

05

К вопросу о возбуждении детонации в бризантных взрывчатых веществах сильноточным электронным пучком

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

Институт углехимии и химического материаловедения СО РАН,
650000 Кемерово, Россия
e-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 3 апреля 2013 г.)

Приведены результаты экспериментов, показывающие возможность детонации в тонких монокристаллах тетранитропентаэритрита (тэна) при воздействии сильноточного пучка электронов (0.25 MeV, 20 ns, 15 J/cm²). В реальном режиме времени представлены динамические характеристики свечения кристаллов, возникающие при воздействии электронным пучком, и свечения последующих превращений под действием ударной волны, возникающей в результате поглощения энергии пучка и инициирования экзотермической химической реакции в облученном слое.

Введение

В последние годы возрос интерес к инициированию бризантных взрывчатых веществ с помощью сильноточных электронных пучков наносекундной длительности [1–8]. Практически все работы выполнены с использованием прессованных образцов и монокристаллов тетранитропентаэритрита (тэна). При воздействии электронных пучков вся первичная энергия, внесенная в образец, расходуется на ионизацию вещества, поэтому распределение поглощенной дозы можно оценить как теоретически [8], так и измерить экспериментально с помощью пьезоакустического детектора [3], что, казалось бы, облегчает решение задачи о расшифровке механизма взрывчатого разложения по сравнению, например, с инициированием лазерным импульсом. Однако, на самом деле оказалось, что механизм инициирования не сводится к нагреву образца в результате поглощения энергии до температуры вспышки. В работе [8] предполагается, что инициирование тэна происходит не в результате воздействия электронного пучка, а из-за взрывного испарения образца металлической плазмой, вылетающей из вакуумного диода ускорителя, а свечение, регистрируемое в экспериментах (например, [3]), является люминесценцией паров тэна или продуктов его разложения и плазмы. Кроме того, авторы [8] считают, что в экспериментах по измерению скорости разлета продуктов взрыва с помощью пьезопреобразователя [6] являются не до конца проверенным фактом, поскольку на пьезодатчик могут воздействовать продукты невзрывного разложения.

Кроме того, поднимается еще один дискуссионный вопрос. В работах [1,7] утверждается, что взрыв тэна происходит в результате электрических пробоев образца, в каналах которых инициируется химическая реакция, причем детонацию монокристаллов тэна авторам осуществить не удалось [7].

В настоящей работе представлен цикл экспериментальных результатов, доказывающий, с нашей точки зрения, что испарение тэна металлической плазмой [8]

не происходит, а детонационный режим взрывчатого разложения тонких монокристаллов тэна можно достичь при наличии акустически жесткой преграды на тыльной стороне образца (что более приближено к практическому применению, так как заряд обычно находится в оболочке) в отличие от экспериментов, проведенных в [1,7], где как облучаемая, так и тыльная поверхности образца были открытыми.

Объекты исследования и методика эксперимента

В настоящей работе исследовались монокристаллы тэна толщиной $d = 1.1–1.8$ mm и поперечных размеров $l = 3–5$ mm.

Источником инициирования взрывного разложения тэна служил ускоритель электронов ГИН-600. В качестве катода использовалась трубка из нержавеющей стали $\varnothing 3$ mm. Анод представляет собой стальную пластину с отверстием $\varnothing 3$ mm для вывода пучка электронов. Параметры пучка электронов: эффективная энергия электронов 250 keV, длительность импульса 20 ns. Суммарная энергия пучка электронов, измеренная калориметрическим методом, ~ 1 J. При расположении экспериментального образца на расстоянии 5 mm от катода ускорителя диаметр облученной зоны, измеренный по отпечатку на латунной пластине, составлял величину ~ 3 mm, следовательно, плотность энергии, выводимая на образец, составляет величину ~ 15 J/cm².

При таких параметрах, если на тыльной стороне монокристалла находилась акустически жесткая преграда (медная пластина), взрывное разложение монокристаллов тэна осуществлялось с вероятностью не ниже, чем $p = 0.9$.

