

ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

А. Н. Алешаев*, П. И. Зубков, Г. Н. Кулипанов*, Л. А. Лукьянчиков, Н. З. Ляхов**, С. И. Мишнев*, К. А. Тен, В. М. Титов, Б. П. Толочко**, М. Г. Федотов*, М. А. Шеромов*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск

**Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, 630128 Новосибирск

В работе предложен и реализован новый метод дистанционного исследования детонационных и ударно-волновых процессов с помощью синхротронного излучения. Приведено описание установки, на которой выполнены первые эксперименты по измерению плотности и малоуглового рентгеновского рассеяния при детонации конденсированных взрывчатых веществ. Высокое временное и пространственное разрешение предлагаемых методик позволяет определять характер и механизм деструкции конденсированной фазы, а также динамику роста новых, в том числе и кристаллических, образований в детонационных течениях. Описываются возможности новой методики.

ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновское излучение давно и успешно применяют в статических измерениях для определения границ веществ с различной поглощающей способностью. Им также широко пользуются в структурном анализе. Возможности рентгеновских методик существенно расширились с появлением принципиально новых источников излучения — сгустков электронов, движущихся в ускорителях по замкнутым траекториям. Такое излучение получило название синхротронного (СИ). От классических источников, в которых рентгеновские кванты рождаются при торможении ускоренных электрическим полем электронов при их взаимодействии с металлическим анодом, синхротронное излучение выгодно отличается:

— малой угловой расходимостью ($\alpha = 10^{-3} \div 10^{-5}$ рад) при высокой интенсивности потока ($\approx 10^{16} \div 10^{21}$ фотонов/(с·см²));

— генерацией импульсов излучения, следующих друг за другом со стабильным временным интервалом ($5 \div 1200$ нс) в течение длительного времени;

— малой длительностью импульса излучения (менее 1 нс);

— широким спектральным диапазоном излучения ($4 \div 100$ кэВ).

Такие свойства СИ позволили осуществлять измерения в динамических экспериментах, в которых результаты взаимодействия излучения с веществом фиксируются в последовательные моменты времени. Очевидно, что с уменьшением времени регистрации возникает необходимость использования все более быстродействующих и чувствительных детекторов рентгеновского излучения. Возрастают требования к необходимой мощности излучения. В ИЯФ СО РАН миллисекундный диапазон измерений был освоен к 1977 г. К 1998 г. источники излучения и детекторы были усовершенствованы настолько, что открылась возможность уменьшения времени регистрации на несколько порядков. Для реализации открывшихся возможностей в настоящее время осуществляется программа, целью которой является разработка методики, позволяющей осуществлять с помощью СИ диагностику детонационных волн. Основанием для такого выбора явились следующие факторы:

— высокая скорость изменения параметров детонационной волны в пространстве и во времени, обуславливающая необходимость проведе-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 00-03-32521, 00-02-17641, 01-02-18031), программы ведущих научных школ (грант 00-15-96181), а также интеграционного гранта СО РАН № 51.

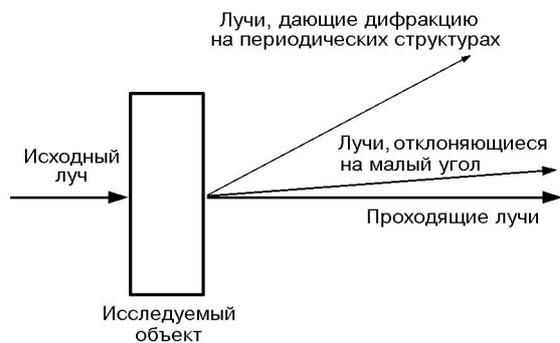


Рис. 1. Схема прохождения излучения через объект

ния измерений в наносекундном диапазоне времени;
 — возможность стабильного воспроизведения процесса;
 — наличие предварительной информации о газодинамике течения и фазовых переходах в детонационных волнах.

При падении излучения на объект исследования (рис. 1) часть излучения поглощается самим веществом. Проходящий без отклонения луч имеет наибольшую интенсивность и несет информацию об изменении плотности вещества. Лучи, отклоняемые на малый угол, несут информацию о флуктуации электронной плотности в зоне регистрации. Их интенсивность уже на несколько порядков ниже. И наконец, третий тип лучей — дифрагированное излучение — имеет еще более низкую интенсивность и несет информацию о параметрах периодических структур в веществе.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований проходящих лучей и лучей, отклоняемых на малый угол (малоугловое рентгеновское рассеяние — МУРР). Малоугловое рассеяние возникает только при образовании в зоне регистрации значительных флуктуаций плотности, которые в углеродосодержащих взрывчатых веществах (ВВ) могут быть связаны с синтезом ультрадисперсных алмазов (УДА). Последний процесс достаточно интенсивно изучался, и в литературе содержится значительная информация о параметрах синтеза, полученная, главным образом, на основе исследований сохраненных во взрывных камерах конечных продуктов [1].

Использование СИ позволяет изучать в реальном времени детонационные процессы, в

том числе и динамику образования УДА.

