

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛА МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ АЗИДА СЕРЕБРА, ИНИЦИИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

В. Г. Кригер, А. В. Каленский, А. А. Звеков

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

Экспериментально определено начало механического разрушения монокристалла азид серебра в условиях импульсного лазерного инициирования. Результаты получены тремя независимыми методиками: сравнительным измерением сигнала взрывного свечения, регистрируемого со всего объема экспериментальной ячейки и из зоны воздействия; измерением сигнала проводимости продуктов взрыва; измерением сигнала акустического датчика. Показано, что момент начала разрушения образца и выброса продуктов взрыва приходится на область максимума интенсивности свечения, регистрируемого из зоны воздействия импульса.

Ключевые слова: взрывное разложение, азиды тяжелых металлов, лазерное импульсное инициирование, кинетика взрывного свечения.

### ВВЕДЕНИЕ

Кинетические закономерности взрывного разложения прессованных таблеток и кристаллов азидов тяжелых металлов при инициировании импульсным излучением исследовались в работах коллективов В. П. Ципилева и Э. Д. Алукера (см., например, [1–4]). Для правильной интерпретации экспериментальных результатов и дискриминации механизма взрывного разложения необходимо определить момент перехода вещества в газовую фазу и его положение на зависимости свечения от времени. С этой целью в работе [2] были получены с высоким временным разрешением спектры поглощения и свечения макрокристаллов и нитевидных кристаллов азид серебра в процессе взрывного разложения при инициировании пикосекундным импульсным излучением неодимового лазера. На основании анализа данных спектров авторы пришли к выводу, что разлет продуктов начинается через  $\approx 3.5$  мкс после инициирования взрывного разложения [3], и интерпретировали это время как длительность «предвзрывной стадии» реакции, в течение которой наблюдаются явления «предвзрывной проводимости» и «предвзрывной люминесценции» [2]. В работе [1] было исследовано взрывное разложение прессованных поликристаллических образцов азид

серебра и свинца в условиях инициирования лазерным излучением наносекундной длительности. Авторы [1] пришли к выводу, что взрывное свечение появляется почти одновременно с разрушением образца и обусловлено исключительно разлетом продуктов. Таким образом, результаты [1] ставят под сомнение полученную в работе [2] длительность стадий разложения, протекающих в еще твердом образце, и само наличие «предвзрывных эффектов». Цель настоящей работы — с использованием нескольких независимых методик определить начало механического разрушения кристалла и появления продуктов взрыва при инициировании азид серебра импульсным лазерным излучением.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовались нитевидные кристаллы азид серебра (АС) и макрокристаллы с характерными размерами  $10 \times 0.2 \times 0.05$  мм и  $0.5 \times 0.4 \times 0.4$  мм соответственно. Методика синтеза образцов приведена в работе [5].

Экспериментальные исследования выполнены на установке В. П. Ципилева, описание которой приведено в [6]. Источник оптического излучения — одномодовый одночастотный неодимовый лазер ( $\lambda = 1060$  нм). Максимальная энергия излучения лазера 20 Дж, длительность импульса на полувысоте — 30 нс. Для регистрации вспышки свечения использовались два фотоэлектронных умножителя Н6779-01

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-03-01099).

(ФЭУ). Первый ФЭУ регистрировал взрывное свечение в области спектра  $500 \div 600$  нм из зоны лазерного воздействия — зонное ФЭУ (методика регистрации приведена в [6]). Вторым ФЭУ был установлен традиционным способом и регистрировал в той же спектральной области свечение всего объема экспериментальной ячейки (ФЭУ панорамного обзора). Методика синхронизации сигналов описана в [6]. Информация о кинетических параметрах взрывного процесса поступала на цифровой четырехлучевой запоминающий осциллограф типа LeCroy и далее на компьютер. Временное разрешение использованных ФЭУ составляло 0.1 нс, частота оцифровки сигнала и временное разрешение осциллографа — 1 нс.

Для определения времени начала разрушения образца и разлета продуктов взрыва использованы следующие методики.

