

УДК 621.386.8

Фотохронографическая методика измерения скорости ударной волны в экспериментах по изучению уравнения состояния веществ на лазерной установке "Искра-5"

Описана методика измерения скорости ударной волны, возникающей в образцах при их лазерном облучении, в экспериментах по изучению ударной сжимаемости веществ. Методика основана на применении электронно-оптического фотохронографа. Методика обеспечивает пространственное разрешение 10 мкм, погрешность измерения задержки ударной волны в слоях 10 пс, погрешность измерения скорости ударной волны 2,5 %, динамический диапазон регистрации ~200. Приведены результаты измерений.

**С. А. Бельков, А. Г. Кравченко,
А. В. Кунин, Д. Н. Литвин,
В. М. Муругов, А. В. Сенник**

Введение

Лазерный метод изучения уравнения состояния вещества активно развивается в разных лабораториях [1–3]. Серия таких экспериментов начата во ВНИИЭФ на установках "Искра-5" и "Луч" [4, 5].

Лазерные исследования уравнения состояния веществ при высоких давлениях основаны на так называемом методе "отражения" [6, 7]. В отличие от прямого метода, при котором измеряется как массовая, так и волновая скорость, в методе отражения сравниваются ударные сжимаемости исследуемого материала и вещества-эталоны, для которого уравнение состояния изучено достаточно хорошо. Обычно мишень представляет собой алюминиевую фольгу толщиной 20–100 мкм (базовый слой), на которую с одной стороны напылены в виде двух ступенек толщиной несколько микрометров исследуемое вещество и вещество-эталон. Базовый слой служит для формирования однородной стационарной ударной волны. Таким образом, метод отражения состоит в одновременном измерении скорости фронта ударной волны в исследуемом образце и эталоне. Набор эталонов ограничен. Это Al, Fe, Cu, обычно используется Al.

Высокое давление создается при нагревании поверхности базового слоя интенсивным ($10^{13} - 10^{15}$ Вт/см²) лазерным излучением.

Суть методики сводится к измерению скорости ударной волны. При известной толщине образца скорость определяется по моменту выхода ударной волны на тыльную поверхность мишени. Момент выхода фиксируется по свечению тыльной поверхности с помощью фотохронографа.

Постановка эксперимента

Эксперименты по исследованию ударной сжимаемости различных веществ проводились на установках "Искра-5" и "Луч" по схеме прямого облучения (рис. 1), аналогичной применяемой на других установках [8].

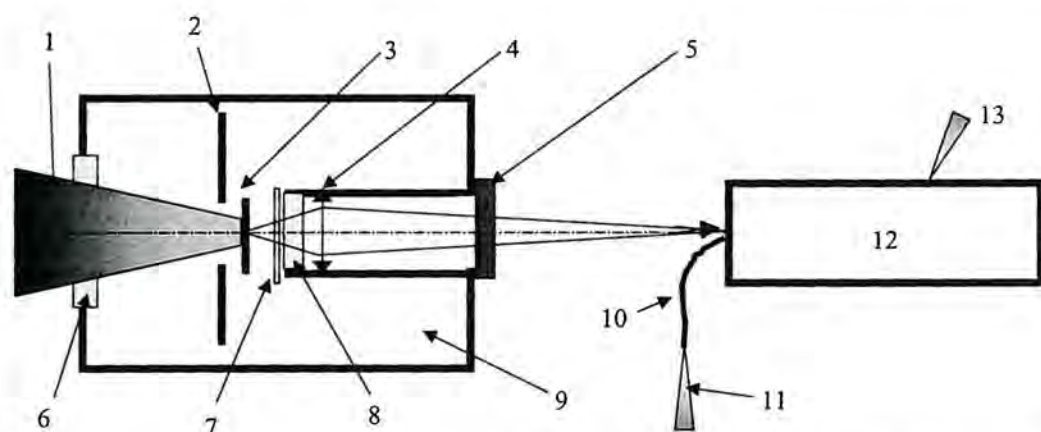


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по изучению уравнения состояния веществ на установках "Искра-5" и "Луч": 1 – лазерное излучение; 2 – бленда; 3 – мишень; 4 – объектив; 5 – светофильтр СС-4; 6 – входное окно; 7 – защитная пластина; 8 – вакуумное окно; 9 – камера взаимодействия; 10 – световод; 11 – лазерная метка времени; 12 – фотохронограф; 13 – оптический запуск

Лазерное излучение после преобразования в нелинейном кристалле во вторую гармонику с помощью растровой и асферической линз фокусируется на мишень 3 в пятно размером ~ 600 мкм. Основные параметры лазерного импульса, подаваемого на мишень в экспериментах на установках "Искра-5" и "Луч", приведены в таблице.

