

07;12

## **Длительность предвзрывной стадии при лазерном иницировании тетранитрата пентаэритрита**

© Э.Д. Алукер, А.Г. Кречетов, А.Ю. Митрофанов,  
Д.Р. Нурмухаметов, А.В. Тупицын

Кемеровский государственный университет  
Кемеровский филиал института химии твердого тела  
и механохимии СО РАН  
E-mail: lira@kemsu.ru

*В окончательной редакции 30 июня 2009 г.*

Предложен метод измерения длительности предвзрывной стадии тетранитрата пентаэритрита при импульсном иницировании первой гармоникой неодимового лазера (1060 nm). Исследовано влияние исходной температуры образца и энергии иницирования на длительность предвзрывной стадии. Предложена феноменологическая модель предвзрывной стадии, описывающая полученные экспериментальные результаты

PACS: 47.40.-x, 82.33.Vx

Лазерное иницирование энергетических материалов на протяжении уже достаточно длительного времени привлекает пристальное внимание исследователей [1,2]. Причиной этого неослабевающего интереса являются интереснейшие перспективы технического использования этого явления [1]. Одной из важных проблем при этом является поиск путей управления величиной пороговой энергии лазерного иницирования.

В связи с вышесказанным представляются достаточно интересным сильная температурная зависимость (термоактивационная) пороговой энергии иницирования тетранитрата пентаэритрита (ТЭН), обнаруженная недавно при иницировании первой гармоникой (1060 nm) неодимового лазера, и вывод о фототермическом характере иницирования (фотовозбуждение молекулы ТЭНа и термодиссоциация возбужденного состояния) [3].

Ясно, что фототермический характер инициирования должен проявляться и в зависимости кинетики начальных (предвзрывных) стадий реакции взрывного разложения от энергии инициирования и температуры образца.

Информацию об этих начальных стадиях обычно получают при исследованиях предвзрывных процессов, происходящих еще на твердофазной стадии реакции взрывного разложения, т.е. до начала диспергирования образца [4]. Первым шагом при этом является определение длительности предвзрывной стадии и изучение влияния на нее условий инициирования [4]. Именно это и явилось задачей данной работы.

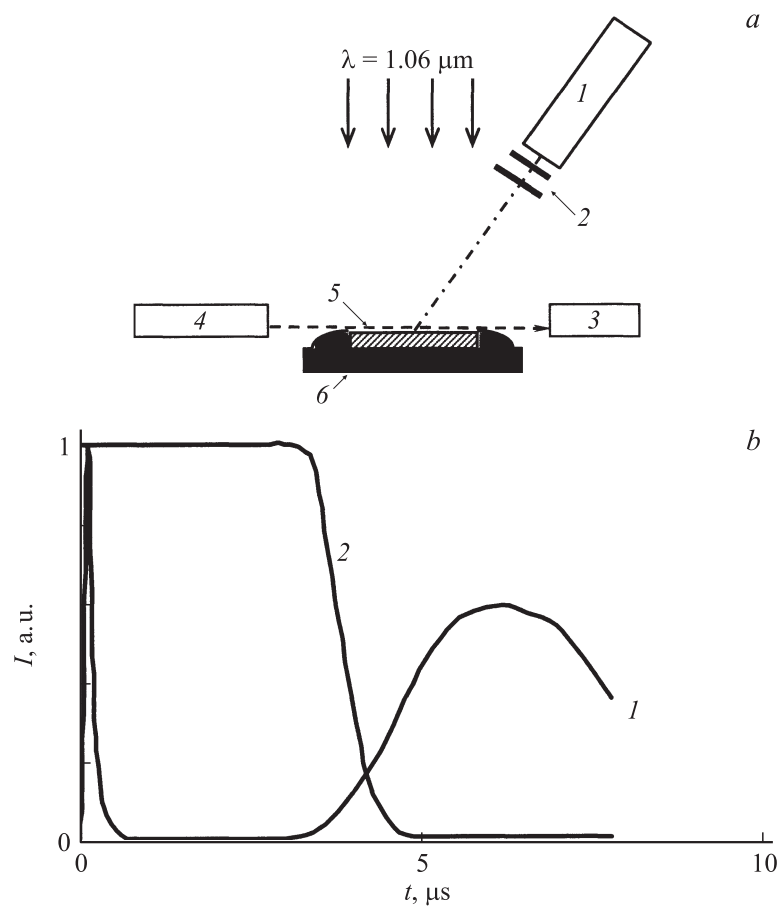
Использовалась следующая процедура подготовки образцов. Навеска порошка ТЭНа массой 20 мг помещалась в лунку медного нагревателя, нагревалась до 450 К (температура плавления — 414 К [3]), после чего нагреватель выключался и охлаждался до температуры, при которой производилось инициирование.

