

## ТОПОГРАФИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ РЕАКЦИИ ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ АЗИДА СЕРЕБРА ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ИМПУЛЬСОМ ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Э. Д. Алукер, Б. П. Адуев, Г. М. Белокуров, Е. В. Тупицин

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

Обнаружено, что при иницировании нитевидных кристаллов азидов серебра импульсом электронного ускорителя предвзрывная люминесценция зарождается в отдельных точках (очагах). Однородность электронного пучка свидетельствует о том, что наблюдаемый эффект не связан с особенностями поглощения энергии иницирующего импульса в области очагов. Высказывается предположение о стохастической природе наблюдаемого эффекта.

Ключевые слова: импульс электронов, азиды, взрыв, очаги, зарождение.

В работе [1] обнаружена предвзрывная люминесценция азидов серебра, регистрируемая при импульсном иницировании в течение индукционного периода, т. е. в промежутке времени между иницирующим импульсом и началом разрушения (а точнее, деформации) образца в процессе взрывного разложения. В [2, 3] показано, что кинетика предвзрывной люминесценции отражает кинетику начальных стадий цепной реакции взрывного разложения и, следовательно, может использоваться для ее «визуализации». Эта интересная возможность была применена для изучения топографии зарождения цепной реакции взрывного разложения азидов серебра при лазерном иницировании [4, 5].

Оказалось, что при лазерном иницировании весьма совершенных нитевидных кристаллов азидов серебра предвзрывная люминесценция (следовательно, и цепная реакция) зарождается в отдельных точках (очагах). В течение нескольких десятков наносекунд эти очаги разрастаются и, перекрываясь, образуют сплошное светящееся поле [4, 5]. Следует подчеркнуть, что контроль однородности лазерного пучка и совершенство кристаллов исключают возможность связи обнаруженных очагов с неоднородностью пучка или макродефектами образца [4, 5].

Возникновение очагов может быть связано с двумя обстоятельствами.

1. Скопление точечных дефектов с высоким коэффициентом поглощения лазерного излучения, обеспечивающих в связи с этим неод-

нородность возбуждения (иницирования). Такая возможность для предельного случая полностью непрозрачных микровключений проанализирована в [6]. В этом предельном случае мы фактически приходим к классической модели горячих точек [7, 8].

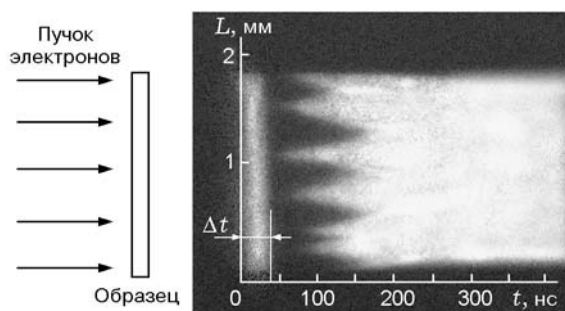
2. Поглощение лазерного излучения в образце однородно, но существуют некие микрообласти (очаги), в которых зарождение цепной реакции облегчено. В [3] приведены некоторые доводы в пользу того, что такими очагами могут быть окрестности дислокации, в которых ширина запрещенной зоны значительно уменьшается.

Представляет интерес проведение аналогичного эксперимента при другом способе иницирования. Именно это и явилось задачей данной работы.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Источником иницирующего импульса служил высокоэнергетичный импульсный электронный ускоритель (средняя энергия ускоренных электронов 200 кэВ, плотность тока в пучке  $1,2 \text{ кА/см}^2$  ( $4,5 \text{ Дж/см}^2$ ), длительность импульса на полувысоте 20 нс, неоднородность пучка по площади образца менее 5 %). В качестве образцов использовались нитевидные кристаллы азидов серебра с характерными размерами  $100 \times 100 \times 1000 \text{ мкм}$ .

Пробег ускоренных электронов ( $\approx 300 \text{ мкм}$ ) значительно превосходит поперечные размеры образца, и это обстоятельство с учетом физики первичных радиационных



Временная развертка распределения свечения по длине образца при инициировании импульсом электронного ускорителя

процессов в конденсированных средах [9] гарантировало однородность инициирования образца.

Увеличенное изображение образца при помощи оптической системы проецировалось на входное окно стрик-камеры «Взгляд-2А», работающей в режиме временной развертки. Пространственное разрешение методики  $\approx 50$  мкм.

В целом аппаратура и методика измерений аналогичны используемым в [4, 5], с одним лишь принципиальным для данной работы отличием: источником инициирования служил электронный ускоритель, что обеспечивало гарантированную однородность возбуждения образца.

На рисунке представлен результат для одного из образцов. Видно, что картина совершенно аналогична случаю лазерного инициирования [4, 5]: зарождение свечения в очагах и затем расширение светящихся областей, перекрывающих в итоге весь объем образца.

Следует также отметить, что по углу расхождения светящихся конусов на рисунке можно оценить скорость распространения реакции по образцу. Осредненное по 20 образцам значение  $(1300 \pm 300)$  м/с хорошо согласуется с данными, полученными при лазерном инициировании [10].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Параметры инициирующего импульса не обеспечивают однородного возбуждения образца до температур, достаточных для возникновения реакции взрывного разложения. Однородность возбуждения и физика процессов диссипации энергии ионизирующего излучения в твердых телах [9] делают также маловероят-

ным такой нагрев в локальных точках (во всяком случае, на стадии первичных процессов)\*.