ПАРАМЕТРЫ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основными параметрами накопительного кольца электронных ускорителей являются: радиус орбиты движения электронов R (как правило, $10 \div 30$ м), энергия электронов E ($1 \div 5$ ГэВ), индукция магнитного поля в поворотных магнитах B ($1 \div 7$ Тл) и их число, а также электронный ток I ($100 \div 400$ мА). Эти параметры связаны между собой следующими соотношениями:

$$R = E/eB, \text{ где } e \text{ — заряд электрона;}$$

$$I = eN_e c/2\pi R, \text{ где } c \text{ — скорость света, } N_e \text{ — число электронов в пучке.}$$

Стабильность электронного пучка в кольце зависит от качества вакуума в канале и может составлять от нескольких часов до нескольких десятков часов. Параметры накопительного кольца определяют характеристики вырабатываемого синхротронного излучения. Спектральный состав СИ принято описывать критической длиной волны $\lambda_{кр}$, которая выбирается таким образом, что полная энергия СИ, излучаемая источником на всех длинах волн больше критической, равна энергии, излучаемой на меньших длинах волн. Интенсивность СИ характеризуется спектральной яркостью, определяемой как число фотонов в диапазоне энергий фотонов (ДЭ) от E_ϕ до $E_\phi + \Delta E_\phi$ (обычно выбирается $\Delta E_\phi = 0,1\% E_\phi$, так называемый $0,1\% \text{ ДЭ}$), испускаемых за 1 с, отнесенное к единице площади поверхности испускающей области и единице телесного угла расходимости фотонного пучка. Таким образом, эта величина имеет размерность фотон/(с·мм²·рад²· $0,1\% \text{ ДЭ}$). Размерные характеристики источника СИ определяются эмиттансом — величиной, равной произведению линейного размера излучающей области электронного пучка на угол расходимости пучка СИ. Типичные значения вертикального и горизонтального эмиттанса современных источников СИ составляют соответственно $10^{-10} \div 10^{-8}$ и $10^{-8} \div 10^{-6}$ м·рад.

Полная мощность W , излучаемая электронным пучком за оборот по орбите, и критическая длина волны $\lambda_{кр}$ определяются энергией электронов в пучке, электронным током и радиусом орбиты:

$$W \sim I\gamma^4/R,$$

где γ — лоренц-фактор электрона $\gamma = E/m_0c^2$ (m_0 — масса покоя электрона),

$$\lambda_{кр} = 4\pi R/3\gamma^3.$$

Для генерации СИ на существующих накопителях электронов используются специальные устройства, не являющиеся обязательными элементами накопительного кольца, но позволяющие получать СИ с характеристиками, направленно модифицированными по сравнению с излучением из поворотного магнита. Основными типами таких устройств являются ондуляторы и вигглеры (змейки). Ондулятор представляет собой систему постоянных магнитов с регулярно чередующимися полюсами, движение электронов в таких устройствах можно рассматривать как осцилляции относительно исходной прямолинейной траектории. Использование ондуляторов позволяет повысить яркость источника на 2–3 порядка, а также уменьшить размеры пучка (т. е. уменьшить эмиттанс). Кроме того, при определенных конструктивных особенностях ондулятора значительная доля излучаемой энергии может быть сконцентрирована в нескольких узких спектральных полосах — гармониках ондулятора (длины волн которых также можно варьировать путем подбора магнитных параметров ондулятора), что позволяет достичь еще более высокой интенсивности на этих длинах волн. Спектр излучения для накопительного кольца ускорителя на встречных электрон-позитронных пучках (ВЭПП-3) в зависимости от индукции магнитного поля (B) вигглера изображен на рис. 2. Нижняя граница спектра СИ определяется материалом выходного окна и при использовании бериллия составляет $\approx 3 \div 4$ кэВ. В описанных ниже экспериментах использовался вигглер с индукцией $B = 2$ Тл.

Электроны при движении по накопительному кольцу разбиваются на отдельные сгустки — банчи (bunchs), имеющие длину порядка $3 \div 30$ см. По этой причине электронный ток через вигглер не является непрерывным. Таким образом, СИ состоит из периодических вспышек-импульсов длительностью от нескольких десятков пикосекунд до наносекунд с интервалом между импульсами от 5 нс до 1,2 мкс. При определенных условиях накопления можно добиться режима, в котором по накопительному кольцу будет двигаться только один сгусток электронов. В таком режиме работы длительность импульса СИ (1 нс) и ин-

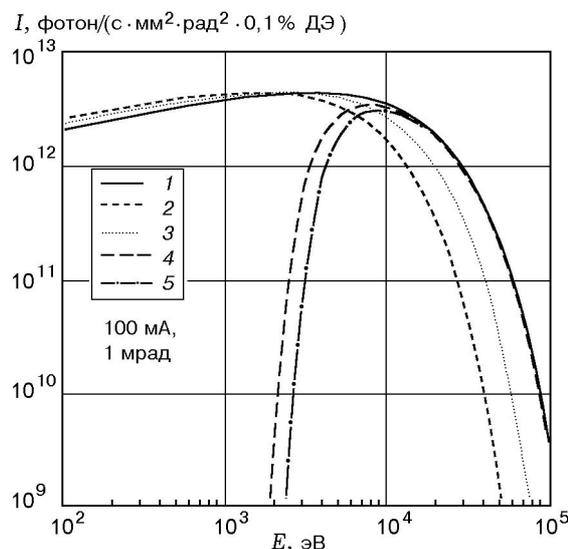


Рис. 2. Спектральный поток СИ (I) в зависимости от индукции B магнитного поля вигглера для ВЭПП-3:

1–3 — $B = 4,4, 2$ и 3 Тл соответственно, 4, 5 — бериллиевое окно толщиной соответственно $0,6$ и 1 мм при $B = 2$ Тл

тервал между импульсами ($\Delta t = 250$ нс для ВЭПП-3) имеют высокую регулярность.

ТЕСТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ШИХТОЙ

Возможность использования СИ для исследования взрывных процессов вначале была проверена при регистрации МУРР в статических условиях от сохранившихся в инертной газовой среде продуктов детонации ВВ ТГ 50/50 (шихты). Согласно данным [1] количество шихты у ТГ 50/50 составляет $\approx 9\%$ массы ВВ, и в ней содержится до 80% УДА. Образец шихты для просвечивания СИ представлял собой цилиндр диаметром 10 мм и длиной 40 мм, в котором шихта была равномерно перемешана с парафином (6% шихты + 94% парафина по массе).

Регистрацию МУРР проводили с помощью рентгеновского однокоординатного детектора. Параллельно велась регистрация МУРР от такого же по размерам заряда ТГ 50/50. Результаты этих экспериментов приведены на рис. 3. Интегральная интенсивность МУРР продуктов (шихты) более чем на три порядка превышает аналогичный параметр для исходного образца (ТГ 50/50). Оценки показали, что этой интенсивности от шихты достаточно, чтобы ее зарегистрировать за время одной вспышки СИ, т. е. за 1 нс. Это дало основание предпо-

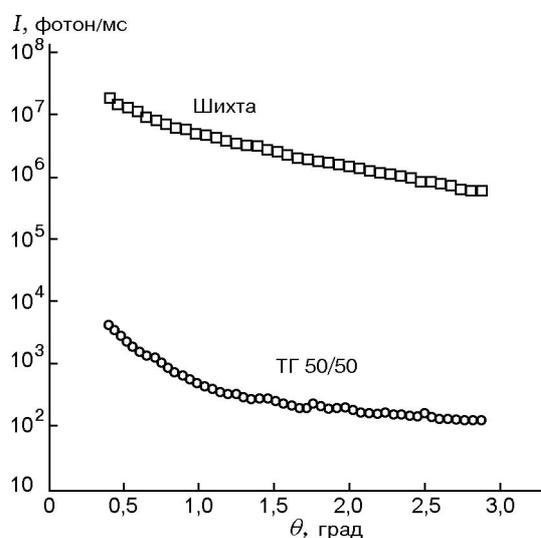


Рис. 3. Зависимость сигналов МУРР (I) для литого ТГ 50/50 и его шихты от угла наблюдения рассеянного излучения (θ)

лагать, что во время прохождения фронта детонационной волны через зону облучения пучком СИ структурные изменения в зоне химических превращений должны приводить к таким же сильным изменениям кривых МУРР и эти изменения можно зарегистрировать за 1 нс.

СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ВЭПП-3

Для исследования взрывных процессов с помощью синхротронного излучения на ВЭПП-3 был создан экспериментальный стенд. Стенд состоит из специализированной взрывной камеры, рассчитанной на взрыв 15 г ВВ, системы высоковольтного инициирования ВВ, детекторов рентгеновского излучения и усилителей сигналов, стойки КАМАК для записи полученных сигналов, системы юстировки детекторов относительно пучка СИ, системы синхронизации регистрирующей аппаратуры с ускорителем ВЭПП-3. Общая схема установки приведена на рис. 4.

Взрывная камера сделана из нержавеющей стали и имеет: входное окно для пучка СИ; выходное окно для вывода прямого пучка и рассеянного излучения; выхлопной канал для вывода газов (продуктов детонации); два крана для подключения к вакуумной системе и для наполнения газами. По условиям минимальных потерь рентгеновского излучения входные и выходные окна для СИ были изготовлены из бе-

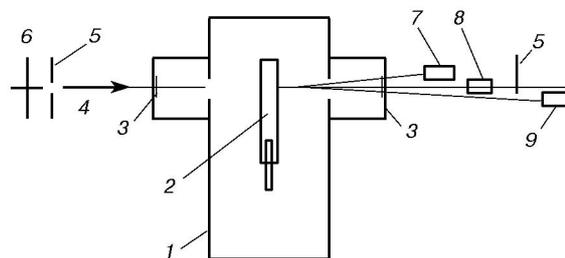


Рис. 4. Схема экспериментального стенда:

1 — взрывная камера, 2 — исследуемый заряд ВВ, 3 — окна взрывной камеры из бериллия, 4 — направление пучка СИ, 5 — горизонтальные ножи, 6 — вертикальные ножи, 7 — датчик МУРР в диапазоне энергий 7 ÷ 15 кэВ, 8 — датчик проходящего излучения, 9 — датчик МУРР в диапазоне энергий 15 ÷ 30 кэВ

риллия толщиной 2 мм. Для сохранения герметичности окон после взрыва в камере были сделаны специальные «глушители» ударной волны. Перед входным окном установлен электромагнитный затвор, открывающийся на 20 мс синхронно с инициирующим устройством. Затвор необходим для предохранения заряда ВВ от интенсивного радиационного воздействия.