Функциональная схема установки для оптических измерений представлена на рис. 1. При измерении пространственно-динамических характеристик взрывного свечения образец 3 приклеивался тыльной стороной

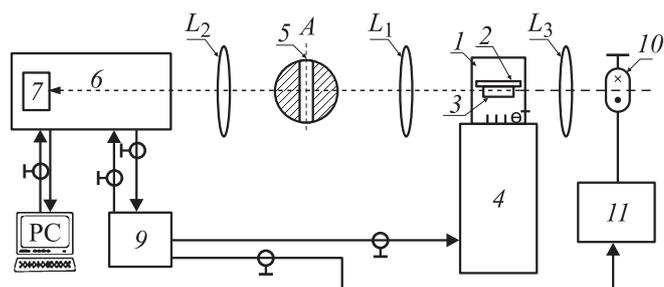


Рис. 1. Функциональная схема измерения пространственно-динамических характеристик свечения и нестационарного оптического поглощения образцов при воздействии импульсным пучком электронов: 1 — вакуумная камера, 2 — кристаллодержатель, 3 — образец, 4 — источник возбуждения ГИН-600, 5 — щель 0.1 mm (вид справа), 6 — фотоэлектронный регистратор (стрик-камера) „Взгляд-2А“, 7 — CCD-камера, 8 — ЭВМ, 9 — генератор импульсов, 10 — импульсная лампа ИПФ-800, 11 — блок питания импульсной лампы ИПФ-800, L_1, L_2, L_3 — линзы.

к заземленной медной пластине и помещался в вакуумную камеру 1 ускорителя электронов 4. Изображение образца с помощью линзы L_1 в масштабе 1 : 1 проектировалось на промежуточную плоскость А и далее с помощью линзы L_2 проектировалось на фотокатод стрик-камеры „Взгляд-2А“ (6) также в масштабе 1:1. После получения на выходном экране стрик-камеры и мониторе компьютера отчетливого статического изображения образца в плоскость А устанавливалась оптическая щель 5 высотой 10 mm и шириной 0.1 mm, которая выделяла зону из изображения на экране ЭОП стрик-камеры шириной 0.1 mm по всей высоте образца и прилегающих к нему зон. Временная развертка стрик-камеры перпендикулярна оси ввода ионизирующего импульса. Поскольку пучок электронов поглощается в слое кристалла ~ 0.25 mm, то в такой геометрии возможно наблюдение временного развития свечения, возникающего при воздействии пучка электронов, по толщине кристалла.

Развертка свечения во времени на выходном экране ЭОП регистрируется CCD-камерой „SONY ICX039DLA“ 7, входящей в состав стрик-камеры 6. Зафиксированная видеоинформация передавалась в компьютер 8, который дополнен специальным устройством, запоминающим переданную информацию в виде графического растрового файла (287 строк, по 740 точек в каждой строке с 256 градациями яркости в каждой точке).

В случае измерения нестационарного оптического поглощения образец прикреплялся на кристаллодержатель со сквозным отверстием в центре ($\varnothing 2$ mm) под углом 45° к электронному пучку ускорителя 4 и световому потоку импульсного зондирующего источника света ИПФ-800 (длительность импульса ~ 0.5 ms) 10, который устанавливался в оптический тракт с противоположной стороны от стрик-камеры „Взгляд-2А“ 6. Свет от вспышки импульсной лампы фокусировался

на подложку с образцом линзой L_3 . Яркость свечения лампы более чем на порядок превышает яркость свечения, возникающего при воздействии на образец импульсом электронов. Свет, прошедший через образец, фокусировался линзами L_1 и L_2 через временную щель 5 на фотокатод стрик-камеры 6. Перед временной щелью устанавливались оптический фильтр СЗС21 для выделения спектрального диапазона $\lambda = 350\text{--}600$ nm и нейтральные светофильтры для ослабления яркости излучения лампы в пределах динамического диапазона стрик-камеры.

