

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ АЗИДА СЕРЕБРА

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

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

Измерена скорость распространения цепной реакции взрывного разложения по нитевидному кристаллу азид серебра (≈ 1500 м/с). Измеренное значение скорости связывается со скоростью движения диффузионного фронта дырок, генерируемых в процессе взрывного разложения.

Ключевые слова: азид серебра, цепная реакция, распространение, скорость, диффузия дырок.

В настоящее время надежно установлен механизм распространения реакции взрывного разложения в случае теплового взрыва — это детонационные волны [1, 2]. Однако в случае цепного взрыва возможность использования механизма детонационных волн неочевидна. Дело в том, что температура и давление детонационной волны могут не оказывать прямого влияния на скорость цепной реакции или же влиять достаточно косвенно [3].

Поэтому значительный интерес представляет исследование реакции взрывного разложения в системах, в которых цепной механизм взрыва установлен достаточно надежно. В [4, 5] было показано, что именно такая ситуация реализуется в азидах тяжелых металлов, причем «визуализация» цепной реакции может осуществляться путем регистрации предвзрывной люминесценции, кинетика которой отражает кинетику цепной реакции взрывного разложения.

Цель данной работы — исследование распространения предвзрывной люминесценции AgN_3 за пределы области инициирования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследовались нитевидные кристаллы азид серебра с характерными поперечными размерами 100×100 мкм и длиной ≥ 1 мм. Иницирование осуществлялось импульсом YAG:Nd^{3+} -лазера (длина волны $\lambda = 1064$ нм, длительность импульса $\tau = 30$ пс, плотность энергии $W \approx 5 \div 100$ мДж/см²).

Методика измерений аналогична описанной в [6], за исключением условий облучения

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 2180).

образца, показанных на рис. 1. Часть образца O перекрывалась непрозрачным для лазерного излучения экраном Ξ . По распространению свечения за пределы необлученной области можно было проводить прямые измерения скорости распространения цепной реакции взрывного разложения по кристаллу.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена типичная развертка изображения светящейся области кристалла AgN_3 . Видно, что светящаяся область распространяется со временем в область геометрической тени. Скорость распространения свечения постоянна, и ее значение, осредненное по результатам опытов с двадцатью образцами,

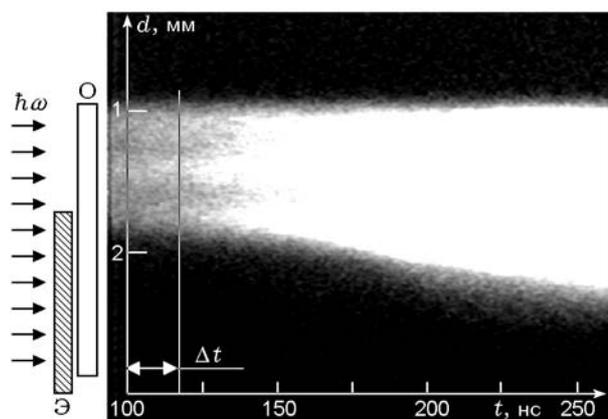


Рис. 1. Схема облучения и картина распространения реакции по кристаллу AgN_3 :

Δt — временное разрешение для конкретного кристалла; начало регистрации $t = 100$ нс после импульса иницирования связано с техническими причинами

составляет (1500 ± 300) м/с. Согласно данным [4, 5] это свечение представляет собой предвзрывную люминесценцию, сопровождающую цепную реакцию взрывного разложения азидов тяжелых металлов. Таким образом, измеренная скорость представляет собой скорость распространения фронта цепной реакции по длине образца*. Согласно модели звена цепи реакции взрывного разложения азидов тяжелых металлов, предложенной в [4], необходимым условием пространственного распространения реакции является миграция дырок в невозбужденную зону образца. Простейший механизм такой миграции — диффузия дырок (или амбиполярная миграция дырок и электронов).

Проанализируем эту возможность. Прежде всего, следует подчеркнуть качественное отличие поставленной задачи от стандартных диффузионных задач [8]. В стандартных задачах рассматривается диффузия из стационарного источника, что приводит к более или менее плавному падению концентрации диффундирующих частиц с увеличением расстояния от источника (так называемые диффузионные профили). В нашем случае концентрация диффундирующих частиц нарастает в результате цепной реакции, что должно приводить к «обострению» диффузионных профилей и появлению более или менее выраженного «диффузионного фронта», разделяющего области цепной реакции и невозмущенного кристалла. Такая задача была рассмотрена еще в 1940-е годы в связи с проблемой оценки роли диффузии в распространении пламени. Для оценки скорости диффузионного фронта v было предложено следующее выражение:

$$v = \sqrt{\alpha D}, \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии, α^{-1} — характерное время цепной реакции.

