

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ТОПОГРАФИЯ ПРЕДВЗРЫВНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АЗИДА СЕРЕБРА

Б. П. Адуев, Э. Д. Алукер, А. Г. Кречетов, А. Ю. Митрофанов

Кемеровский государственный университет, 650043 Кемерово, lira@kemsu.ru

Впервые экспериментально показано, что при низких уровнях лазерного возбуждения предвзрывная люминесценция азидов серебра зарождается и развивается в отдельных очагах. При повышении уровня возбуждения среднее число очагов увеличивается, вплоть до образования гомогенного свечения.

Ключевые слова: азид серебра, очаговое зарождение, предвзрывная люминесценция.

Еще в основополагающих работах Боудена и Иоффе [1] была высказана гипотеза об очаговом характере зарождения реакции взрывного разложения взрывчатых веществ. В дальнейшем эта идея была несколько упрощена и применительно к тепловой теории взрыва получила широкое распространение в виде концепции так называемых «горячих точек» [2].

Основное отличие первоначальной идеи очагового зарождения реакции от концепции горячих точек сводится к следующему. Очаговое зарождение реакции предполагает наличие особых областей образца, в которых оказываются предпочтительными условия иницирования или развития реакции взрывного разложения. Физические условия, обеспечивающие эту предпочтительность, не конкретизируются. Поэтому в таком виде указанная идея применима для любого механизма иницирования и развития взрывного разложения (тепловой или цепной взрыв). В концепции же горячих точек очаги зарождения реакции отождествляются с областями локального разогрева.

Особенно прозрачный физический смысл концепция горячих точек приобретает при лазерном иницировании [3]. В этом случае под горячей точкой понимаются непрозрачные микровключения (например, частички сажи в образце), поглощение лазерного излучения которыми приводит к их разогреву до температур, достаточных для запуска реакции взрывного разложения в локальных областях образца [3]. В рамках этой упрощенной модели термин «горячая точка» приобретает буквальный смысл. Однако несмотря на то, что концепция горя-

чих точек почти общепринята, все доводы в ее пользу носят косвенный характер [3]. Прямые же экспериментальные наблюдения горячих точек отсутствуют.

Интересные возможности открылись после появления работ [4–8], в которых были обнаружены предвзрывные явления: проводимость и люминесценция образца, наблюдаемые во время индукционного периода, т. е. перед началом механического разрушения (а точнее, деформации) образца взрывчатого вещества в процессе взрывного разложения [7]. Анализ этих явлений показал, что в азидовых тяжелых металлов реализуется не тепловой, а цепной взрыв [6–8].

Обнаружение предвзрывной люминесценции дает возможность экспериментально проверить гипотезу Боудена и Иоффе об очаговом зарождении реакции взрывного разложения путем изучения топографии предвзрывной люминесценции.

Именно это и явилось целью данной работы. Следует подчеркнуть, что, как показано в [6–8], в азидовых тяжелых металлов зарождение цепной реакции взрывного разложения (а следовательно, и предвзрывной люминесценции) не связано с разогревом. Поэтому в случае обнаружения локальных областей зарождения предвзрывной люминесценции эти области могут и не отождествляться с точками локального разогрева — «горячими точками». То есть речь идет об экспериментальной проверке гипотезы Боудена и Иоффе в ее первоначальном виде.

### 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались нитевидные кристаллы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 01-03-32015а).

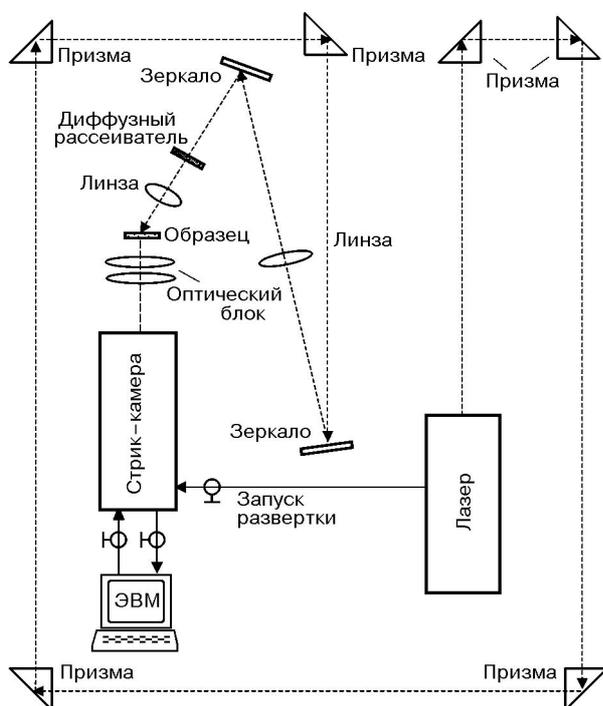


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки

азида серебра с характерными поперечными размерами  $100 \times 100$  мкм и длиной  $\geq 1$  мм.

