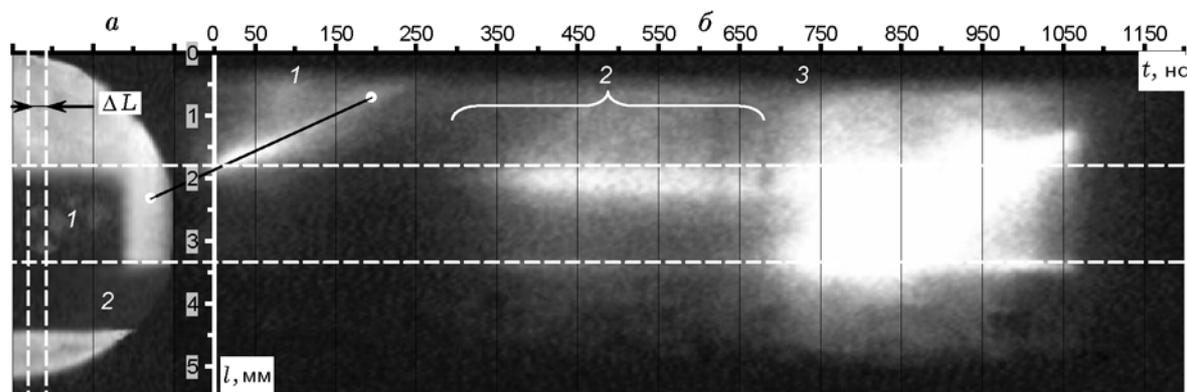


Рис. 3. Статическое изображение и временная развертка свечения образца, регистрируемые стрик-камерой, при $W = 13 \text{ Дж/см}^2$:

a — статическое изображение образца на выходном экране стрик-камеры без оптической щели, возникающее при подсветке источником света с тыльной стороны, 1 — образец, 2 — медная подложка, ΔL — участок кристалла, выделяемый оптической щелью; b — временная развертка свечения участка кристалла, выделенного оптической щелью, после воздействия импульсом электронов с плотностью энергии $W = 13 \text{ Дж/см}^2$, воздействие соответствует моменту времени $t = 0$, 1 — распространение свечения в вакуум, $v_1 = 5900 \text{ м/с}$, 2 — предвзрывная люминесценция, 3 — распространение свечения, возникающего в результате детонации

в [17] с помощью пьезоакустического преобразователя. При плотности энергии 15 Дж/см^2 объемная плотность энергии в слое толщиной 0.25 мм составляет $Q_v = 750 \text{ Дж/см}^3$, а в слое максимального энерговыделения на глубине $60 \div 80 \text{ мкм}$ от поверхности кристалла $Q_v \approx 900 \text{ Дж/см}^3$ [2].

Коэффициент Грюнайзена Γ для монокристаллов не известен, поэтому, воспользовавшись известным значением Γ для прессованного тэна $\Gamma = 1.15$ [18] и выражением $p = \Gamma Q_v$ [1], можно получить оценку амплитуды давления ударной волны $p \approx 1 \text{ ГПа}$.

На самом деле, за счет процесса термоактивированного отрыва радикала NO_3 от ионизированной молекулы тэна и перестройки первичного карбокатиона в третичный (см. введение), вызванной дополнительным энерговыделением, амплитуда ударной волны может увеличиться.

При отражении от преграды (медь), имеющей большую акустическую жесткость, чем ВВ, происходит дальнейшее увеличение амплитуды ударной волны (для абсолютно жесткой преграды — в 2.74 раза [13]). В результате давление становится достаточным для ударно-волнового инициирования детонации в образце.

Развитие процесса взрывного разложения, когда плотность энергии меньше или равна критической, может быть сложнее, чем описано выше. На рис. 3 представлена временная

развертка свечения образца массой 39 мг , зафиксированная при плотности энергии пучка электронов $\approx 13 \text{ Дж/см}^2$. Примечательно, что удалось наблюдать предвзрывную люминесценцию, развивающуюся в результате химической реакции в облученном слое кристалла. Интенсивность люминесценции достигает регистрируемой величины через $\approx 300 \text{ нс}$. При этом над поверхностью кристалла виден слабый светящийся фон, связанный с вылетающими газообразными продуктами реакции. Взрыв объема кристалла регистрируется с запаздыванием относительно инициирующего импульса $\approx 700 \text{ нс}$. Оценка скорости развития реакции в объеме из приведенной регистрограммы затруднительна, поскольку яркость свечения превысила динамический диапазон регистрирующей системы. Тем не менее, в результате взрыва произошло разрушение конструктивных элементов, как и в описанных выше случаях, что свидетельствует о детонационном характере взрыва. К сожалению, более отчетливую картину взрыва при плотности энергии, близкой к критической, в серии из 10 опытов зафиксировать не удалось, поскольку процесс имеет статистический характер и требует применения более длительных разверток стрик-камеры, временное разрешение на которых не позволяет сделать оценку скорости развития химической реакции.