В случае измерения нестационарного оптического поглощения вначале запускалась импульсная лампа ИПФ-800 10. В момент достижения максимальной яркости (через 300 μ s) запускались развертка стрик-камеры и ускоритель электронов. Регистрировалось два файла: первый $I_0(t)$ без воздействия пучка электронов, второй $I(t)$ при воздействии электронного импульса. Кинетика изменения оптической плотности вычисляется по формуле $D(t) = \lg(I_0(t)/I(t))$.

Синхронизация элементов установки в обоих случаях осуществлялась при помощи CCD-камеры 7 и генератора импульсов Г5-56 9.

Эксперименты производились при температуре 300 K и в вакууме при остаточном давлении 2.6 Pa.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В первой серии экспериментов измерялась скорость распространения свечения по глубине монокристалла тэна с использованием образцов с закрытой тыльной поверхностью (медная пластина толщиной 1 mm). Временная развертка свечения для одного из образцов представлена на рис. 2.

При воздействии пучком электронов наблюдаются радиоломинесценция в облученном слое кристалла и свечение со стороны облучаемой поверхности, распространяющееся в вакуум со скоростью V_1 (рис. 2).

Далее следует временной интервал, в котором 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 (рис. 2).

Прежде всего отметим, что если бы инициируемое в кристалле свечение было как-то связано с металлической плазмой, следующей за электронным пучком, (как предполагают в работе [8]: „поскольку электронный пучок выводится через открытое отверстие без отсекающей плазму фольги“), то на регистрограмме наблюдалась бы полоса свечения, распространяющаяся со стороны вакуумного диода. Однако свечение плазмы в наших экспериментах не регистрируется. Из этого не следует, что плазма не выходит из диода, а, по-видимому,

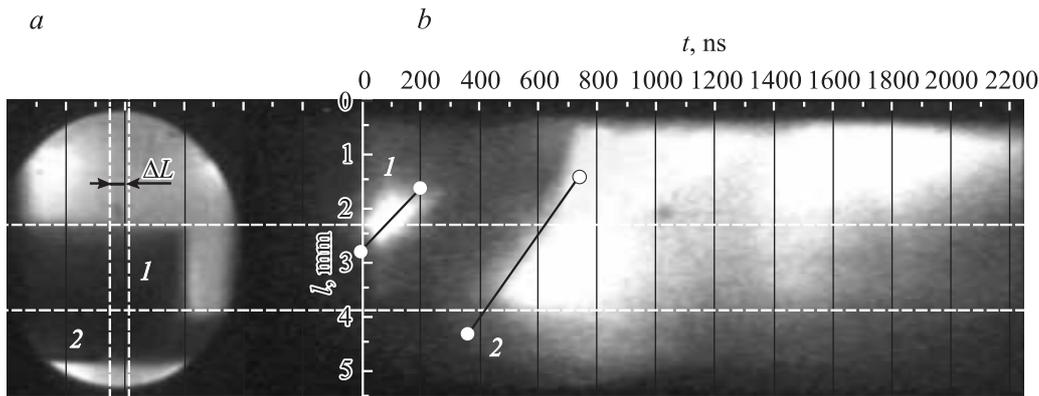


Рис. 2. Статическое изображение и временная развертка свечения образца, регистрируемые стрик-камерой: *a* — статическое изображение образца на выходном экране стрик-камеры без оптической щели, возникающее при подсветке источником света: 1 — образец, 2 — медная подложка, ΔL — участок кристалла, выделяемый оптической щелью; *b* — временная развертка свечения участка кристалла, выделенного оптической щелью, после воздействия импульсом электронов с плотностью энергии $W = 15 \text{ J/cm}^2$. Воздействие пучка электронов на образец соответствует моменту времени $t = 0$: 1 — распространение свечения в вакуум ($V_1 = 6500 \text{ m/s}$), 2 — распространение свечения, возникающего в результате детонации ($V_2 = 8000 \text{ m/s}$).