1. Регистрация кинетики свечения зонным ФЭУ и ФЭУ панорамного обзора в одном спектральном диапазоне. Сравнение сигналов обоих ФЭУ позволяет выделить свечение продуктов реакции, вылетевших из области наблюдения зонного ФЭУ. В качестве образцов использовались макрокристаллы АС, размеры которых были меньше диаметра иницирующего пучка лазера (рис. 1, а). Для получения разности зафиксированные сигналы свечения нормировались на максимум, после чего сигнал ФЭУ панорамного обзора сдвигался относительно сигнала зонного ФЭУ таким образом, чтобы совпали передние фронты обоих сигналов. Разностный сигнал вычислялся по соотно-

шению

$$\Delta I(t) = I_2(t - t_s) - I_1(t),$$

где  $I_1(t)$  — нормированный сигнал зонного ФЭУ,  $I_2(t)$  — нормированный сигнал ФЭУ панорамного обзора,  $t_s$  — время сдвига.

2. Исследование сигналов токового импульса в бесконтактном варианте дает прямую информацию о процессах разлета продуктов реакции, представляющих собой ионизованный газ. При исследовании проводимости использовались нитевидные кристаллы АС. Схема расположения образца и электродов представлена на рис. 1, б. Описание измерительной схемы, работающей в режиме «ключа», приведено в работе [1]. Данная схема позволяет по появлению токового сигнала определить момент времени, в который происходит разрушение образца [1].

3. Исследование сигнала акустического датчика, фиксирующего импульс давления, возникающий при взрывном разложении, также дает возможность оценить начало механического разрушения образца. Использованный датчик тарирован в области исследуемых длительностей нагружения, имеет чувствительность порядка 0.15 В/бар и временное разрешение 5 нс [1]. При исследовании акустического сигнала использовались нитевидные и макрокристаллические образцы АС.

В [2] было показано, что взрывное разложение вблизи порога иницирования имеет очаговый характер, а при двукратном и более превышении критической плотности энергии иницирование становится практически гомогенным. Поэтому во всех проведенных экспериментах плотность энергии иницирующего импульса превышала критическую величину более чем в два раза.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена типичная осциллограмма сигналов иницирующего импульса, свечения, зафиксированного ФЭУ панорамного обзора, зонным ФЭУ, и их разности. Размер лазерного пучка превышал размер образца. Как следует из рис. 2, разность сигналов появляется в районе максимума сигнала свечения из зоны воздействия и первого максимума сигнала свечения, фиксируемого ФЭУ панорамного обзора (со всего объема экспериментальной ячейки). Этот результат согласуется с данными работ [1, 4], в которых также наблюдались многочисленные максимумы на кривой

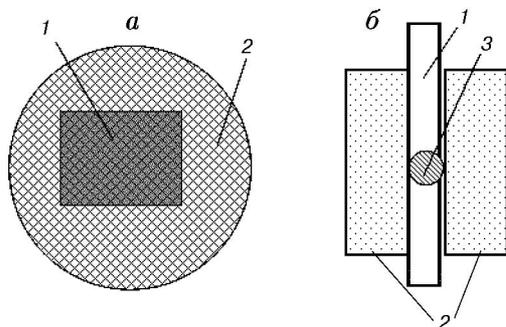


Рис. 1. Схема эксперимента:

а — расположение образца в лазерном пучке при сравнительном исследовании сигналов обзорного и зонного ФЭУ: 1 — макрокристалл, 2 — лазерный пучок; б — расположение образца и контактов при исследовании токового импульса: 1 — нитевидный кристалл АС, 2 — электроды, 3 — лазерный пучок

