

## ВЗРЫВНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЗИДА СЕРЕБРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДИАМЕТРАХ ЗОНЫ ОБЛУЧЕНИЯ

В. Г. Кригер<sup>1</sup>, В. П. Ципилев<sup>2</sup>, А. В. Каленский<sup>1</sup>, А. А. Звеков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кемеровский государственный университет, 650043 Кемерово, kriger@kemsu.ru

<sup>2</sup>Томский государственный политехнический университет, 634050 Томск

Проведено экспериментальное исследование пороговой энергии инициирования взрывного разложения монокристаллов азидов серебра импульсным лазерным излучением при различных диаметрах зоны облучения. Установлено, что при уменьшении диаметра зоны облучения от 1000 до 10 мкм пороговая плотность энергии инициирования взрыва повышается более чем на порядок. Показано, что эту зависимость нельзя объяснить светорассеянием, диффузией реагентов или передачей тепла из зоны реакции.

Ключевые слова: азиды тяжелых металлов, импульсное лазерное излучение, взрывное разложение, критерии инициирования, передача энергии химической реакции.

### ВВЕДЕНИЕ

Зависимость пороговой энергии инициирования взрывного разложения прессованных порошков азидов свинца от диаметра зоны облучения при лазерном импульсном воздействии достаточно полно исследована в [1]. Было установлено, что при уменьшении диаметра зоны облучения в диапазоне  $2000 \div 10$  мкм пороговая плотность энергии ( $H(d)$ ) значительно возрастает, а пороговое значение интегральной энергии импульса ( $W(d)$ ) уменьшается. При этом меняется энергетический критерий перехода реакции во взрыв: в случае «широких» пучков ( $d > 200$  мкм) им является критическая плотность энергии в импульсе, а для «узких» пучков ( $d < 50$  мкм) — критическая энергия импульса. Наличие размерного эффекта авторы работы [1] связывали с особенностями светорассеяния в объеме прессованных таблеток. Поскольку в монокристаллах азидов серебра светорассеянием в первом приближении можно пренебречь [2], следует ожидать, что причина размерного эффекта иная, чем предложенная в [1]. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование критических параметров инициирования взрывного разложения азидов серебра при различных диаметрах зоны облучения.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучение пороговой энергии инициирования проводилось на лазерном стенде, описанном в [3]. Исследовались макрокристаллы (характерные размеры  $1 \times 1 \times 0.3$  мм) и нитевидные кристаллы ( $10 \times 0.3 \times 0.05$  мм) азидов серебра. Визуально кристаллы не имели заметных внутренних дефектов и обладали зеркальными внешними гранями. Концентрация основных примесей (Fe, Si, Ca, Mg, Al, Na) не превышала  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Методика синтеза образцов приведена в работах [4, 5]. Иницирование взрывного разложения осуществлялось импульсом неодимового лазера. Длина волны излучения лазера (1060 нм) приходится на область примесного поглощения, что позволяло инициировать реакцию взрывного разложения однородно по глубине образца [2]. Максимальная энергия излучения составляла 20 Дж, длительность импульса была постоянной и равной  $t = 30$  нс. Метод сопряженных плоскостей позволил формировать на поверхности кристаллов пучки высокой однородности диаметром  $1000 \div 10$  мкм [3]. В качестве пороговой энергии инициирования принимали энергию импульса, при которой вероятность взрыва составляла 50 %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При уменьшении диаметра облученной зоны в диапазоне  $1000 \div 10$  мкм критическая энергия инициирования взрывного разложения  $W$  уменьшается, в то же время критиче-