Для инициирования использовалась первая гармоника (1060 nm) импульсного лазера на фосфатном стекле, активированном неодимом, с длительностью импульса на полувысоте 20 ns. Лазерный пучок формировался с помощью линзы в пятно, полностью перекрывающее поверхность образца. Учитывая высокую прозрачность ТЭНа на длине волны инициирования [5], при толщинах образца порядка 1 mm распределение поглощенной энергии инициирующего импульса по образцу можно считать практически однородным. В этом случае [2] отпадает необходимость в перемещении зоны реакции по образцу (в частности, в формировании детонационной волны) и появляется возможность изучения реакции взрывного разложения „в чистом виде“, т.е. без усложнений, вносимых процессами ее распространения.

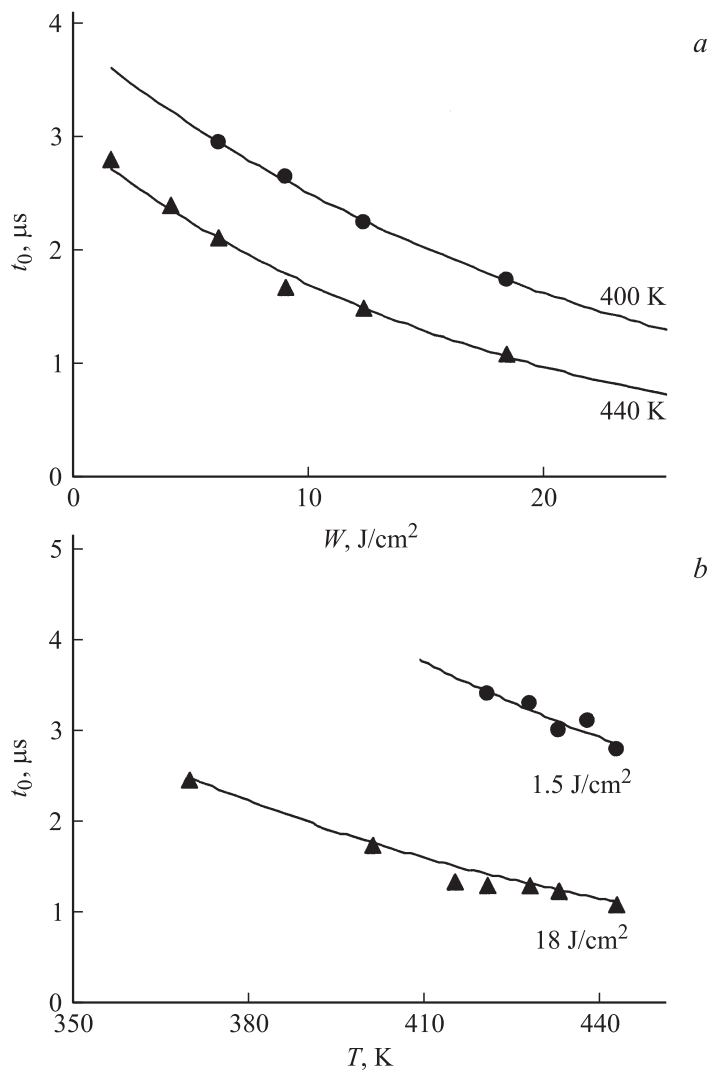
Длительность предвзрывной стадии оценивалась по промежутку времени между инициирующим импульсом и появлением свечения продуктов взрыва или по перекрыванию излучения зондирующего He–Ne-лазера, проходящего непосредственно над поверхностью образца, разлетающимися продуктами взрыва (рис. 1). Оба метода дают близкие результаты.

Исследовались зависимости длительности предвзрывной стадии  $t_0$  от плотности энергии инициирования и исходной температуры образца. Примеры таких зависимостей приведены на рис. 2.

Обсуждение полученных результатов начнем с рассмотрения достаточно простой феноменологической модели начальных стадий реакции, в основе которой лежат следующие предположения.



**Рис. 1.** Определение длительности предвзрывной стадии: *a* — схема измерений: 1 — ФЭУ, 2 — нейтральные светофильтры и узкополосный светофильтр с  $\lambda_0 = 512 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 8 \text{ nm}$ , 3 — фотодиод, 4 — зондирующий лазер, 5 — образец, 6 — медный нагреватель; *b* — осциллограммы токовых импульсов, 1 — ФЭУ, регистрирующий взрывное свечение, 2 — фотодиод, регистрирующий интенсивность зондирующего лазерного луча.



**Рис. 2.** Влияние плотности энергии иницирования  $W$  и температуры  $T$  на длительность предвзрывной стадии:  $\bullet$ ,  $\blacktriangle$  — экспериментальные точки; линии — аппроксимация выражением (6) при  $\tau = 1 \mu\text{s}$ ,  $E = 0.4 \text{ eV}$ ,  $N_{\text{max}}/\alpha_0 = 10^{-3} \text{ J}/\text{cm}^2$ .

1. На предвзрывной (твердофазной) стадии реакции размножение активных частиц (например, радикалов  $\text{NO}_2^*$  [6]) описывается экспоненциальной зависимостью<sup>1</sup>

$$N = N_0 \exp(t/\tau),$$

где  $N_0$  и  $N$  — начальная и текущая концентрации частиц,  $\tau$  — характерное время развития реакции,  $t$  — время, отсчитываемое от момента инициирования.

