

07;12

## Экспериментальный комплекс для исследования спектрально-кинетических и пространственно-динамических характеристик взрывного разложения энергетических материалов

© В.Н. Швайко,<sup>1</sup> А.Г. Кречетов,<sup>1</sup> Б.П. Адуев,<sup>2</sup> А.В. Гудилин,<sup>3</sup> С.А. Серов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кемеровский государственный университет,  
650043 Кемерово, Россия  
e-mail: lira@kemsu.ru

<sup>2</sup> Кемеровский филиал института химии твердого тела и механохимии СО РАН,  
650099 Кемерово, Россия  
e-mail: filial@kemnet.ru

<sup>3</sup> Государственное унитарное предприятие  
Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,  
119361 Москва, Россия  
e-mail: ross\_ltd@mtu-net.ru

(Поступило в Редакцию 9 июля 2004 г.)

Описан экспериментальный комплекс для исследования спектрально-кинетических и пространственно-динамических характеристик взрывного свечения энергетических материалов при инициировании электронными и лазерными пучками нано- и пикосекундной длительности. Спектральный интервал, регистрируемый при взрыве одиночного образца, составляет величину 450 nm, спектральное разрешение до 2 nm, пространственное разрешение до 50  $\mu\text{m}$ , предельное временное разрешение определяется применяемым источником возбуждения и достигает 30 ps.

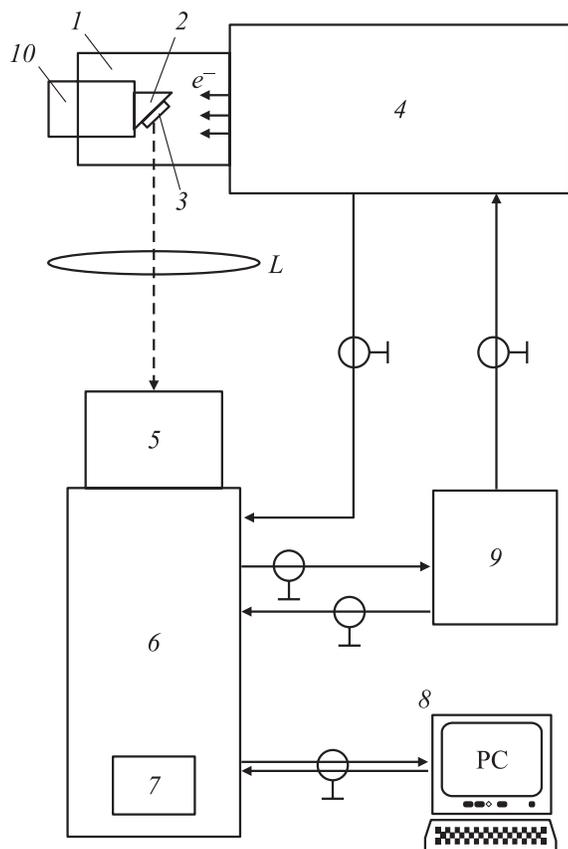
Исследование спектрально-кинетических характеристик взрыва диэлектрических материалов методами оптической спектроскопии с временным разрешением позволило получить обширную информацию о процессах образования, миграции и рекомбинации электронных возбуждений и первичных дефектов, создаваемых импульсным ионизирующим излучением [1,2].

Применение аналогичных экспериментальных методов в исследовании взрывного разложения твердых энергетических материалов также весьма перспективно, так как при инициировании образцов возникает свечение еще на стадии твердого тела, трансформирующееся в свечение продуктов взрыва [3]. Спектрально-кинетические характеристики этого свечения дают весьма важную информацию о механизмах химической реакции, приводящей к взрывному разложению взрывчатых веществ (ВВ). Однако применение метода импульсной оптической спектроскопии для изучения взрывного разложения твердых энергетических материалов требует существенной модернизации аппаратуры, применяемой в [1,2], где базовыми элементами системы регистрации свечения исследуемых образцов являются монохроматор, фотоэлектронный умножитель и осциллограф. При изучении ВВ необходимо получать информацию о спектрально-кинетических характеристиках отдельного образца в максимально широком спектральном интервале, так как при воздействии импульса возбуждения происходит взрыв исследуемого объекта, а получение спектрально-кинетической информации при использовании многих образцов малоперспективно из-за стохастического характера процесса взрывного разложения ВВ.

Наиболее перспективным направлением для решения указанной задачи является использование в схеме регистрации в качестве базовых элементов спектрографа и фотохронографа. Специфика исследуемых процессов налагает следующие требования на систему регистрации: временной диапазон  $10^{-11}$ – $10^{-5}$  s, пространственное разрешение до 20 линий на миллиметр, спектральное разрешение не хуже 5 nm при максимально возможной светосиле, максимально возможный регистрируемый спектральный интервал, компьютеризированная система считывания и обработки информации. В настоящей работе описан экспериментальный комплекс, отвечающий вышеперечисленным требованиям.