свечение плазмы значительно слабее люминесценции кристалла и коэффициента усиления $k = 10^3$ усилителя яркости стрик-камеры не достаточно для ее обнаружения. Для этого был проведен отдельный эксперимент, в котором образец отсутствовал, а свечение регистрировалось фотоумножителем с $k = 10^6$. Осциллограмма представлена на рис. 3, из которого следует, что свечение плазмы регистрируется в микросекундном диапазоне. Этот результат в настоящей работе мы не интерпретируем, а приводим как контраргумент авторам [8].

Наблюдаемую картину на рис. 2 можно интерпретировать следующим образом. На глубине проникновения электронного пучка ($\sim 0.25 \text{ mm}$) наблюдается радиолюминесценция, спектральный состав которой представлен в работах [2,3].

Свечение, распространяющееся в вакуум со скоростью V_1 , с нашей точки зрения связано со взрывом поверхностного слоя образца, связанного с внесенным зарядом пучка и не имеет отношения к химическому взрыву тэна. Для проверки этого предположения был проведен аналогичный эксперимент с использованием

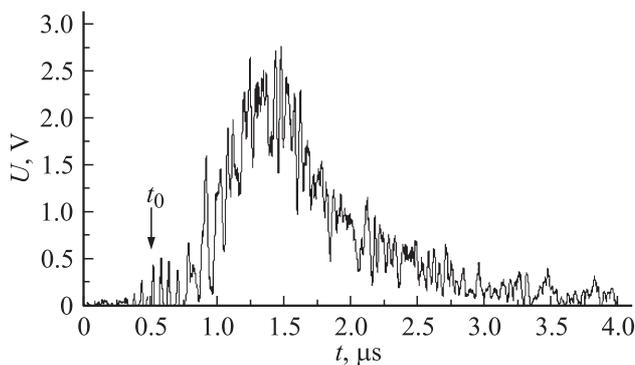


Рис. 3. Осциллограмма свечения плазмы. t_0 — момент вылета пучка электронов.

кристалла CsI-Tl, в котором не возникают химические реакции, протекающие во взрывчатых веществах (ВВ). Оказалось, что в этом кристалле во время воздействия пучка электронов также наблюдается свечение, распространяющееся в вакуум со скоростью 5000 m/s (рис. 4), а в камере наблюдается порошок с распределением по размерам $0.3\text{--}3 \mu\text{m}$ (рис. 5). При этом основная масса кристалла остается на подложке. В связи с этим данное явление можно интерпретировать следующим образом: при воздействии электронным пучком за время импульса облучения в кристалл вносится заряд с плотностью $Q > 10^{-5} \text{ C/cm}^2$. Если сток заряда не обеспечен каким-либо образом, то простые оценки показывают, что напряженность электрического поля должна достигать величины $E > 10^7 \text{ V/cm}$. На практике это должно приводить к электрическому пробое на фронте импульса облучения по направлению, имеющему наименьшую электрическую прочность. В частности, возможен электрический пробой кристалла в объеме образца. В случае ВВ каналы пробоя можно рассматривать как „горячие точки“, из которых развивается реакция взрывного разложения, как это предполагается в [7]. Однако свечение, связанное с объемным электрическим пробоем кристалла в условиях эксперимента, нами не наблюдалось.

По нашему мнению, наблюдаемое явление связано с критической электронной эмиссией из диэлектрика, переходящей в вакуумный разряд, которая исследовалась на ряде стабильных кристаллов в работах [9,10]. Согласно этим работам, при воздействии импульсным электронным пучком с плотностью заряда $q > 10^{-6} \text{ C/cm}^2$ происходит взрыв поверхности с образованием плазмы и эмиссия заряда, примерно равная внесенному заряду. Таким образом, регистрируемое свечение связано с люминесценцией вылетающих продуктов при взрыве поверхности микрочастиц CsI-Tl. В случае тэна, по-видимому, происходит аналогичное явление. В част-