В процессе испытаний была проверена и отлажена регистрация проходящего (прямого) и дифрагированного излучения различными детекторами. Для проведения экспериментов по малоугловому рентгеновскому рассеянию требовался детектор с приемлемой чувствительностью в области энергий 5 ÷ 30 кэВ, площадью чувствительной области не менее 5 ÷ 10 мм² и быстродействием, обеспечивающим независимую регистрацию вспышки рентгеновского излучения на каждом обороте пучка.

После проверки рентгеночувствительности различных полупроводниковых приборов на основе кремния и германия для детектора МУРР был выбран германиевый фототранзистор ФТГ-3. Приемлемые параметры имели также германиевые импульсные транзисторы ГТ321, но из-за их существенно меньшей рабочей площади для регистрации МУРР использовались преимущественно транзисторы ФТГ-3 с максимальной чувствительностью в диапазоне 15 ÷ 30 кэВ.

Для увеличения чувствительности системы и приведения импульса к форме, удобной для регистрации, был разработан усилитель-формирователь, обеспечивающий формирование импульса длительностью ≈ 100 нс. В экс-

периментах использовались быстродействующие 8-разрядные АЦП-850SK. Общее число ячеек памяти каждого АЦП составляло 4096, полный интервал измерений по времени — 512 мкс. Столь длительная регистрация позволяла проследить динамику развития процесса при разгрузке продуктов детонации до давлений ≈ 2 атм, которое устанавливается во взрывной камере после взрыва. Для компенсации медленных (дрейфовых) компонент тока утечки детектора и подавления низкочастотных компонент шума в экспериментах использовался режим цифровой двойной коррелированной выборки, т. е. измерение сигналов проводилось дважды за оборот пучка — в моменты максимумов импульсов и в паузах между ними — с последующей обработкой (взятием разности записанных сигналов) на компьютере. Для регистрации интенсивности прошедшего прямого пучка СИ и интенсивности «мягкой» (в диапазоне энергий $7 \div 15$ кэВ) компоненты МУРР были разработаны детекторные головки с кремниевыми pin-фотодиодами и малощумящими усилителями. В такой головке кристалл детектора (бескорпусной фотодиод) малой площади (1×1 мм) размещен на конце тонкой коаксиальной штанги. Это позволило прецизионно вводить детектор в прямой пучок (не затеняя ФТГ-3) и точно юстировать его вне пучка. Перед детектором прямого пучка размещался фильтр-поглотитель ($1 \div 2$ мм поливинилхлорида) для уменьшения чувствительности в «мягкой» области (менее 15 кэВ). В проходящем прямом пучке СИ поток на детекторе составлял $\approx 10^4$ фотон/вспышка. Общий поток дифрагированных фотонов, регистрируемых ФТГ-3, составлял $\approx 10^3$ фотон/вспышка, а для кремниевых pin-диодов — ≈ 15 фотон/вспышка.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Геометрия заряда и расположение проволочных датчиков показаны на рис. 5. Высота зоны облучения на заряде ВВ («пятна» от пучка СИ) составляла $0,2 \div 1,5$ мм, ширина $5 \div 6$ мм. Литые и насыпные заряды имели диаметр 10 мм, прессованные заряды — 12,5 мм. Промежуточный заряд из насыпного октогена использовался для надежного возбуждения детонации в зарядах ТГ и тротиле. Длина зарядов варьировалась от 25 до 80 мм. Расстояние между проволочными датчиками L в разных экспериментах составляло $19 \div 21$ мм. Съемка аналогичных зарядов на рентгеновском ап-

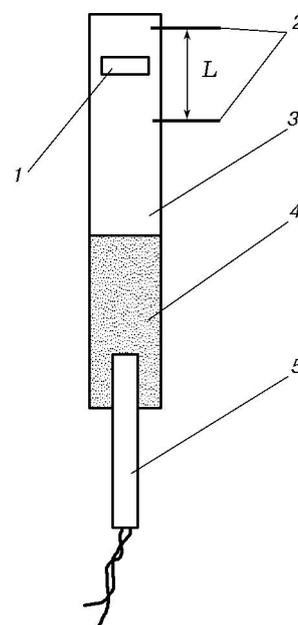


Рис. 5. Схема расположения заряда ВВ:

1 — зона, в которую наводился пучок СИ, 2 — проволочные датчики, 3 — заряд ТГ 50/50, 4 — насыпной октоген, 5 — детонатор

парате ПИР-200 показала, что фронт детонации достаточно плоский при длине заряда более 30 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Измерение проходящего излучения