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

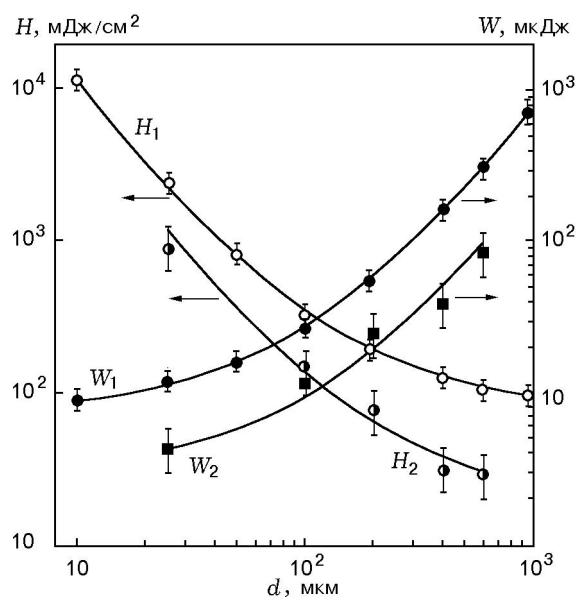


Рис. 1. Зависимости критической плотности энергии и критической энергии взрывного разложения азида серебра от диаметра зоны облучения:

$H_1, W_1$  — макрокристаллы;  $H_2, W_2$  — нитевидные кристаллы

ская плотность энергии иницирования  $H = 4W(d)/\pi d^2$  возрастает более чем на порядок (рис. 1). Размерный эффект становится заметным при  $d < 600$  мкм, а при  $d = 200$  мкм пороговая плотность энергии удваивается. Зависимости  $W(d)$  и  $H(d)$  для нитевидных и макрокристаллов подобны.

Влияние диаметра зоны облучения на порог иницирования можно объяснить передачей энергии из образованного излучением очага реакции, размер которого в первом приближении совпадает с зоной воздействия лазерного импульса. При уменьшении диаметра исходного очага реакция должна значительно возрастет доля энергии, передаваемая окружающим очаг невозбужденным областям кристалла. Увеличение относительного оттока энергии из очага реакции при уменьшении диаметра зоны облучения  $d$  должно приводить к возрастанию критической плотности энергии иницирования, что и наблюдается экспериментально (см. рис. 1).

Полученные зависимости энергии и плотности энергии на пороге иницирования макро- и нитевидных образцов удовлетворительно описываются эмпирическими выражениями:

$$H = H_\infty(1 + 2r_0/d)^2, \quad (1)$$

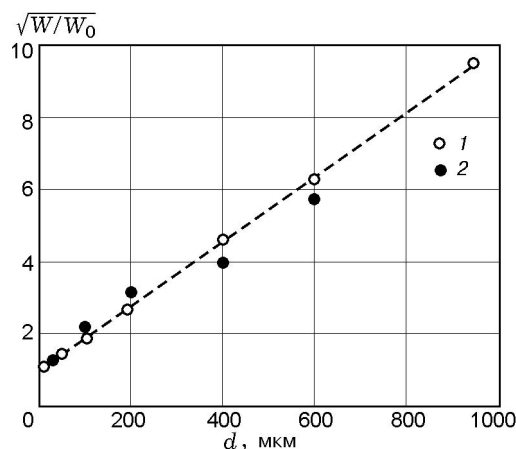


Рис. 2. Зависимость критической энергии иницирования взрыва азида серебра от диаметра зоны облучения в координатах уравнения (2):

1 — макрокристаллы; 2 — нитевидные кристаллы

$$W = W_0(1 + d/2r_0)^2. \quad (2)$$

Во всем исследованном диапазоне диаметров облученной зоны зависимости  $H(d)$  и  $W(d)$  хорошо спрямляются в координатах уравнений (1), (2), что свидетельствует о постоянстве величины  $r_0$  при изменении диаметра зоны облучения на два порядка (рис. 2). Отметим, что значение параметра  $r_0 = 60 \pm 10$  мкм одинаково для макро- и нитевидных кристаллов. Величину  $r_0$  можно интерпретировать как эффективную длину передачи энергии — толщину слоя азида, в которую происходит отток энергии из образованного излучением очага реакции.