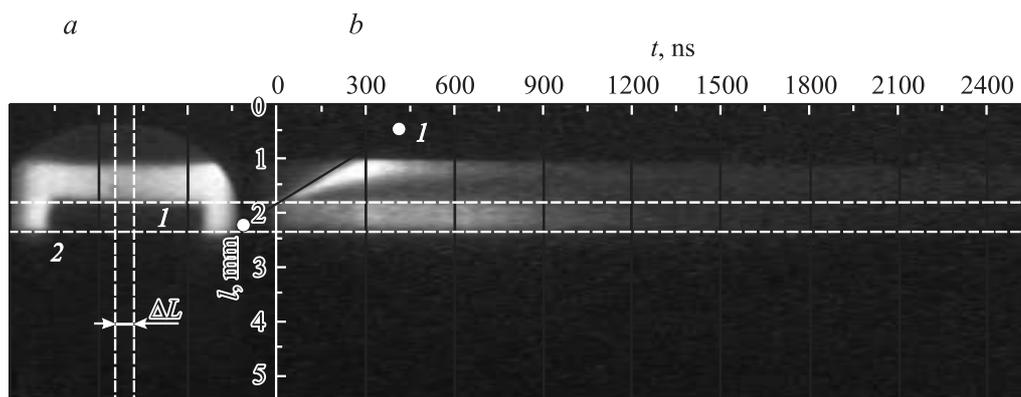


Рис. 4. Статическое изображение и временная развертка свечения кристалла CsI-Tl: *a* — статическое изображение образца на выходном экране стрик-камеры без оптической щели, возникающее при подсветке источником света: 1 — образец, 2 — медная подложка, ΔL — участок кристалла, выделяемый оптической щелью; *b* — временная развертка свечения участка кристалла, выделенного оптической щелью, после воздействия импульсом электронов с плотностью энергии $W = 15 \text{ J/cm}^2$. Воздействие пучка электронов на образец соответствует моменту времени $t = 0$. После ионизирующего импульса наблюдается объемная люминесценция кристалла в течение $1 \mu\text{s}$, возбуждаемая тормозным рентгеновским излучением. 1 — распространение свечения в вакуум $V = 5000 \text{ m/s}$.

ности, в пользу этих выводов говорит и наблюдение стримерных разрядов в облученной области кристалла тэна [7].

Далее рассмотрим свечение, которое начинается на тыльной стороне образца. Измеренная скорость распространения свечения, усредненная по результатам измерений для 8 образцов, составляет величину $V_2 = 8200 \pm 300 \text{ m/s}$. Скорость детонации в монокристаллах тэна, рассчитанная теоретически в работе [11], составляет величину $D = 8500 \text{ m/s}$. Можно предположить, что на данном этапе свечение связано с взрывным разложением образца в результате детонационного процесса.

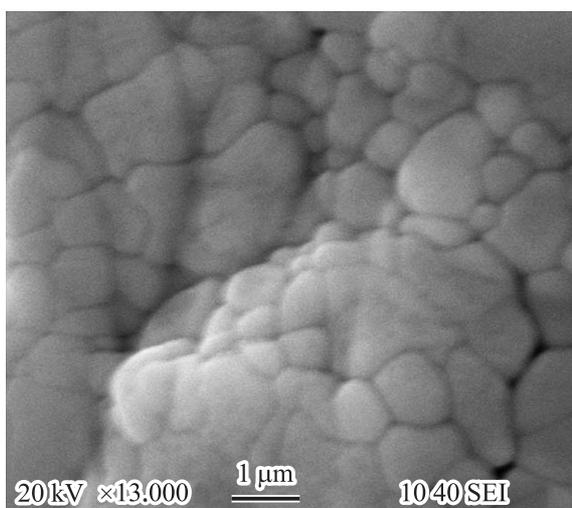


Рис. 5. Электронно-микроскопическая фотография микрочастиц кристалла CsI-Tl, напыленных на поверхность катода в результате взрыва облученной поверхности при воздействии пучком электронов.