На рис. 6 показаны записи проходящего через заряд ТГ 50/50 излучения МУРР и сигналов от проволочных датчиков. Измерения проводились через промежутки времени $\Delta t = 250$ нс, между ними измерялся «фон» усилителей. Поэтому полезный сигнал для проходящего излучения и МУРР получается из разности между верхней и нижней точками. На записи хорошо видно сжатие во фронте детонации и разлет продуктов после взрыва. На рис. 7 представлена одновременная запись проходящего излучения германиевым и кремниевым детекторами. Настройка детекторов была такой, что германиевый детектор регистрировал «жесткую» компоненту излучения (диапазон энергий $20 \div 30$ кэВ), а кремниевый — «мягкую» ($7 \div 15$ кэВ). Первый хорошо регистрирует сжатие в детонационном фронте и начальный разлет продуктов детонации, в то вре-

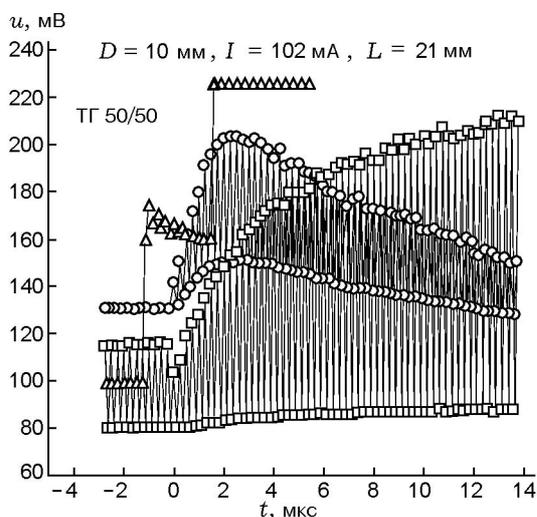


Рис. 6. Зависимость амплитуд сигналов (u) детекторов проходящего рентгеновского излучения (кривая 1), МУРР (кривая 2) и сигнала с контактных датчиков (3) от времени (t)

мя как «мягкая» компонента, сильно поглощенная в исходном ВВ, хорошо фиксирует конечный разлет продуктов и распространение волн во взрывной камере после отражения от стенок. Динамический диапазон канала одновременной регистрации проходящего излучения с помощью нескольких детекторов позволяет измерять плотность от 2 до 0,002 г/см³.

При полученной скорости детонации ($D = 7,5$ км/с) линейное разрешение составляет $D\Delta t = 1,875$ мм. Накопитель ВЭПП-3 позволяет вдвое увеличить частоту импульсов СИ при использовании двух сгустков электронов. Кардинально увеличить разрешение можно при ис-

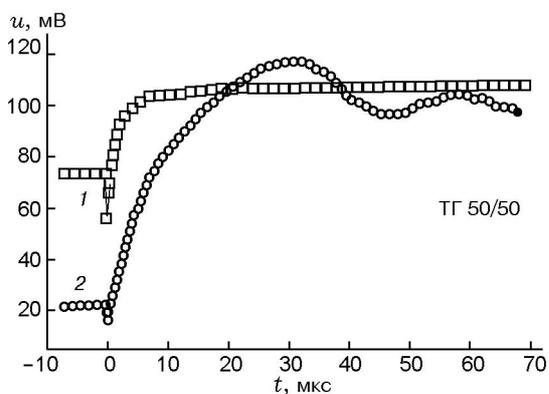


Рис. 7. Зависимость амплитуд сигналов германиевого (кривая 1) и кремниевого (кривая 2) детекторов проходящего излучения от времени

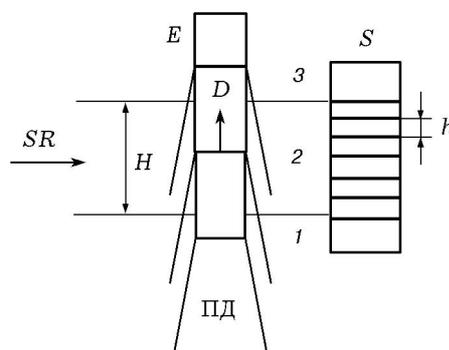


Рис. 8. Схема измерения плотности с помощью микрострипового детектора:

SR — направление пучка СИ, H — высота пучка СИ, E — заряд ВВ, D — направление движения детонационного фронта, 1–3 — последовательное положение фронта детонации через 250 нс, ПД — разлетающиеся продукты детонации, S — микростриповый детектор, h — расстояние между стрипами внутри детектора

пользовании линейки детекторов (микрострипового детектора) вместо одного детектора.