Параметры лазерного импульса

Установка	Длина волны λ , мкм	Энергия E , Дж	Длительность импульса τ , нс
"Искра-5"	0,66	200	0,3–1,2
"Луч"	0,53	800	3,5

Изображение тыльной поверхности мишени на входной щели фотохронографа 12 в зависимости от размера камеры взаимодействия 9 строится с помощью объективов "Юпитер-3" с фокусным расстоянием $f = 50$ мм ("Искра-5") и "Юпитер-13" с фокусным расстоянием $f = 125$ мм ("Луч"). Относительное отверстие обоих объективов $d/f = 1:1,5$. Масштаб построения изображения $M = 8:1$. Размер регистрируемой области мишени составляет 800 мкм.

Для подавления фонового сигнала от вводимой в камеру второй гармоники лазерного излучения на мишени устанавливается бленда 2, загораживающая входной объектив от прямого лазерного пучка и его бликов. Кроме того, на диагностическом отверстии мишени камеры установлен светофильтр 5. Коэффициент пропускания светофильтра на $\lambda = 0,66$ мкм составляет $\sim 10^{-7}$, свечение же ударной волны ($\lambda = 0,35-0,48$ мкм) ослабляется не более чем в 1,2 раза.

Запуск фотохронографа с необходимым для выхода электронного изображения на рабочий участок развертки опережением ~ 2 нс осуществляется импульсом лазерного излучения первой гармоники (см. рис. 1).

Для привязки момента выхода ударной волны к моменту прихода лазерного излучения на мишень используется импульс второй гармоники, отбираемый за счет отражения от задней грани кристалла-преобразователя. Отбор происходит со всей лазерной апертуры, что вызвано необходимостью устранения эффекта неравномерности генерации лазера в ближней зоне. Импульс метки фокусируется на вход волоконного световода, выходной торец которого располагается на входной щели фотохронографа. Помимо удобства введения излучения на входную щель регистратора, световод обеспечивает равномерное перемешивание излучения. Импульс метки используется также для измерения временной формы воздействующего излучения. Для измерения задержки относительно прихода излучения на мишень проведена серия калибровочных экспериментов без мишени при подаче греющего пучка после ослабления на вход фотохронографа. Погрешность привязки составила не более 10 пс.

Используемый фотохронограф разработан авторами специально для данной методики. Необходимость разработки была обусловлена как повышенными требованиями к временному и пространственному разрешениям и динамическому диапазону регистрации, так и спецификой проведения экспериментов. Например, практика измерений показала необходимость быстрого гашения регистратора после окончания развертки. Дело в том, что в ряде экспериментов наблюдалось сквозное прогорание мишени через 10–15 нс после прихода лазерного излучения на мишень. Выходящий на тыльную поверхность факел горячей плазмы на порядок и более превышал освещенность фотокатода электронно-оптического преобразователя по сравнению с регистрируемым сигналом свечения ударной волны. Длительность свечения факела составляла ~ 100 нс. В итоге снимаемый заряд фотоэлектронов от факела оказался на три–четыре порядка больше, чем от ударной волны. К моменту выхода плазменного факела на тыльную поверхность мишени развертка (длительность 6 нс/экран) выводила электронное изображение за пределы экрана, однако из-за рассеяния электронов на элементах конструкции электронно-оптического преобразователя происходила однородная фоновая засветка экрана. Для устранения этого эффекта в конструкцию фотохронографа введен специально разработанный блок гашения, подающий через 5 нс после окончания развертки на ускоряющий электрод отрицательный импульс напряжения, обеспечивая тем самым запирающее действие регистратора на время ~ 1 мс.

Изображение с выходного экрана считывается с помощью четырнадцатиразрядной ПЗС-камеры с последующей передачей информации в компьютер.