Основные элементы установки: источник возбуждения; вакуумная экспериментальная камера, в которую помещается исследуемый образец; измерительный тракт, включающий схемы синхронизации и компьютерную регистрацию сигнала, основанную на разработанном для решения данной задачи спектрохронографе „СХ-1А“, в состав которого входят два сочлененных элемента: полихроматор „Спектр-1А“ и фотохронограф „Взгляд-2А“.

Функциональная схема установки представлена на рис. 1. В вакуумной камере 1 монтируется кристаллодержатель 2, на который крепится исследуемый образец 3. Свечение, возникающее при взрыве образца, инициированном источником возбуждения 4, фокусируется на входной щели полихроматора 5 при помощи линзы L, где разлагается на спектральные составляющие, преобразуется, усиливается и разворачивается во времени фотохронографом 6, регистрируется CCD-камерой „SONY ICX039DLA“ 7, входящей в состав фотохронографа 6,



**Рис. 1.** Функциональная схема установки для исследования спектрально-кинетических характеристик энергетических материалов.

и передается в ЭВМ 8 для сохранения и последующей обработки.

Синхронизация элементов установки осуществляется при помощи CCD-камеры 7 и генератора импульсов Г5-56 9. Жесткость синхронизации не хуже  $\pm 1$  ns. В вакуумной камере 1 создается разряжение до  $10^{-4}$  Pa.

Предусмотрена возможность крепления кристаллодержателя 2 к фланцу микрокриогенной установки КВО.1575.00.000 10. В этом случае возможно изменение температуры на образце в интервале 12–300 K.

В качестве источника возбуждения 4 в зависимости от решаемой задачи используются ускорители электронов ГИН-600 (эффективная энергия электронов 0.25 MeV, плотность тока пучка до  $2 \text{ kA/cm}^2$ , длительность импульса регулируется в пределах 3–30 ns) и ГИН-540 с разрядником-обострителем (эффективная энергия электронов 0.15 MeV, плотность тока пучка до  $10 \text{ kA/cm}^2$ , длительность импульса 50 ps) либо лазер YAG: Nd<sup>3+</sup>, работающий в режиме самосинхронизации мод (энергия в импульсе до 30 mJ, длина волны излучения на основной частоте 1060 nm, длительность импульса 30 ps).

Временное разрешение экспериментального комплекса в целом определяется длительностью импульса приходящего источника возбуждения.

Оптическая схема полихроматора 5 представляет собой классическую схему Черни–Тюрнера и обеспечивает дисперсию входного излучения в спектральном диапазоне от 200 до 1000 nm. При регистрации широкополосного свечения прибор позволяет выделить спектральный интервал шириной до 450 nm со спектральным разрешением до 2 nm и с возможностью перестройки в пределах вышеуказанного спектрального диапазона. В конструкции полихроматора предусмотрена возможность изменения входной щели по двум взаимно перпендикулярным координатам, что позволяет изменять временное и спектральное разрешения регистрируемых спектров свечения. Прибор имеет относительное отверстие 1:5, компактен и монтируется непосредственно на торце фотохронографа без промежуточных оптических элементов таким образом, чтобы изображение спектра свечения в виде узкой полоски проецировалось в плоскость фотокатода электронно-оптического преобразователя (ЭОП) фотохронографа.

Электронно-оптическая схема фотохронографа 6 состоит из время-анализирующего ЭОП „ПВ-001“ и усилителя яркости „ПМУ-2В“. Предусмотрена возможность установки сменных ЭОП с фотокатодами на спектральный интервал 250–850 и 400–1200 nm. Изображение изучаемого спектра, развернутое во времени на выходном экране ЭОП, с помощью светосильного объектива передается на фоточувствительную CCD-камеру.

Электрические схемы фотохронографа обеспечивают развертку исследуемых спектров свечения во времени в диапазоне от 0.5 ns до 20  $\mu\text{s}$  на экран с максимальным временным разрешением до  $10^{-12}$  s.

При исследовании начальных стадий взрывного разложения необходимо применение коротких разверток фотохронографа. При этом относительно длительное свечение продуктов взрыва может наложиться на обратный ход развертки и исказить информацию. Во избежание этого фотохронограф снабжен системой запирающего затвора с длительностью от 20 ns до 20  $\mu\text{s}$  и имеет в зависимости от включения источников питания следующие режимы работы: „всегда открыт“ (изначально открыт, импульс запуска на затвор не подается); „всегда закрыт“ (изначально закрыт, импульс запуска на затвор не подается); „нормально открыт“ (изначально открыт и закрывается на время импульса на затвор); „нормально закрыт“ (изначально закрыт и открывается на время импульса на затвор).