О наличии детонации также свидетельствует разрушение медной пластины, в которой в результате взрыва образуется отверстие, размером и формой примерно равное размеру образца (рис. 6). При этом порошок в экспериментальной камере отсутствует, что свидетельствует о полном превращении образца в газообразные продукты.

Рассмотрим причины возникновения детонационной волны.

Теоретические оценки нагрева облученной части кристалла, приведенные в [8], близки к нашим, полученным из результатов измерений профиля поглощенной энергии с помощью пьезоакустического детектора [3], и вывод, что в результате поглощения энергии электронного пучка нагрев образца до температуры вспышки не возможен, разумен. Однако следует учесть еще один фактор. Поглощенная энергия пучка с объемной плоскостью Q_v порождает ударную волну, распространяющуюся из облученной области к тыльной стороне кристалла. Давление в ударной волне $P = \gamma Q_v$, где $\gamma = 1.15 - 1.2$ — коэффициент Грюнайзена для тэна. В нашем случае при флюэнсе 15 J/cm^2 и экстраполированном пробеге электронов в тэне $\sim 0.25 \text{ mm}$ [3], $Q_v = 0.75 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$, а $P \approx 1 \text{ GPa}$, что не учитывается в [8]. Если учесть механическое действие пучка электронов, оценка которого сделана в [8], то получим суммарное $P \approx 1.5 \text{ GPa}$. При отражении ударной волны от преграды (медь), имеющей большую акустическую жесткость, чем ВВ, происходит дальнейшее увеличение амплитуды ударной волны (для абсолютно жесткой преграды в 2.47 раза [11]). В результате амплитуда давления на тыльной стороне кристалла становится либо достаточной, либо близкой к значению возбуждения детонационной волны, которая при ударно-волновом способе воздействия наблюдается уже при $P \geq 4 \text{ GPa}$ [12]. Также в обсуждаемых работах не учтен еще один важный фактор. Электронный пу-



Рис. 6. Фотография образца и медной подложки до и после детонации, зафиксированной на рис. 2, в вакуумной камере ускорителя электронов.

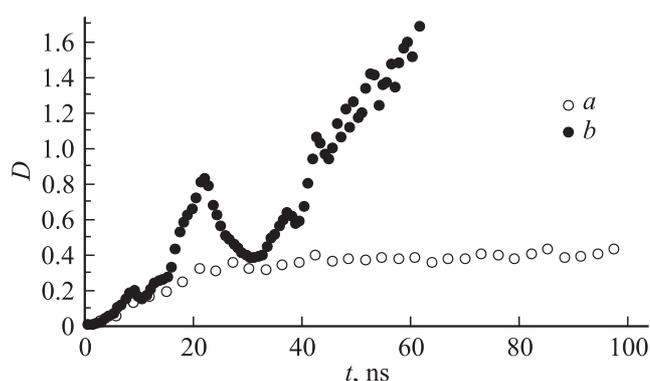


Рис. 7. Кинетика нестационарного оптического поглощения в тэне после воздействия пучком электронов: *a* — $E = 5 \text{ J/cm}^2$, *b* — $E = 15 \text{ J/cm}^2$.

чок при превышении определенной плотности энергии инициирует экзотермическую химическую реакцию в облученном слое, которая дает вклад в увеличение Q_v , а, следовательно, и в амплитуду давления P ударной волны, распространяющейся из облученного слоя кристалла.

Последний тезис, по нашему мнению, можно доказать измерением кинетики оптического поглощения, возникающего в кристалле в результате воздействия пучка электронов [4].

На рис. 7 приведены кинетики роста оптической плотности при воздействии электронным пучком с плотностью до и выше порога взрывного разложения. Из рис. 7 видно, что при превышении порога начинается быстрый рост оптического поглощения, величина которого за время 60–80 ns превышает динамический диапазон измерительного тракта. Очевидно, что рост оптического поглощения связан с образованием оптически активных дефектов, образующихся в результате экзотермической

химической реакции, возникающей в облученном слое в результате воздействия пучка электронов.