Временное разрешение

Основная особенность методики измерения скорости ударной волны, с точки зрения фотохронографии, заключается в следующем. В большинстве случаев регистраторы используются для измерения длительности импульсов. При этом, как правило, погрешность на уровне 10 % считается удовлетворительной. В данной методике измеряется длительность интервалов времени между моментами выхода ударной волны на тыльные поверхности слоев и импульсом временной привязки к моменту прихода излучения на мишень. Требования к погрешности временных измерений, диктуемые слабой зависимостью скорости ударной волны от давления, повышаются практически на порядок. Погрешность измерения скорости ударной волны не должна превышать 2–5 % (характерный уровень погрешности для газодинамических экспериментов). При такой постановке задачи крайне важным становится вопрос о калибровке скорости и нелинейности развертки фотохронографа. Для устранения нелинейности развертки увеличена амплитуда импульса напряжения, подаваемого на схему формирования пилообразного импульса развертки, и тщательно подобраны хронизирующие R, L, C элементы.

Измерение скорости, нелинейности и задержки срабатывания развертки фотохронографа проводилось с помощью генератора синусоидального сигнала частотой $(867,3 \pm 0,5)$ МГц. Калибровочный сигнал подавался на пластины вертикального отклонения. В результате на экране электронно-оптического преобразователя прописывалась синусоида, частота которой соответствовала частоте калибровочного генератора. Снято ~ 10 калибровочных кадров. Из-за отсутствия фазовой синхронизации между разворачивающим и синусоидальными сигналами калибровочные метки случайным образом смещались на экране. В результате получена подробная зависимость скорости развертки от координаты на экране. Погрешность измерения скорости развертки, определяемая погрешностями частоты калибровочного генератора и обработки изображений, не превышала 1 %. Влияние нелинейности развертки не превышало пределов погрешности.

Для определения погрешности измерения временных интервалов была проведена серия модельных экспериментов, в которых субнаносекундный лазерный импульс делился на две части. Обе части импульса с контролируемой задержкой ~ 1 нс подавались на вход фотохронографа. За счет изменения задержки запуска регистратора оба импульса оказывались в разных частях развертки. Эту серию опытов можно рассматривать как дополнительный способ измерения скорости и нелинейности развертки.

Во всех экспериментах интервалы времени между моментами достижения обоими импульсами характерных точек (уровни 0,1; 0,5; 0,9 от максимума на фронте и срезе и самого максимума) совпадают с разбросом не более ± 10 пс. В пределах погрешности 1 % отклонения скорости и нелинейности развертки от результатов калибровки с помощью синусоидального генератора не обнаружено. Таким образом, с учетом погрешности считывания изображения и погрешности калибровки скорости развертки фотохронограф позволяет измерять наносекундные интервалы времени между импульсами с погрешностью 1 %. При сокращении интервала до 0,1 нс без увеличения скорости развертки погрешность его измерения возрастает до 10 %.

Погрешность измерения толщины слоев мишени с помощью существующей методики составляет $\sim 0,2$ мкм. При исследовании тонких слоев толщиной ~ 5 мкм погрешность достигает 4 %, что и определяет величину погрешности измерения скорости ударной волны, равную ~ 6 %. При использовании слоев большей толщины (≥ 20 мкм) погрешность измерения скорости ударной волны уменьшается до ≤ 2 %.

Пространственное разрешение. Для его определения на месте мишени располагалось поле 25-й миры ГОИ № 3 с пространственной частотой 50 пар штрихов/мм. При коэффициенте контраста изображения миры 0,4 пространственное разрешение составило 10 мкм.

Чувствительность. Расчетная оценка чувствительности метода проведена по формуле Планка с учетом светосилы оптической схемы, спектральных коэффициентов пропускания ее элементов и спектральной чувствительности фотохронографа с фотокатодом типа S20. Основная часть сигнала регистрировалась в спектральном интервале 0,4–0,5 мкм. Минимальная регистрируемая температура на фронте ударной волны определялась следующим условием: на разрешаемом временном элементе 30 пс с пространственным разрешением 10 мкм должно регистрироваться не менее 10 фотоэлектронов. При выполнении этого условия минимальная регистрируемая температура составила $T_{\text{мин}} = 0,8$ эВ. Верхний уровень регистрируемых температур ограничен динамическим диапазоном фотохронографа и составил $T_{\text{макс}} \sim 40$ эВ.