Включение и отключение разворачивающего напряжения, а также различные комбинации запирающего затвора позволяют использовать фотохронограф не только для регистрации спектрально-кинетических характеристик, но и регистрировать пространственно-динамическую картину свечения, а также использовать его в качестве скоростного фотоаппарата с минимальным временем экспозиции  $\sim 20$  ns.

Для управления фотохронографом и последующей обработки спектров свечения разработан программный комплекс [4–6], позволяющий производить дистанционное управление фотохронографом как в локальной

сети (Intranet), так и глобальной (Internet), что увеличивает возможности по исследованию спектрально-кинетических характеристик энергетических материалов.

Программа „Sight-2A Server“ обеспечивает выполнение следующих функций: обслуживание клиентских запросов на управление фотохронографом, работу с фотохронографом в режиме „прямой связи“ для ОС Windows 95/98/ME, работу в фотохронографом через универсальный (generic) драйвер „TVicHW32“ для ОС Windows 95/98/ME/NT/2000/XP, передачу клиентам изображений спектров от фотохронографа.

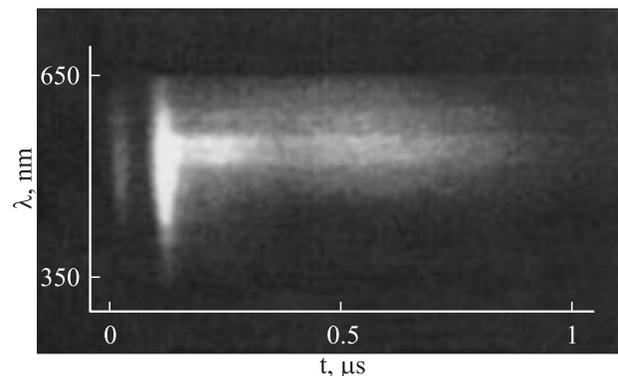
Программа „Sight-2A Client“ обеспечивает выполнение следующих функций: отображение параметров работы фотохронографа, выдачу клиентских запросов на изменение параметров работы фотохронографа, получение изображений спектров от фотохронографа через программу-сервер, сохранение изображений спектров в стандартных графических форматах (Bitmap, JPEG Image File, CompuServe GIF Image), передачу изображений спектров программе-обработке.

Программа по обработке спектров свечения „Sight-2A Processing“ обеспечивает выполнение следующих функций: прием изображений спектров от программы-клиента или чтение ранее сохраненных спектров с диска, нормирование временной оси на коэффициенты разверток, нормирование спектральной оси на калибровку по длинам волн (сопоставление точки изображения длине волны), нормирование интенсивности спектров на чувствительность оптического тракта фотохронографа, пересчет спектров в энергетические координаты, отображение результатов вычислений в трехмерной системе координат с использованием технологии OpenGL, передачу результатов вычислений в Microsoft Excel (используется технология OLE) для последующего использования.

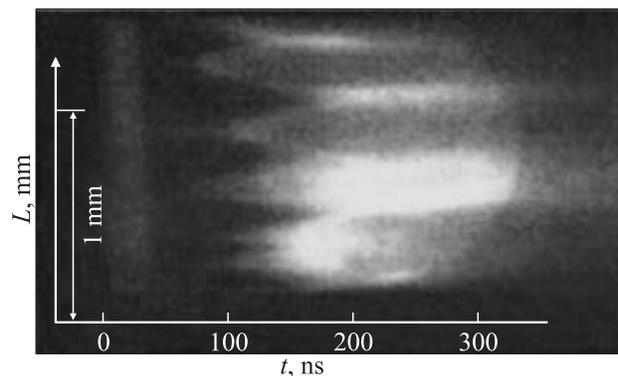
При помощи описанного выше аппаратно-программного комплекса были произведены исследования спектрально-кинетических характеристик свечения монокристалла азида серебра во взрывном режиме с использованием в качестве источника возбуждения ускорителя электронов ГИН-600.

Картина спектра свечения, зарегистрированная с выходного экрана ЭОП, представлена на рис. 2. Как видно, в момент импульса возбуждения наблюдается сплошной спектр свечения, связанный с радиолюминесценцией кристалла, далее следует второй компонент сплошного спектра, связанный в предвзрывной люминесценцией, возникающей в результате развития реакции взрывного разложения [3]. На более поздней стадии наблюдается свечение плазмы, образующейся при взрыве образца, на которое накладываются линии свечения продуктов взрыва.