На рис. 8 показана схема проведения экспериментов. Если в момент прихода импульса СИ фронт детонации находится напротив детектора (положение 2), то на детекторе будет получено мгновенное распределение плотности по высоте H и линейное разрешение будет определяться шагом стрипов h . Для того чтобы фронт детонации обязательно попал в поле детектора S , ширина пучка СИ H должна быть больше, чем расстояние между последовательными положениями фронта детонации через период следования импульсов СИ (1–3). В экспериментах использовался 50-канальный детектор с шагом между стрипами $h = 100$ мкм. Временное разрешение при этом могло составить $\Delta t = h/D = 13,3$ нс. На первом этапе в экспериментах использовались только три канала (из детектора к трем каналам АЦП выводились стрипы, расположенные через 400 мкм.) Запись этих трех каналов при детонации прессованного заряда тротил-аммиачной селитры 80/20 показана на рис. 9. При использовании детектора с шагом стрипов $h = 7,5$ мкм временное разрешение будет составлять $h/D = 1$ нс. Число каналов регистрации при этом должно быть равно $1875 \text{ мкм} / 7,5 \text{ мкм} = 250$.

2. Измерение МУРР

При обработке схемы проведения экспери-

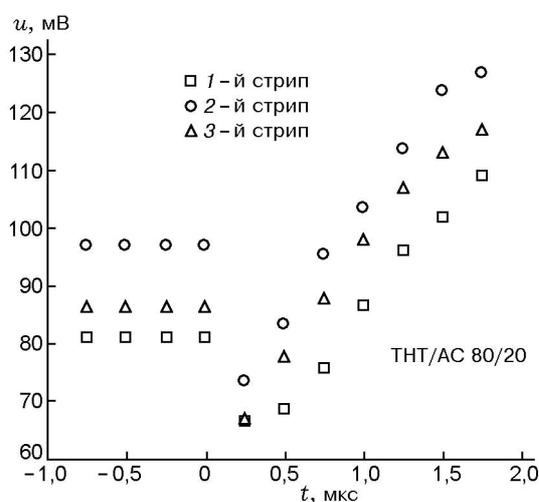


Рис. 9. Зависимость амплитуд сигналов микрострипового детектора от времени (расстояние между стрипами 0,4 мм)

ментов и при юстировках системы использовался муляж заряда, изготовленный из парафина с добавкой 6 % шихты. Оптимальной настройке соответствовал сигнал МУРР от муляжа, примерно в 3 ÷ 5 раз превышающий уровень фона.

В данных условиях было зарегистрировано также и дифрагированное излучение, однако величина сигнала была на два порядка меньше сигнала МУРР. Поэтому запись сигнала дифракции возможна только при увеличении интенсивности источника СИ или использовании детекторов со значительно большей площадью. В экспериментах с ВВ данная компонента излучения не фиксировалась.

Первым из ВВ исследовался сплав ТГ 50/50. Из распространенных бризантных ВВ этот сплав имеет наибольший выход УДА [1]. Запись МУРР приведена на рис. 6 (кривая 2). Рост сигнала МУРР начинается во время сжатия в детонационной волне, и продолжается в течение 1,75 мкс. Спад длится в течение сотен микросекунд. Максимальное значение сигнала МУРР в 2–3 раза превосходит сигнал от шихты. Рост сигнала МУРР в течение длительного времени очень интересен, так как согласно предыдущим исследованиям взрывного синтеза УДА считается, что алмазы образуются в очень узкой зоне детонационной волны за время $\approx 0,1$ мкс [1, 2]. Одной из основных причин столь длительного роста сигнала МУРР в течение ≈ 2 мкс, по-видимому, следует считать повышение флуктуации плотности («кон-

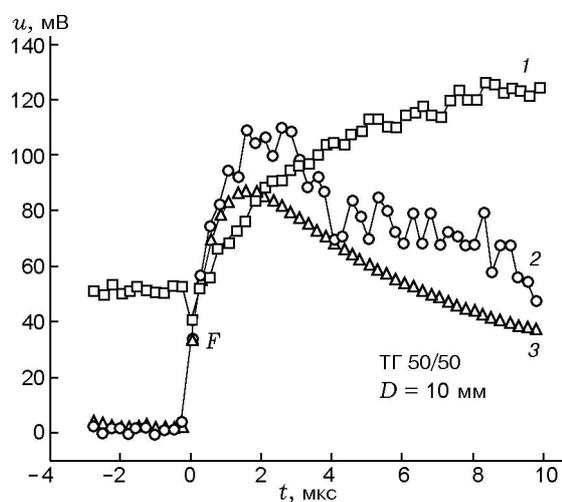


Рис. 10. Сравнение амплитуд сигналов измеренного МУРР (точки 2) и рассчитанного с учетом повышения «контрастности» (точки 3) при детонации ТГ 50/50, точки 1 — сигналы детектора проходящего излучения

трастности») в процессе разлета продуктов детонации. Плотность конденсированной фазы (в том числе и УДА) практически не меняется, а плотность разлетающихся продуктов детонации сильно падает.