Динамический диапазон регистрации. Для корректного определения интервала времени между импульсами каждый из них должен быть зарегистрирован с динамическим диапазоном не менее 10. Это условие, а также разброс получаемых в экспериментах температур на фронте ударной волны, разная светимость материалов мишеней диктуют необходимость реализации динамического диапазона регистрации ≥ 100 . Электронно-оптический преобразователь с фотокатодом, сформированным непосредственно на материале входного окна, при регистрации субнаносекундных импульсов имеет динамический диапазон ≤ 50 . Причина ограничения состоит в деформации поля вблизи катода, вызываемой уносимым фотоэлектронами зарядом, что приводит к потере временного и пространственного разрешений. Этот эффект может быть существенно снижен, если фотокатод будет сформирован на проводящей подложке [9]. Возникающая при этом дополнительная электрическая емкость катода удерживает поле от деформации. Именно такая технология применена в используемом нами электронно-оптическом преобразователе.

Измерения динамического диапазона регистрации проведены в реальной геометрии эксперимента по схеме, описанной выше. Был снят ряд кадров с различным уровнем экспозиции. Подсветка миры осуществлялась лампой-вспышкой с длительностью импульса ~ 1 мкс. Интенсивность подсветки регулировалась с помощью ослабляющих фильтров. Для каждого значения интенсивности на участке, ширина которого вдоль направления развертки соответствовала используемой в экспериментах ширине времяанализирующей щели (временное разрешение 30 пс), определены контрасты изображения. Если использовать в качестве общепринятого критерия потери пространственного разрешения снижение коэффициента контраста до уровня 0,1, методика позволяет регистрировать свечение тыльной поверхности мишени с динамическим диапазоном ~ 200 при пространственном разрешении 50 пар штрихов/мм.

Результаты регистрации в экспериментах

В качестве иллюстрации на рис. 2 представлен результат регистрации ударной волны в одном из экспериментов на установке "Искра-5". Вторая гармоника лазерного излучения с энергией 200 Дж и длительностью 1,2 нс была сфокусирована на мишень в пятно диаметром 500 мкм. Базовый слой состоял из алюминия толщиной $(20,8 \pm 0,5)$ мкм. На тыльную поверхность базового слоя была напылена медная ступенька толщиной $(4,5 \pm 0,2)$ мкм. На рис. 2,а нулевой отсчет по шкале времени соответствует моменту прихода лазерного излучения на мишень. Привязка осуществлялась по положению лазерной метки.

Сформированная в базовом слое ударная волна неоднородна, ее средняя скорость изменяется от $(18,4 \pm 0,4)$ км/с в центре до $(16,2 \pm 0,4)$ км/с на краю пятна. На границе ступеньки скорость равна $(17,0 \pm 0,4)$ км/с. Характерный профиль ударной волны сохраняется и на ступеньке. Скорость ударной волны в ступеньке составила $(16,7 \pm 1,0)$ км/с. Давление на ударной адиабате составило $P = 9,6$ Мбар [10].