Как уже упоминалось, в [3] приведены соображения в пользу возможности зарождения цепной реакции в окрестностях дислокаций. Полученные в данной работе результаты не противоречат данной возможности. Однако объяснение роста количества очагов зарождения реакции с увеличением энергии инициирующего импульса [4, 5] требует ряда дополнительных предположений. Поэтому целесообразно обсудить еще одну возможность очагового характера зарождения реакции, носящую пока гипотетический характер.

Представляется весьма вероятным, что очаговый характер зарождения реакции определяется просто стохастическим характером процесса инициирования.

Рассмотрим вначале малые (вблизи порога) значения энергии инициирующего импульса, при которых только и наблюдается отчетливая картина очагового зарождения реакции [4, 5]. В этом случае вероятность элементарного акта зарождения реакции (представляющего собой согласно [11, 12] последовательный захват электрона и дырки на дивакансию) достаточно мала и зарождение реакции происходит в нескольких точках образца.

В окрестностях этих точек начинается цепная реакция размножения электронов и дырок [11, 12], обеспечивающая расширение реакционной зоны за счет их диффузии. Увеличение скорости реакции и расширение реакционной зоны приводят к росту интенсивности люминесценции, «визуализирующей» реакцию. Достаточная для регистрации интенсивность люминесценции в очагах реакции достигается через  $t \approx 10^{-8}$  с после инициирующего импульса (см. рисунок). За это время зона реакции распространяется на расстояние  $r \approx vt$ , где скорость фронта реакции  $v \approx 10^5$  см/с [9], а время появления светящегося очага, как уже отмечалось,  $t \approx 10^{-8}$  с. Таким образом, в наших опытах  $r \approx 10^{-3}$  см, что совпадает по порядку величины с пространственным разрешением методики.

При характерных концентрациях дивакансий в исследуемых образцах  $\approx 10^{16}$  см $^{-3}$  [2] в объеме светящегося очага ( $\sim r^3 \approx 10^{-9}$  см $^3$ ) со-

\*Нельзя, однако, исключить возникновения таких эффектов на более поздних стадиях, обусловленных вторичными процессами, например, микропробоями и т. д. (в случае их возникновения, разумеется).

держится порядка  $10^7$  активных центров, что может обеспечить достаточную для регистрации интенсивность свечения очагов (см. рисунок). Увеличение энергии инициирующего импульса приводит к росту вероятности элементарных актов зарождения реакции и, соответственно, к росту точек ее зарождения [4, 5].

При достаточно больших энергиях инициирующего импульса количество точек зарождения реакции может стать таким, что будет обеспечиваться перекрывание очагов за время меньше временного разрешения методики. В этом случае приходим к квазигомогенной картине зарождения реакции, наблюдаемой при высоких энергиях инициирования [4, 5].

Аналогичная ситуация хорошо известна в радиационной физике [9]. Для частиц с малой удельной ионизацией ( $\beta$ -частиц) трек частицы состоит из хорошо разделенных областей ионизации (шпуры). Для частиц с высокой удельной ионизацией ( $\alpha$ -частиц) эти области перекрываются и трек представляет собой сплошную колонку ионизации (цилиндрический трек).

Изложенные соображения о возможной природе очагового зарождения носят пока характер «правдоподобной» гипотезы, заслуживающей, на наш взгляд, весьма детальной проработки.

Авторы выражают благодарность А. Г. Кречетову за плодотворные дискуссии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Захаров Ю. А. и др. Взрывная люминесценция азидов серебра // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66, вып. 2. С. 101–103.
2. 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.
3. Kuklja M. M., Aduев B. P., Aluker E. D., et al. The role of electronic excitations in explosive decomposition of solids // J. Appl. Phys. 2001. V. 89, N 7. P. 4156–4166.
4. Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Кречетов А. Г., Митрофанов А. Ю. Динамическая топография предвзрывной люминесценции азидов серебра // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 5. С. 105–108.
5. Aluker E. D., Aduев B. P., Kretchetov A. G., et al. Space-time characteristics of pre-detonation luminescence origin in heavy metal azides // Proc. VI Seminar New Trend in Research of Energetic Materials. Pardubice, Czech Republic, 2003. P. 12–17.
6. Александров Е. И., Ципилев В. П. Исследование влияния длительности возбуждающего импульса на чувствительность азидов свинца к действию лазерного излучения // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 6. С. 104–109.
7. Bowden F. P., Yoffe A. D. Fast Reaction in Solids. London: Butterworths Scientific Publications, 1958.
8. Proud W. The measurement of hot-spots in granulated ammonium nitrate // Shock Compression of Condensed Matter-2001 / M. Furnish, N. Thadhani, Y. Horie (Eds). Woodbury, New York: Amer. Inst. of Physics Press, 2002. P. 1081–1084.
9. Lehmann Chr. Interaction of Radiation with Solids and Elementary Defect Production. New York; Oxford, 1977.
10. Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Кречетов А. Г., Митрофанов А. Ю. Распространение цепной реакции взрывного разложения в кристаллах азидов серебра // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 6. С. 104–106.
11. Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Кречетов А. Г. Дивакансионная модель инициирования азидов тяжелых металлов // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 2. С. 94–99.
12. Aluker E. D., Aduев B. P., Kretchetov A. G. Pre-detonation phenomena in heavy metal azides // Proc. VI Seminar New Trend in Research of Energetic Materials. Pardubice, Czech Republic, 2003. P. 30–35.

Поступила в редакцию 29/III 2004 г.