Из полученных данных следует, что для монокристаллов, как и для прессованных таблеток [1], при изменении диаметра зоны облучения меняется критерий иницирования. При широких пучках ( $d > 200$  мкм) критерием иницирования является критическая плотность энергии импульса ( $H_\infty = 90 \pm 10$  и  $30 \pm 10$  мДж/см<sup>2</sup> для макро- и нитевидных кристаллов соответственно), при узких ( $d \leq 50$  мкм) — критическая энергия иницирования ( $W_0 = 7.0 \pm 0.8$  и  $4.7 \pm 1.6$  мкДж).

Полученные результаты позволяют оценить скорость передачи энергии из очага реакции, образованного лазерным излучением, как отношение эффективного расстояния передачи энергии  $r_0$  к времени развития реакции в зоне облучения  $\tau \approx 10^{-7}$  с [6]:  $v \approx r_0/\tau \approx 500$  м/с. В случае диффузии реагентов характерная скорость составляет  $v = \sqrt{D/\tau} \approx 20$  м/с, где  $D =$

0.4 см<sup>2</sup>/с — коэффициент диффузии электронных возбуждений в условиях взрывного разложения [7]. Аналогичная оценка скорости теплопередачи (температуропроводность азидов серебра  $\approx 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с [8]) дает  $v \leq 1$  м/с. Таким образом, полученные значения скорости передачи энергии позволяют исключить из возможных причин размерного эффекта процессы теплопереноса и диффузии из очага реакции, поскольку они протекают со значительно меньшими скоростями.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пороговая плотность энергии инициирования кристаллов азидов серебра увеличивается более чем на порядок при уменьшении диаметра зоны облучения в интервале 1 000 ÷ 10 мкм. Наблюдаемая зависимость связана с передачей энергии из образованного излучением очага реакции в невозбужденную часть кристалла со скоростью  $\approx 500$  м/с. Экспериментально определено эффективное расстояние передачи энергии в макро- и нитевидных кристаллах азидов серебра —  $60 \pm 10$  мкм.

Авторы выражают глубокую благодарность Н. М. Федоровой за синтез образцов и профессору В. М. Лисицыну за помощь в проведении экспериментов и постоянный интерес к работе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Е. И., Ципилев В. П. Размерный эффект при инициировании прессованного азидов свинца лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 5. — С. 77–81.
2. Диамант Г. М., Сидорин Ю. Ю., Дзюбенко Ф. А. Оптические характеристики кристаллов азидов серебра // Ред. журн. «Прикл. спектроскопия». — Минск, 1987. — Деп. в ВИНТИ 10.06.86, № 618-B87.
3. Ципилев В. П. Стенд для исследования кинетики взрывного разложения конденсированных сред // Изв. ТПУ. — 2003. — Т. 306, № 4. — С. 99–103.
4. Иванов Ф. И., Зуев Л. Б., Лукин М. А., Мальцев В. Д. О выращивании нитевидных кристаллов азидов серебра и свинца // Кристаллография. — Т. 28, № 1. — С. 194–195.
5. Куракин С. И., Диамант Г. М., Пугачев В. М. Морфология кристаллов азидов серебра, выращенных из гидроксида аммония // Изв. АН СССР. Сер. Неорганич. материалы. — 1990. — Т. 26, вып. 11. — С. 2301–2304.
6. Кригер В. Г., Каленский А. В., Ципилев В. П., Боровикова А. П. Кинетика взрывного разложения азидов серебра // Ползуновский вестн. — 2006. — № 2–1. — С. 77–82.
7. Кригер В. Г., Каленский А. В., Ананьева М. В., Боровикова А. П. Зависимость критической плотности энергии инициирования взрывного разложения азидов серебра от размеров монокристаллов // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 2. — С. 76–78.
8. Phung P. V. Initiation of explosives by high-energy electrons // J. Chem. Phys. — 1970. — V. 53, N 7. — P. 2906–2913.

*Поступила в редакцию 4/V 2008 г.*