Отметим, что для инициирования детонации ударно-волновым способом при толщине образца 1 мм требуется амплитуда давления >4 ГПа [13]. Амплитуда ударной волны, формирующейся в результате адиабатического нагрева облученной части кристалла за счет поглощения энергии пучка электронов, выше была оценена примерно в 1 ГПа. Даже с учетом увеличения давления при отражении от медной пластины этого недостаточно для инициирования детонации.

Данный факт подтверждает вывод о том, что уже во время воздействия пучка электронов в облученном слое кристалла начинается экзотермическая химическая реакция, приводящая к увеличению начального давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Швайко В. Н. Быстропротекающие процессы при пороговом возбуждении ТЭНа пикосекундными электронными импульсами // Материалы II всерос. конф. «Энергетические конденсированные системы», 9–12 ноября 2004 г. — Черноголовка, 2004. — С. 154–155.
2. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Швайко В. Н. Исследование ранних стадий взрывного разложения кристаллов тетранитропентаэритрита при инициировании импульсными пучками электронов // Изв. вузов. Физика. — 2007. — Т. 50, вып. 2. — С. 3–9.
3. Адуев Б. П., Нелюбина Н. В., Пак В. Х. Радиальные продукты в гамма-облученном тетранитропентаэритрите // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. — 2008. — № 3. — С. 17–19.
4. Адуев Б. П., Нелюбина Н. В., Пак В. Х. Образование и гибель продуктов в гамма-облученном тетранитропентаэритрите // Изв. вузов. Физика. — 2009. — Т. 52, № 8/2. — С. 307–309.
5. Адуев Б. П., Белокуров Б. М., Голубев В. К., Гречин С. С. Начальные стадии взрывного разложения тетранитропентаэритрита при электронно-пучковом инициировании // Докл. X междунар. конф. «Физико-химические процессы в неорганических материалах». — Кемерово, 2007. — Т. 1. — С. 192–193.
6. Адуев Б. П., Голубев В. К. Влияние электронного возбуждения и ионизации молекул тэна на начальную стадию его разложения при облучении электронным пучком // Забабахинские научные чтения: сб. материалов IX междунар. конф., 10–14 сентября 2007. — Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. — С. 79–80.
7. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Тупицин Е. В. Взрывная люминесценция тетранитропентаэритрита, инициированная электронным пучком // Письма в ЖТФ. — 2004. — Т. 30, вып. 15. — С. 91–95.
8. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Пузынин А. В. Спектры нестационарного оптического поглощения кристаллов тетранитропентаэритрита при облучении импульсным пучком электронов // Изв. вузов. Физика. — 2008. — Т. 51, № 11/2. — С. 104–106.
9. Dreger Z. A., Gruzdkov Y. A., et al. Shock wave induced decomposition chemistry of pentaerythritol tetranitrat single crystals: time-resolved emission spectroscopy // J. Phys. Chem. B. — 2002. — V. 106, N 2. — P. 247–256.
10. Корепанов В. И., Лисицын В. М., Олешко В. И., Ципилев В. П. Инициирование детонации тэна мощным электронным пучком // Письма ЖТФ. — 2003. — Т. 29, № 16. — С. 23–28.
11. Олешко В. И., Корепанов В. И., Лисицын В. М., Ципилев В. П. Разрушение и газификация тэна при облучении электронным пучком // Забабахинские научные чтения: сб. материалов IX междунар. конф., 10–14 сентября 2007. — Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. — С. 58–59.
12. Олешко В. И., Корепанов В. И., Лисицын В. М., Ципилев В. П. О природе свечения, возникающего при облучении тетранитропентаэритрита электронным пучком // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 87–89.
13. Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 1.
14. Швайко В. Н., Кречетов А. Г., Адуев Б. П. и др. Экспериментальный комплекс для исследования спектрально-кинетических и пространственно-динамических характеристик взрывного разложения энергетических материалов // Журн. техн. физики. — 2005. — Т. 75, вып. 6. — С. 59–62.
15. Балычев И. Н., Вайсбурд Д. И., Геринг Г. И. Мощная эмиссия при импульсном облучении диэлектриков электронными пучками большой плотности // Изв. вузов. Физика. — 1975. — № 3. — С. 157–158.
16. Балычев И. Н., Вайсбурд Д. И., Геринг Г. И. Мощная пороговая эмиссия диэлектриков при облучении наносекундными электронными пучками большой плотности // Письма в ЖТФ. — 1976. — Т. 2, № 7. — С. 327–330.

17. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С. Акустические характеристики взрывного разложения монокристаллов тетранитропентаэритрита, инициированного пучком электронов // Докл. X междунар. конф. «Физико-химические процессы в неорганических материалах». — Кемерово, 2007. — Т. 1. — С. 193–196.
18. **Детонация** и взрывчатое вещество / под ред. А. А. Борисова. — М.: Мир, 1981.

*Поступила в редакцию 2/VII 2009 г.,
в окончательном варианте — 30/III 2010 г.*