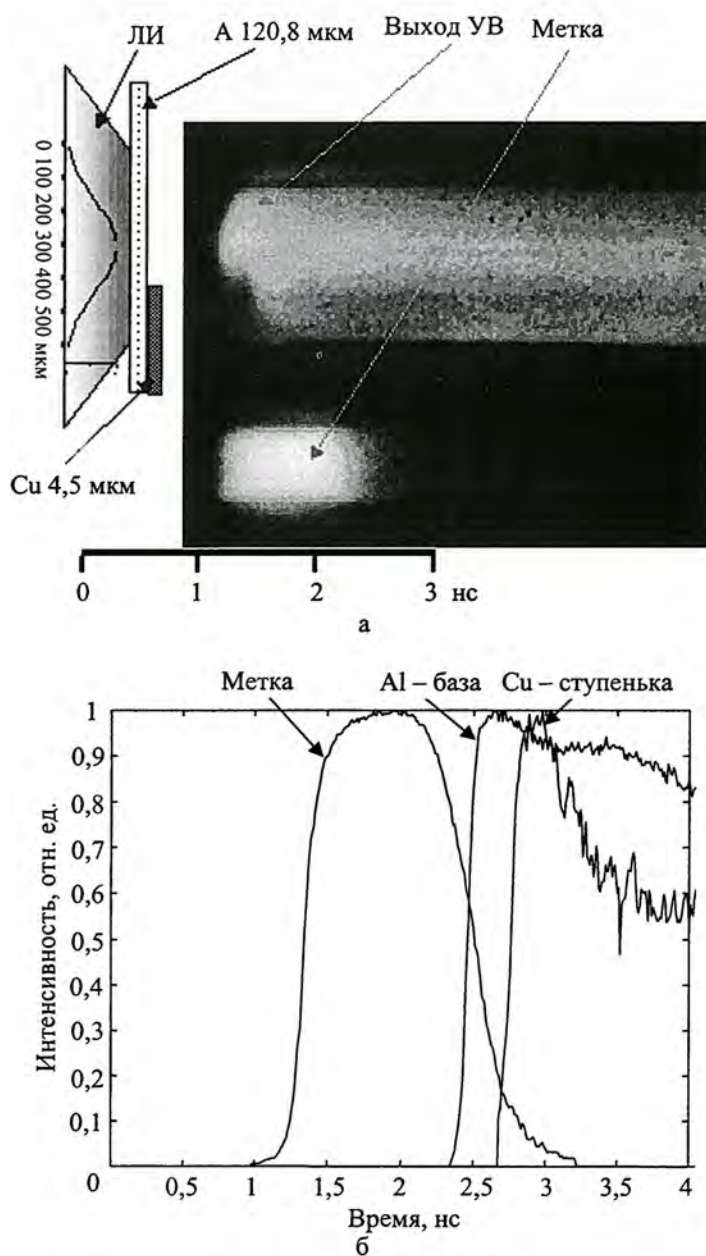


Рис. 2. Результат регистрации скорости ударной волны:
а – регистрограмма; б – пропись по времени

Заключение

На базе установок "Искра-5" и "Луч" созданы лазерные стенды для проведения экспериментов по исследованию уравнения состояния вещества при высоких давлениях. Разработана мето-

дика измерения скорости распространения ударных волн в образцах с использованием высокоскоростного фотохронографа. Погрешность измерения скорости ударной волны в зависимости от толщины слоев составила 2–6 %, пространственное разрешение 10 мкм, динамический диапазон регистрации 200.

Список литературы

1. Campbell E. M., Holmes N. C., Libby S. B. et al. // *Laser and Particle Beams*. 1997. Vol. 15(4). P. 607.
2. Evans A. M., Freeman N. J., Graham P. et al. // *Laser and Particle Beams*. 1996. Vol. 14(2). P. 113.
3. Da Silva L. B., Celliers P., Collins C. W. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 78(3). P. 483.
4. Kirillov G. A., Murugov V. M., Punin V. T. // *Laser and Particle Beams*. 1990. Vol. 8(4). P. 827.
5. Galachov I. V., Garanin S. G., Eroshenko V. A. et al. // *Fusion Engineering and Design*. 1999. Vol. 44. P. 51.
6. Альтшуллер Л. В. // *УФН*. 1965. Т. 85(2). С. 197.
7. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М.: Наука, 1966.
8. Lower Th., Sigel R., Eidmann K. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1994. Vol. 72, № 20. P. 3186.
9. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. *Вакуумные фотоэлектронные приборы*. М.: Радио и связь, 1988.
10. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ: Справочник / Под ред. Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.

Photochronographic Methods of the Impact Wave Rate Measurements in Experiments on Study of the Matter State Equation at "Iskra-5" Laser Facility

S. A. Belkov, A. G. Kravchenko, A. V. Kunin, D. N. Litvin, V. M. Murugov,
A. V. Senik

A method of the measurement of the impact wave that appears in samples at the laser radiation of them in experiments on study of the impact matter condensability is described. The method is based on the electrooptic photochronograph application. The methods provide a spatial resolution 10 mkm, a measurement error of the impact wave rate 2.5 %, a dynamic registration range ~ 200. The results of measurements are presented.