С помощью описанного экспериментального комплекса можно проводить исследование не только спектрально-кинетических характеристик взрывного свечения энергетических материалов, но и регистрировать пространственно-динамическую картину свечения. Информация такого рода чрезвычайно интересна, так как



**Рис. 2.** Спектр взрывного свечения монокристалла азида серебра. Источник возбуждения — ускоритель электронов ГИН-600. Плотность тока пучка  $1 \text{ kA/cm}^2$ .

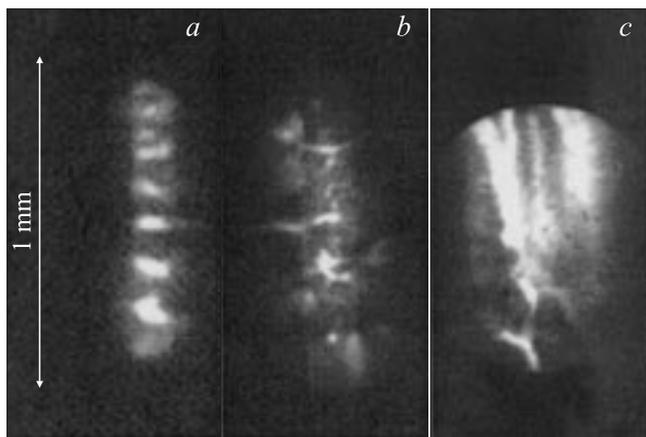


**Рис. 3.** Пространственно-динамическое изображение взрывного свечения монокристалла азида серебра. Источник возбуждения — ускоритель электронов ГИН-600. Плотность тока пучка  $1 \text{ kA/cm}^2$ .

по крайней мере для азидов тяжелых металлов показано, что кинетика предвзрывной люминесценции отражает кинетику начальной стадии цепной реакции взрывного разложения и, следовательно, предвзрывная люминесценция может служить индикатором этой реакции [3].

Для проведения таких экспериментов схема на рис. 1 должна быть видоизменена. Исследуемый образец 3 представляет собой нитевидный кристалл, ось которого следует располагать параллельно фотокатоду ЭОП и перпендикулярно направлению развертки фотохронографа 6. При этом полихроматор 5 убирается, а увеличенное изображение исследуемого образца проектируется в плоскости фотокатода ЭОП. В этом случае временно́е разрешение определяется шириной образца и скоростью используемой развертки фотохронографа. Пространственное разрешение, определенное с помощью тест-объекта (мирры), достигает величины  $50 \mu\text{m}$ .

На рис. 3 представлен результат для кристалла азиды серебра. В момент возбуждения наблюдается однородное свечение образца, связанное с радиолюминесценцией кристалла. Далее видно, что последующее свечение зарождается в очагах, которые с течением времени



**Рис. 4.** Моментальные фотографии взрывного свечения монокристалла азиды серебра. Источник возбуждения — лазер  $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ . Время экспозиции 200 ns. Плотность энергии возбуждения [ $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ]: *a* — 5, *b* — 15, *c* — 100.

расширяются и в итоге перекрывают весь образец. По углу расхождения светящихся конусов можно оценить скорость распространения реакции по образцу, которая составляет величину  $\sim 1500 \text{ m/s}$ .

Рис. 4 демонстрирует возможности экспериментальной аппаратуры в режиме моментальной фотографии. В этом случае в качестве источника возбуждения использован пикосекундный лазер. Представлены фотографии при трех различных энергиях возбуждения с временем экспозиции 200 ns. Видно, что при относительно низкой плотности возбуждения реакция зарождается в отдельных точках. При высокой плотности возбуждения с выбранным временем экспозиции наблюдается взрыв образца.

Работа выполнена при целевой финансовой поддержке Минпромнауки РФ на развитие приборной базы и гранта президента РФ (№ МК-1348.2004.3).

## Список литературы

- [1] Высокоэнергетическая электроника твердого тела / Под ред. Д.И. Вайсбурда. Новгород: Наука, 1982. 227 с.
- [2] Алукер Э.Д., Гаврилов В.В., Дейч Р.Г., Чернов С.А. Быстропротекающие радиационно-стимулированные процессы в щелочно-галогидных кристаллах. Рига: Зинатне, 1987. 183 с.
- [3] Захаров Ю.А., Алукер Э.Д., Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Кречетов А.Г. Предвзрывные явления в азиды тяжелых металлов. М.: ЦЭИ „Химмаш“, 2002. 116 с.
- [4] Швайко В.Н. А.С. № 2004610837. 2004. Роспатент. Управление фотохронографом „Взгляд-2А“–Сервер (Sight-2A Server).
- [5] Швайко В.Н. А.С. № 2004610835. 2004. Роспатент. Управление фотохронографом „Взгляд-2А“–Клиент (Sight-2A Client).
- [6] Швайко В.Н. А.С. № 2004610836. 2004. Роспатент. Управление фотохронографом „Взгляд-2А“–Обработка (Sight-Processing).