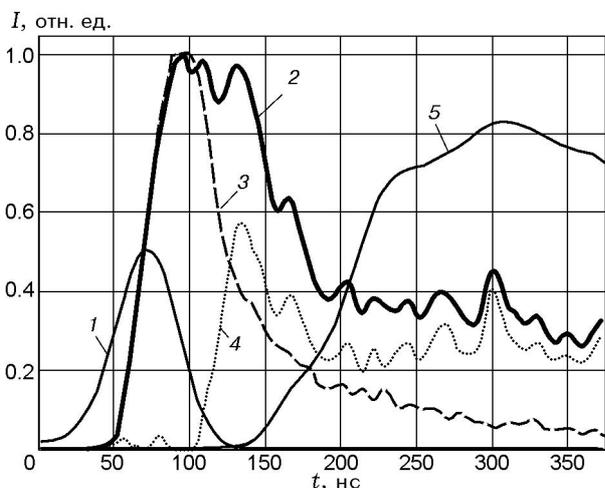


Рис. 2. Оциллограмма взрывного разложения:

1 — инициирующий импульс, 2 — обзорное ФЭУ, 3 — зонное ФЭУ, 4 — разность сигналов обзорного и зонного ФЭУ, 5 — акустический сигнал, сдвинутый на время задержки

взрывного свечения, полученные при использовании ФЭУ панорамного обзора. В [1, 4] первый максимум на зависимости интенсивности свечения от времени интерпретирован как результат развития реакции в зоне воздействия, а остальные локальные максимумы связывались с взаимодействием разлетающихся продуктов взрыва с воздухом и подложкой.

На рис. 3 приведены результаты измерения свечения совместно с сигналом проводимо-

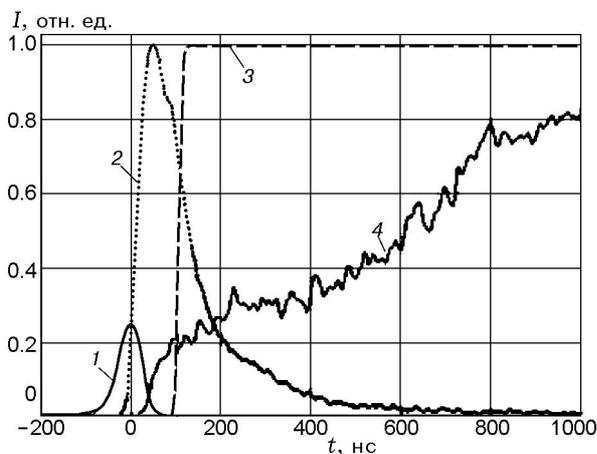


Рис. 3. Оциллограмма взрывного разложения:

1 — инициирующий импульс, 2 — зонное ФЭУ, 3 — токовый сигнал, 4 — обзорное ФЭУ

сти продуктов взрывного разложения при наименьшем зазоре между кристаллом и контактами, не превышавшем 20 мкм. По результатам инициирования 10 кристаллов в этой серии экспериментов получено, что начало роста токового сигнала приходится на область максимума сигнала, зафиксированного зонным ФЭУ, с отставанием от него, как правило, на  $5 \div 10$  нс. Сравнение времени появления токового сигнала с сигналом свечения, зафиксированным ФЭУ панорамного обзора, в данном случае малоинформативно, так как при использовании нитевидного кристалла и малой зоне воздействия (см. рис. 1, б) сигнал свечения почти полностью связан с процессом распространения реакции по образцу [1, 4] после начала разлета продуктов взрыва из созданного излучением очага реакции.

Импульс давления, возникающий в объеме АС при взрывном разложении, фиксировался акустическим датчиком (сигнал 5 на рис. 2). На рис. 4 приведено отношение времени появления акустического сигнала ( $t_a$ ) к времени максимума свечения ( $t_{max}^z$ ) из зоны воздействия. Видно, что время появления акустического сигнала приходится на задний фронт сигнала зонного ФЭУ, значение отношения  $t_a/t_{max}^z = 1.22 \pm 0.09$  не зависит от плотности энергии импульса.