Если в однородной среде с плотностью ρ равномерно расположены частицы со средним размером δ и плотностью ρ_0 , то при прохождении монохроматического излучения с длиной волны λ сигнал МУРР будет равен

$$I(\lambda) = \alpha F(\delta, \lambda) G(\lambda) (\rho_0 - \rho)^2 N, \quad (1)$$

где α — размерный коэффициент; $F(\delta, \lambda)$ — форм-фактор, зависящий от размера δ и формы частицы; $G(\lambda)$ — паковочный фактор, зависящий от взаимного расположения частиц; N — число частиц, находящихся на пути рентгеновского луча [3]. Полный сигнал МУРР получается суммированием по всем длинам волн излучения. Из этой формулы видно, что величина $(\rho_0 - \rho)^2$ растет с уменьшением плотности ρ продуктов детонации при их разлете, так как плотность кристаллических частиц ρ_0 остается постоянной. По снимкам взрыва аналогичного заряда ТГ 50/50 на рентгеновском аппарате ПИР-200 были сделаны оценки плотности ρ продуктов детонации в процессе разлета. На рис. 10 приведены измеренный сигнал МУРР (кривая 2) и вычисленный по формуле (1) (кривая 3). При вычислении кривой 3 предполагалось, что все частицы образуются в узкой

зоне за фронтом детонации, т. е. точка F на кривой 2 соответствует максимальному количеству кристаллических частиц. Она же была выбрана в качестве начальной для кривой 3. Дальнейший ее ход определяется увеличением величины $(\rho_0 - \rho)^2 N$. Характерные времена нарастания и спада кривой 3 практически совпадают с измеренным сигналом МУРР, а амплитуда несколько ниже. Сделать однозначные выводы из этого пока нельзя, поэтому авторы считают, что вопрос о времени роста кристаллических частиц и поведении сигналов МУРР в настоящее время остается открытым и требует дальнейшего исследования.

ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДИКИ

Кратко перечислим основные параметры детонационных и ударно-волновых процессов, которые могут быть экспериментально исследованы с применением синхротронного излучения.

Во-первых, это измерение поглощения прямого пучка и соответственно определение динамики изменения плотности ВВ и продуктов детонации. Предпочтительным здесь выглядит использование набора (линейки, решетки) детекторов (например, микрострипового детектора), ориентированного либо вдоль, либо поперек направления распространения детонации (оси заряда). В последнем случае это позволит определять профили волн сжатия и разрежения. Кроме того, измерения поглощения прямого пучка могут быть использованы для исследования отражения ударных волн, разгрузки (истечения продуктов детонации в вакуум или заданную среду), динамики движения инертных добавок (порошков), а при введении в ВВ меток поглощающих СИ (фольги или соединений хорошо поглощающих элементов) — и для исследования массовых потоков непосредственно в зареде.

Во-вторых, регистрация сигналов МУРР позволяет оценить динамику общего количества кристаллических частиц за фронтом детонации при взрыве. Получить количественную зависимость числа и размеров частиц от времени можно при использовании монохроматического излучения. Необходимо также вместо одного детектора излучения использовать линейки или матрицы детекторов. Существенным ограничением проведения таких экспериментов в настоящее время является недоста-

точная интенсивность СИ от ВЭПП-3. Одним из способов увеличения интенсивности является установка вигглера с более мощными магнитами. Расчеты показывают, что при использовании более сильных магнитных полей в вигглерах ($B = 4$ Тл) интенсивность излучения рентгеновских лучей с энергией 30 кэВ возрастает на порядок (см. рис. 2).

В описанных выше экспериментах с одним детектором временное разрешение определяется периодом вращения электронов в накопительном кольце. Для ВЭПП-3 это время составляет 250 нс. В накопителе могут находиться два сгустка электронов, тогда время между импульсами СИ будет 125 нс. Для ускорителя ВЭПП-4 в настоящее время возможно устойчивое вращение сгустков с минимальным временем между ними $\Delta t = 5$ нс. При скорости детонации $D = 7,5$ км/с этому времени соответствует линейное разрешение $X = 38$ мкм.

Еще один способ увеличить линейное и временное разрешение состоит в использовании приборов с зарядовой памятью (линейных и матричных приборов с зарядовой памятью — ПЗС). Записанная в них информация считывается в аналого-цифровой прибор (АЦП) последовательно, поэтому при проведении экспериментов достаточно иметь только один канал регистрации. Однако такое последовательное считывание сигналов с детекторов приводит к большому общему времени полного вывода информации из ПЗС. Это время составляет $\approx 1 \div 10$ мс, поэтому за период между импульсами СИ ($\Delta t = 250$ нс) все сигналы не могут быть прочитаны. После следующего импульса происходят их «наложение» и перегрузка ПЗС. Это ограничение можно обойти путем использования «параллельной» схемы [4]. По этой схеме необходимо использовать корректоры электронного пучка с временем включения порядка 100 нс. Поле корректоров изменяет траекторию электронов и, следовательно, положение источника СИ. При соответствующей юстировке от каждого электронного сгустка излучение можно направить на свой детектор (или ПЗС). Поскольку регистрационная система каждого детектора полностью независима, требование высокого быстродействия системы «датчик — память» становится не таким жестким, как при использовании обычной схемы. Например, в качестве детекторов можно использовать даже фотопленку или Image Plate.