2. Критическими параметрами, определяющими возможность зарождения реакции, описываемой выражением (1), и ее прекращение, наступающее при диспергировании образца, являются средние концентрации активных частиц:  $N_{\min}$  — пороговая концентрация, т.е. минимальная начальная концентрация, обеспечивающая развитие реакции по закону (1) (выражение (1) справедливо только при  $N_0 \geq N_{\min}$ , при  $N_0 < N_{\min}$  реакция затухает), и  $N_{\max}$  — предельная концентрация, при которой происходит диспергирование (разрушение) образца, приводящее к прекращению размножения активных частиц по закону (1). Предполагается, что  $N_{\min}$  и  $N_{\max}$  являются характеристиками образца и не зависят от температуры и энергии инициирования.

3. Начальная концентрация активных частиц прямо пропорциональна энергии инициирования:

$$N_0 = \alpha W \quad (2)$$

и соответственно

$$W_{\min} = \alpha/N_{\min}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности,  $W$  — поверхностная плотность энергии инициирования,  $W_{\min}$  — пороговая поверхностная плотность энергии инициирования.

4. При независимости от температуры величины  $N_{\min}$  (п. 2) экспериментально наблюдаемая термоактивационная температурная зависимость порога инициирования [3] может наблюдаться (см. (3)) только при условии

$$\alpha = \alpha_0 \exp(-E/kT)^2. \quad (4)$$

<sup>1</sup> Такая зависимость характерна для цепного механизма реакции [7].

<sup>2</sup> Физический смысл коэффициентов  $\alpha$  и  $\alpha_0$  в (2)–(4):  $\alpha$  — концентрация активных частиц, генерируемых излучением с единичной поверхностной плотностью энергии,  $\alpha_0$  — то же при  $T \rightarrow \infty$ .

В случае фототермического механизма инициирования [3] величина  $E$  имеет простой физический смысл: энергия активации термодиссоциации фотовозбужденной молекулы.

С учетом предположений (1)–(4) для пороговой плотности энергии инициирования  $W_{\min}$  и длительности предвзрывной стадии  $t_0$  легко получить:

$$W_{\min} = W_0 \exp(E/kT), \quad (5)$$

где  $W_0 = N_{\min}/\alpha_0$ ;

$$t_0 = \tau [\ln(N_{\max}/\alpha_0 W) + E/kT]. \quad (6)$$

Разумность рассмотренной модели (а соответственно предположений (1)–(4), лежащих в ее основе) может быть оценена путем попытки описания экспериментальных результатов по температурной зависимости порога инициирования  $W_{\min}(T)$ , полученной в [3] выражением (5), и зависимостям длительности предвзрывной стадии  $t_0$  от температуры и плотности энергии иницирующего импульса (рис. 2) выражением (6).

Результаты такой попытки оказываются достаточно обнадеживающими. Выражение (5) хорошо описывает экспериментальные данные по температурной зависимости пороговой энергии инициирования, полученные в [3] при  $E = 0.4 \pm 0.05$  eV,  $N_{\min}/\alpha_0 \sim 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup>. Выражение (6) неплохо описывает экспериментальные данные по зависимости длительности предвзрывной стадии от температуры и плотности энергии инициирования (рис. 2) при  $E = 0.4 \pm 0.05$  eV,  $N_{\max}/\alpha_0 \sim 10^{-3}$  J/cm<sup>2</sup> и  $\tau = 0.7$  μs.

Существенно подчеркнуть, что если иницирующий импульс сразу создает концентрацию активных частиц, равную или большую предельной ( $N_0 > N_{\max}$ ), то предвзрывные процессы отсутствуют, т.е.  $t_0 = 0$ , следовательно область существования предвзрывных процессов:  $N_{\min} < N_0 < N_{\max}$ .

Возможность описания этих результатов в рамках рассмотренной модели, как нам представляется, следует рассматривать в качестве весомого довода в пользу возможности реализации фототермического механизма при лазерном инициировании ( $\lambda = 1060$  nm) ТЭНа.

## Список литературы

- [1] *Быстрое* инициирование ВВ. Особые режимы детонации // Сб. научн. статей под ред. В.И. Таржанова. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. 168 с.
- [2] *Focus on Combustion Resarch* Ed. S.Z. Jiang. New York: Nova Science Publishers Inc., 2006. P. 373.
- [3] *Алукер Э.Д., Кречетов А.Г., Лобойко Б.Г.* и др. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 5. С. 67–70.
- [4] *Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Белокуров Г.М.* и др. // ЖЭТФ. Т. 116. В. 5(11). С. 1676.
- [5] *Хрулева О.В., Филин В.П., Лобойко Б.Г.* и др. // Забабахинские научные чтения: Сборник материалов VII Международной конференции. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. С. 71.
- [6] *Kuklja M.M., Aduев B.P., Aluker E.D.* et al. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. N 7. P. 4156-4166.
- [7] *Семенов Н.Н.* О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М., 1958. 685с.