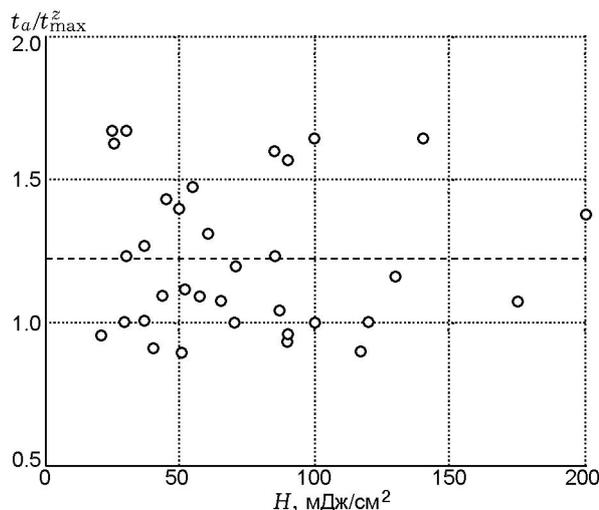


Рис. 4. Зависимость отношения времени появления акустического сигнала к времени максимума свечения из зоны воздействия от плотности энергии инициирования:

точки — эксперимент, штриховая линия — среднее значение

Полученные в настоящей работе данные по началу разлета продуктов взрывного разложения монокристаллов АС отличаются от результатов, представленных в [1], где исследовалось инициирование взрывного разложения прессованных поликристаллических образцов азидов серебра и свинца. По-видимому, указанное отличие связано с неоднородным поглощением энергии прессованной таблеткой. Это приводит к более раннему выбросу вещества. В результате разлет продуктов взрыва поликристаллического образца должен начинаться на этапе увеличения интенсивности взрывного свечения из зоны воздействия, что и наблюдали авторы работы [1].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных экспериментальных результатов, полученных с использованием трех независимых методик, следует, что момент механического разрушения кристалла азидов серебра в процессе взрывного разложения и начало разлета продуктов приходится на область максимума и начало заднего фронта сигнала свечения из зоны облучения. Таким образом, экспериментально показано существование свечения кристалла азидов серебра до начала разлета продуктов взрыва, которое ставилось под сомнение в работе [1]. Промежуток времени, в течение которого наблюдалось данное свечение, составляет  $\approx 50$  нс, что значительно меньше длительности «предвзрывной стадии» ( $\approx 3$  мкс), приведенной в [2].

Авторы выражают глубокую благодарность В. М. Лисицыну за постоянный интерес

к работе и В. П. Ципилеву за помощь в проведении экспериментов, а также Н. М. Федоровой за синтез образцов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Корепанов В. И., Лисицын В. М., Олешко В. И., Ципилев В. П.** К вопросу о кинетике и механизме взрывного разложения азидов тяжелых металлов // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 1. — С. 106–119.
2. **Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Белокуров Г. М., Захаров Ю. А., Кречетов А. Г.** Предвзрывные явления в азидовых тяжелых металлов. — М.: ЦЭИ «Химмаш», 2002.
3. **Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Кречетов А. Г., Сахарчук Ю. П.** Спектры предвзрывного оптического поглощения азидов серебра // Письма в ЖТФ. — 1998. — Т. 24, № 16. — С. 31–34.
4. **Кригер В. Г., Каленский А. В., Ципилев В. П., Боровикова А. П.** Кинетика взрывного разложения азидов серебра // Ползуновский вест. — 2006. — № 2–1. — С. 77–82.
5. **Федорова Н. М., Ананьева М. В., Кригер В. Г., Ципилев В. П.** Синтез и чувствительность микрокристаллов азидов серебра к импульсному излучению // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: докл. II науч.-практ. конф. молодых ученых 25 сент. 2008 г., г. Бийск. — Бийск: Изд-во БТИ АлтГТУ, 2008. — С. 17–22.
6. **Ципилев В. П.** Стенд для исследования кинетики взрывного разложения конденсированных сред // Изв. ТПУ. — 2003. — Т. 306, № 4. — С. 99–103.

*Поступила в редакцию 30/XII 2008 г.,  
в окончательном варианте — 26/IX 2009 г.*