В настоящее время на ВЭПП-3 обработана

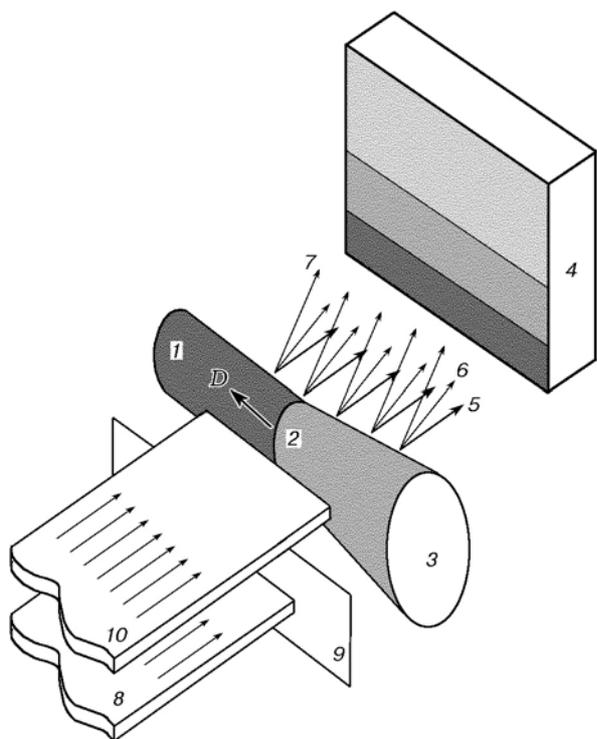


Рис. 11. Схема проведения экспериментов с «ударом»:

1 — заряд ВВ, 2 — положение фронта детонационной волны, 3 — разлетающиеся продукты детонации, 4 — матрица ПЗС, 5 — запись проходящего излучения, 6 — запись сигнала МУРР, 7 — запись дифрагированного сигнала, 8 — направление основного пучка СИ, 9 — нож, закрывающий основной пучок СИ, 10 — сдвинутый «ударом» пучок СИ

система «удар», которая позволяет быстро выводить электронный сгусток из стационарной траектории на ≈ 20 мм вверх [4]. В состав «удара» также входит еще один корректор (дефлектор), который позволяет возвращать банч из возбужденного состояния на основную орбиту. Если теперь установить матричный или линейный ПЗС вдоль заряда ВВ так, что излучение будет попадать на него только при смещении электронного сгустка, то можно получить мгновенное распределение плотности с линейным разрешением, которое определяется размером ячейки ПЗС. При размере ячейки 15 мкм и скорости детонации $D = 7,5$ км/с временное разрешение составит 2 нс. На рис. 11 показана возможная схема проведения экспериментов. Если электронный пучок движется по основной орбите, то исходный пучок СИ попадает в нож. При изменении орбиты пучка положение источника СИ смещается так, чтобы излучение

попадало на исследуемый заряд ВВ. Система синхронизации должна обеспечить прохождение фронта детонации в момент прихода смещенного импульса СИ. В результате на матрице можно записать проходящее излучение, сигналы МУРР и дифрагированное излучение.

При использовании высокочувствительных матричных ПЗС, работающих в режиме рентгеновских спектрометров, в момент «удара» можно получить для локальной области заряда пространственное распределение дифрагированных фотонов с одновременным определением их энергий. Это позволит определять мгновенные структуры и концентрации кристаллических включений в этой области. Другим способом регистрации дифракционных сигналов является использование интегрирующих детекторов большой площади с высоким временным разрешением. При этом сигналы дифракции регистрируются при каждом импульсе СИ, аналогично сигналам МУРР в проведенных экспериментах. Регистрация рентгеновского рассеяния на большие углы позволит исследовать разрушение и образование различных кристаллических включений (плавление и испарение кристаллов ВВ и металлических частиц, кристаллизацию твердых оксидов и т. д.). Кроме того, запись картины дифракции с достаточным разрешением по углу и по энергии рентгеновских квантов поможет идентифицировать различные кристаллические фазы и определить их состояние (давление, температуру, размеры частиц). При наличии в составе ВВ элементов средней части периодической таблицы на дифрагированное излучение будет наложено относительно изотропное рентгенофлюоресцентное излучение. Оно практически нечувствительно к химическому состоянию переизлучающего элемента и может быть использовано для определения динамики движения различных включений (в том числе при введении меток — для определения массовых скоростей).

Главным ограничением на проведение этих экспериментов в настоящее время является недостаточная интенсивность дифрагированного излучения. Это ограничение можно обойти использованием более мощных источников СИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю. Исследование процесса синтеза уль-

- традисперсного алмаза в детонационных волнах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 35, № 3. С. 117–126.
2. **Лямкин А. И., Петров Е. А., Ершов А. П. и др.** Получение алмазов из взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, № 3. С. 611–614.
 3. **Иверонова В. И., Ревкевич Г. П.** Теория рассеяния рентгеновских лучей. М.: Изд-во МГУ, 1978.
 4. **Aleshaev S. A., Fedotov M. G., Mishnev V. A., Tolochko B. P.** "Moving source": Test realization at VEPP-3 of a diffraction experiment with nanosecond time resolution // Nucl. Instr. and Meth. 2000. V. A448. P. 234–240.

Поступила в редакцию 16/XI 2000 г.