Выражение (1) в работе [9] не выводилось, а записывалось исходя из общефизических соображений размерностей входящих в него величин. Авторы [9] считают, что выражение (1) позволяет правильно оценить порядок величины v .

Для того чтобы сделать более прозрачными условия применимости выражения (1), це-

* В пределах погрешности эксперимента наблюдаемое значение скорости совпадает со скоростью низкоскоростной детонации в азиды тяжелых металлов. Следует подчеркнуть, что природа низкоскоростной детонации неясна до настоящего времени [7].

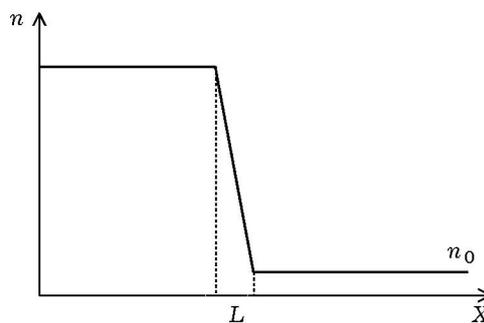


Рис. 2. Схема распределения концентрации дырок в образце

лесообразно показать, как оно выводится.

Рассмотрим одномерную задачу (ось X направим вдоль оси образца).

Первый закон Фика для одномерного случая записывается в виде

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (2)$$

где J — диффузионный поток, n — концентрация диффундирующих частиц (дырок в данном случае). По определению

$$J = nv, \quad (3)$$

где v — скорость движения диффузионного фронта.

С учетом роста концентрации дырок за счет цепной реакции, происходящей позади диффузионного фронта, распределение дырок по длине образца можно приближенно представить приведенной на рис. 2 зависимостью, полученной из (2):

$$\frac{\partial n}{\partial x} \approx \frac{n - n_0}{L}, \quad (4)$$

где n_0 — концентрация дырок в невозбужденной части образца, L — диффузионная длина, приближенно совпадающая в рамках рассматриваемой модели с шириной диффузионного фронта. Поскольку величина n на много порядков превосходит величину n_0 [4, 5], выражение (4) можно упростить:

$$\frac{\partial n}{\partial x} \approx \frac{n}{L}. \quad (5)$$

Физический смысл L в данном случае — это среднее смещение дырки между двумя актами цепной реакции. Согласно теории случайных блужданий [8] можно записать

$$L = \sqrt{D/\alpha}, \quad (6)$$

где $1/\alpha$ — среднее время жизни дырки между двумя последовательными актами цепной реакции (характерное время в (1)).

Из (2)–(6) получаем соотношение

$$v = \sqrt{\alpha D}, \quad (7)$$

совпадающее по форме с выражением (1).

Используя формулу (7), оценим разумность предположения о диффузионном характере распространения цепной реакции по образцу.

Согласно [4, 5] можно принять $\alpha = 2 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$. Тогда при $v = 1,5 \text{ км/с}$ получаем $D \approx 100 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Такие значения D характерны для диффузии электронных возбуждений в кристаллах [10].

Таким образом, экспериментально наблюдаемое значение скорости распространения фронта цепной реакции взрывного разложения AgN_3 (1,5 км/с) достаточно уверенно можно связать со скоростью движения диффузионного фронта дырок, генерируемых в процессе взрывного разложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Теория** горения и взрыва. М.: Наука, 1981.
2. **Ударно-волновые** явления в конденсированных средах / Г. И. Канель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов. М.: Янус-К, 1996.
3. **Семенов Н. Н.** Цепные реакции. М.: Наука, 1986.
4. **Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Белокуров Г. М. и др.** Взрывное разложение азидов тяжелых металлов // ЖЭТФ. 1999. Т. 116, вып. 5(11). С. 1676–1693.
5. **Предвзрывные** явления в азиды тяжелых металлов / Ю. А. Захаров, Э. Д. Алукер, Б. П. Адуев, Г. М. Белокуров, А. Г. Кречетов. М.: ЦЭИ «Химмаш», 2002.
6. **Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Кречетов А. Г., Митрофанов А. Ю.** Динамическая топография предвзрывной люминесценции азиды серебра // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 5. С. 105–108.
7. **Bowden F. P., Yoffe A. D.** Fast Reactions in Solids. London: Butterworths Scientific Publ., 1958. P. 242.
8. **Маннинг Дж.** Кинетика диффузии атомов в кристаллах. М.: Мир, 1971.
9. **Зельдович Я. Б., Семенов Н. Н.** Кинетика химических реакций в пламенах // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. С. 1116–1136.
10. **Блатт Ф.** Физика электронной проводимости в твердых телах. М.: Мир, 1971.

Поступила в редакцию 15/X 2002 г.