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Инициирование осуществлялось импульсом YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера (длина волны  $\lambda = 1064$  нм, длительность импульса  $\tau = 30$  пс, плотность энергии  $W \approx 5 \div 100$  мДж/см<sup>2</sup>). Длина волны лазерного излучения соответствует области прозрачности кристалла (начало фундаментального поглощения —  $\lambda \approx 340$  нм [2]). Чтобы обеспечить равномерность распределения энергии, лазерный пучок сжимается линзой до диаметра 2 мм на диффузном рассеивателе из матового стекла. Рассеянное лазерное излучение с помощью второй линзы формируется на образце в пятно такого же диаметра. Все указанные условия инициирования обеспечивают однородность возбуждения кристалла.

Регистрация люминесценции кристалла осуществляется стрик-камерой «View-2A» («Росс-лимитед», Россия) на базе времяанализирующего электронно-оптического преобразователя (ЭОП), который осуществляет непрерывную развертку регистрируемого светового сигнала во времени. Предельное временное разрешение на самой короткой развертке составляет 10 пс. Оптический блок

проектирует увеличенное в пять раз изображение светящегося объекта на фотокатод ЭОП.

Ось изображения образца на выходном экране стрик-камеры ориентирована перпендикулярно направлению развертки. Поэтому регистрируемое изображение представляет собой временную развертку пространственного распределения свечения по длине кристалла. Это изображение считывается с выходного экрана ЭОП ПЗС-матрицей и через интерфейс передается в компьютер. Определенное по тест-объекту пространственное разрешение в плоскости объекта составляет 50 мкм.

Временное разрешение получаемых изображений определяется величиной  $\Delta t = d/v$  (см. рис. 2, а), где  $d$  — ширина изображения образца на выходном экране,  $v$  — скорость развертки.

Запуск развертки стрик-камеры осуществляется импульсом, формируемым электронной схемой лазера в момент выделения моноимпульса из цуга пикосекундных импульсов. Для компенсации времени задержки запуска развертки иницирующий импульс лазера проходит через оптическую линию задержки ( $\approx 150$  нс), состоящую из системы призм и зеркал.

Следует отметить, что аналогичный по идее эксперимент был выполнен еще в 80-е годы [9]. Однако техника регистрации того времени (высокоскоростная кинокамера) из-за недостаточно высокой чувствительности и сравнительно низкого временного разрешения ( $\approx 250$  нс) не позволила выделить предвзрывную люминесценцию. Поэтому полученные тогда результаты несли информацию только о заключительных стадиях процесса, связанных с разрушением образца.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При  $W \approx 5$  мДж/см<sup>2</sup>, т. е. вблизи порога инициирования, предвзрывная люминесценция всегда зарождается в нескольких разделенных точках (на рис. 2, а в области  $t = 20 \div 30$  нс от момента инициирования, совпадающего с началом развертки). Размеры светящихся областей увеличиваются к концу развертки.

С ростом плотности энергии возбуждения до  $W \approx 15$  мДж/см<sup>2</sup> число точек зарождения свечения, как правило, увеличивается

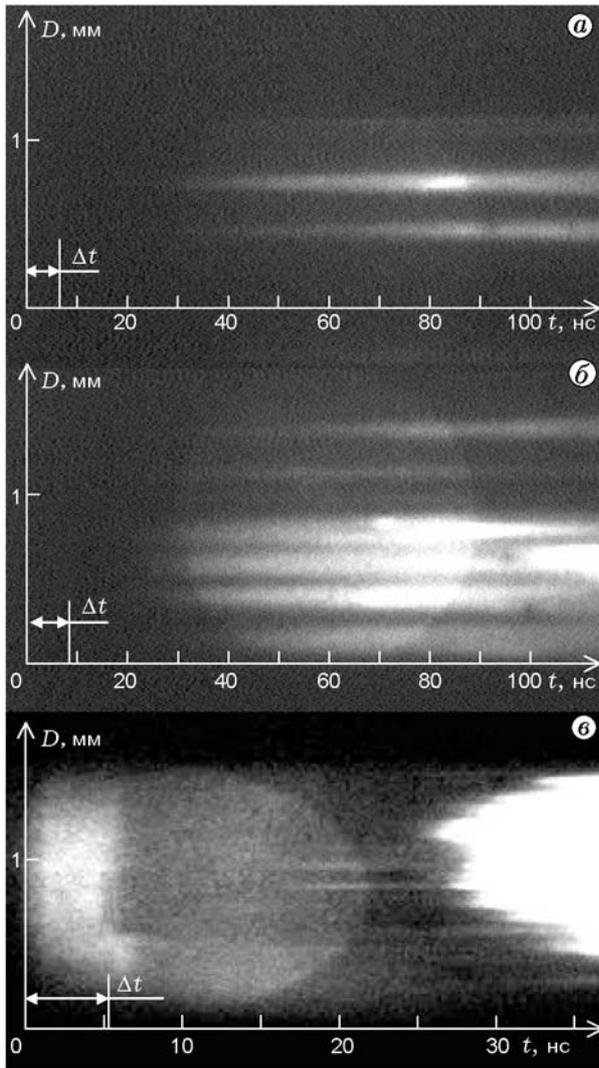


Рис. 2. Динамика распределения предвзрывной люминесценции  $\text{AgN}_3$  по длине кристалла при лазерном инициировании:

$a - W \approx 5 \text{ мДж/см}^2$ ;  $b - W \approx 15 \text{ мДж/см}^2$ ;  $c - W \approx 100 \text{ мДж/см}^2$ ; круги и овалы на рис. 2,  $b$  в области  $t = 20 \div 90 \text{ нс}$  и на рис. 2,  $c$  в интервале  $t = 0 \div 20 \text{ нс}$  связаны с фоновым свечением выходного экрана камеры; увеличение яркости в области  $t = 60 \div 90 \text{ нс}$  на рис. 2,  $b$  — артефакт, определяемый неравномерностью зонной характеристики фотокатода камеры

(рис. 2,  $b$ ). При времени от момента инициирования  $t \approx 100 \text{ нс}$  яркость свечения резко возрастает, что связано, по-видимому, с появлением свечения продуктов взрыва [10, 11].

При дальнейшем увеличении плотности энергии возбуждения до  $100 \text{ мДж/см}^2$  не удается наблюдать четкой картины зарождения люминесценции в отдельных точках (рис. 2,  $c$ ), а свечение продуктов взрыва проявляется уже при  $t \approx 30 \text{ нс}$ .

В этом режиме возбуждения в начале развертки удается наблюдать короткий пик гомогенного свечения (5 нс от начала развертки на рис. 2,  $c$ ). Специальные исследования показали, что длительность этого пика в пределах реального временного разрешения установки совпадает с длительностью возбуждающего импульса. Это серьезный довод в пользу того, что этот пик обусловлен фотолюминесценцией образца, возбуждаемой лазерным импульсом. Необходимо отметить, что однородность свечения в первом пике свидетельствует об отсутствии связи очагового зарождения предвзрывной люминесценции с возможной неоднородностью лазерного пучка (для устранения которой мы принимали специальные меры) и, следовательно, о наличии более глубоких причин неоднородности предвзрывной люминесценции на начальных стадиях процесса.

Приведенные результаты однозначно показывают, что при небольшом превышении порога инициирования предвзрывная люминесценция зарождается в отдельных точках, и только при определенных условиях инициирования, реализованных в [6, 10, 11], формируется гомогенное свечение, подробно исследованное в тех же работах.

Так как кинетика предвзрывной люминесценции позволяет «визуализировать» кинетику цепной реакции взрывного разложения [6–8], можно утверждать, что нам удалось наблюдать очаговый характер зарождения этой реакции.

Вопрос о физической природе очагов зарождения реакции остается пока открытым. В [8] в качестве таких очагов предлагаются дислокации. Проверка этой гипотезы может быть проведена путем поиска корреляции между координатами точек выхода дислокаций на поверхность и очагов зарождения предвзрывной люминесценции. Такие эксперименты в настоящее время готовятся.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Bowden F. P., Yoffe A. D.** Fast Reaction in Solids. London: Butterworths Scientific Publ., 1958. P. 242.
2. **Energetic Materials** / H. D. Fair, R. F. Walker (Eds). V. 1. New York: Plenum Press, 1977.
3. **Волкова А. А., Зинченко А. Д., Санин И. В. и др.** Временные характеристики инициирования ТЭНа лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 5. С. 760–766.
4. **Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Белокуров Г. М., Кречетов А. Г.** Предвзрывная проводимость азидов серебра // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62, № 3. С. 203–204.
5. **Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Захаров Ю. А. и др.** Взрывная люминесценция азидов серебра // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66, № 2. С. 101–103.
6. **Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Белокуров Г. М. и др.** Взрывное разложение азидов тяжелых металлов // Журн. эксперим. и теор. физики. 1999. Т. 116, № 5(11). С. 1676–1693.
7. **Предвзрывные явления в азидовых тяжелых металлах** / Ю. А. Захаров, Э. Д. Алукер, Б. П. Адуев, Г. М. Белокуров, А. Г. Кречетов. М.: ЦЭИ «Химмаш», 2002. С. 116.
8. **Kuklja M. M., Aduiev V. P., Aluker E. D., et al.** Role of electronic excitations in explosive decomposition of solids // J. Appl. Phys. 2000. V. 89, N 7. P. 4156–4166.
9. **Hagan J. T., Chaudri M. M.** Low energy laser initiation of single crystals of  $\beta$ -lead azide // J. Materials Sci. 1981. V. 16. P. 2457–2466.
10. **Aduiev V. P., Aluker E. D., Krechetov A. G., and Mitrofanov A. Yu.** Explosive luminescence of heavy metal azides // Physica Status Solidi (b). 1998. V. 207. P. 535–540.
11. **Aduiev V. P., Aluker E. D., Kuklja M. M., et al.** Luminescence of lead azide induced by the electron accelerator pulse // J. Luminescence. 2000. V. 91. P. 41–48.

*Поступила в редакцию 6/IX 2002 г.,  
в окончательном варианте — 30/IV 2003 г.*

---