Отметим еще один факт. В работе [6] измерена скорость ударной волны, распространяющейся из облученной части кристалла к тыльной поверхности с помощью пьезоакустического детектора $V = 3800 \pm 200 \text{ m/s}$. Временной интервал τ на рис. 2 между временем воздействия пучка электронов и возникновением детонационной волны на тыльной поверхности образца толщиной $d = 1.6 \text{ mm}$ ($V = d/\tau$) соответствует указанному значению V в погрешности эксперимента, что является дополнительным аргументом в пользу приведенной выше модели.

Во второй группе экспериментов использовались монокристаллы с открытой тыльной поверхностью. В условиях нашего эксперимента воздействие электронным пучком даже с максимально возможной плотностью энергий 40 J/cm^2 , которую удалось вывести на образец, приблизив его на расстояние 2 mm от катода ускорителя, вызывает лишь частичный взрыв образца. При этом наблюдается распыление образца в направлении, перпендикулярном оси ввода излучения. Распыленный тэн оседает на стенках экспериментальной камеры в виде белого кольца, лежащего в плоскости образца. Одна из временных разверток свечения кристалла для такого эксперимента представлена на рис. 8.

Во всех случаях во время воздействия пучка электронов наблюдаются радиолуминесценция в облученном слое кристалла и свечение со стороны облучаемой поверхности, распространяющейся в вакуум со скоростью от 5000 m/s до 6000 m/s для различных образцов. В некоторых случаях, как на рис. 8, наблюдается начинающийся анодный пробой образца, развивающийся от тыльной поверхности, скорость которого превышает скорость развертки стрик-камеры (вертикальное свечение 4). Свечение, распространяющееся из облученной части кристалла со скоростью $V_2 = 3700 \text{ m/s}$, по-видимому, вызывается инициированием химической реакции в канале пробоя в результате прохождения ударной волны, которая формируется при поглощении пучка электронов и распространяется в направлении тыльной поверхности. Химическая реакция продолжается в облученном слое кристалла и сопровождается предвзрывной люминесценцией, которая достигает регистрируемого значения через 600 ns (свечение 3). Эти процессы, по-видимому, сопровождаются выделением газообразных продуктов, что приводит к взрыву облученного слоя и разбрасыванию необлученной части образца.

Причина отсутствия детонации в данном случае, по нашему мнению, состоит в том, что в случае открытой тыльной поверхности образца ударная волна отражается от акустически менее жесткой среды (вакуум) и при этом не усиливается, а диссипирует [11]. Наличие же электрических пробоев, по крайней мере в условиях наших экспериментов, а также [7], к детонации образца не приводит.

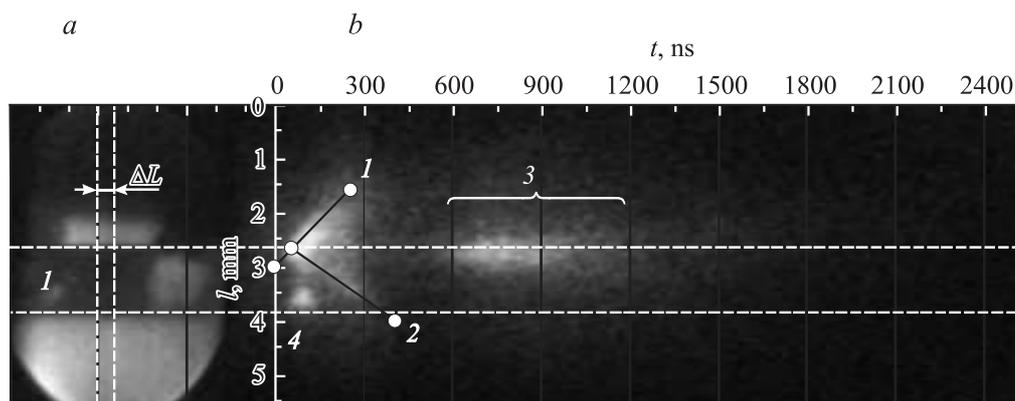


Рис. 8. Статическое изображение и временная развертка свечения образца с открытой тыльной поверхностью, регистрируемые стрик-камерой: *a* — статическое изображение образца на выходном экране стрик-камеры без оптической щели, возникающее при подсветке источником света: 1 — образец, ΔL — участок кристалла, выделяемый оптической щелью; *b* — временная развертка свечения участка кристалла тэна, выделенного оптической щелью, после воздействия импульсом электронов (воздействие пучком электронов осуществляется сверху). 1 — распространение свечения в вакуум ($V_1 = 5400$ м/с), 2 — распространение свечения по образцу из облученной части кристалла тэна ($V_2 = 3700$ м/с), 3 — предвзрывная люминесценция, 4 — зарождающийся анодный пробой.

Отметим также ошибочность выводов работы [8] о том, что наблюдаемое свечение является результатом свечения продуктов испарения тэна и плазмы, вылетающей из диода. С нашей точки зрения, результатов, опровергающих этот вывод, в настоящей работе приведено достаточно, поскольку никакого испарения образца не наблюдается (рис. 1).

Спектры радиолуминесценции, нестационарного оптического поглощения и последующего свечения, возникающего в результате детонации, описаны в работах [2–4], где дана возможная интерпретация начальных стадий взрывного разложения тэна.

Заключение

1. Электронный пучок в результате ионизации среды создает условия для инициирования химической экзотермической реакции в облученном слое кристалла, тепловыделение которой усиливает ударную волну, возникающую в результате воздействия пучка и распространяющуюся в необлученную часть образца.

2. При достижении ударной волной тыльной поверхности образца возможны два варианта:

— при наличии акустически жесткой преграды на тыльной стороне образца (практически важный случай, так как ВВ обычно находятся в оболочке) ударная волна усиливается и при достижении критического условия переходит в детонационную,

— в случае открытой тыльной поверхности ударная волна диссипирует и происходит только взрыв облученного слоя кристалла с разбрасыванием необлученной массы.

3. Во время воздействия импульса электронов наблюдаются радиолуминесценция в облученной части

кристалла, а также при достижении критической плотности пучка электронов взрыв поверхностного слоя кристалла в результате воздействия заряда, внесенного электронным пучком. Это явление имеет одинаковую природу для всех диэлектрических кристаллов.

Список литературы

- [1] Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 16. С. 23–28.
- [2] Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Тупицын Е.В. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 15. С. 91–95.
- [3] Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Швайко В.Н. // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. Вып. 2. С. 3–9.
- [4] Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Пузынин А.В. // Изв. вузов. Физика. 2008. Т. 51. Вып. 11/2. С. 104–106.
- [5] Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С. // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. Вып. 8/2. С. 249–252.
- [6] Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Пузынин А.В. // Химическая физика. 2010. Т. 29. Вып. 6. С. 54–57.
- [7] Олешко В.И., Лисицын В.М., Скрипкин А.С., Ципилев В.П. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 9. С. 37–43.
- [8] Морозов В.А., Савенков Г.Г., Брагин В.А., Кац В.М., Лукин А.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 5. С. 129–134.
- [9] Балычев И.Н., Вайсбурд Д.И., Геринг Г.И. // Изв. вузов. Физика. 1975. Вып. 3. С. 157–158.
- [10] Балычев И.Н., Вайсбурд Д.И., Геринг Г.И. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 7. С. 327–330.
- [11] Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр. Т. 1. М.: Физматлит, 2004. 832 с.
- [12] Dreger A.Z., Gruzdkov Y.A., Gupta Y.M., Dick J.J. // J. Phys. Chem. B. 2002. Vol. 106. P. 247–256.