

УДК 621.386.8

Методика исследования спектрального состава и длительности излучения, сопровождающего выход ударной волны на тыльную поверхность материалов при прямом лазерном облучении

Разработана фотохронографическая методика исследования спектрального состава и длительности излучения, сопровождающего выход ударной волны на тыльную поверхность нагружаемой мишени. Проведена оценка спектрального разрешения методики. Предложен метод сквозной калибровки канала регистрации по излучению источника с известным спектром. Результаты проведенной калибровки использованы для восстановления спектрального распределения по полученным спектрохронограммам.

**Л. А. Душина, Д. С. Корниенко,
А. Г. Кравченко, Д. Н. Литвин,
В. В. Мисько, А. Н. Рукавишников,
А. В. Сеник, К. В. Стародубцев,
В. М. Тараканов, А. Е. Чаунин**

Введение

Эксперименты по исследованию уравнений состояния вещества (УРС) с прямым облучением мишеней второй гармоникой ($\lambda = 0,53$ мкм) неодимового лазера проводятся во ВНИИЭФ на установке ЛУЧ [1]. Возникающая в образце ударная волна (УВ) при выходе на его тыльную поверхность возбуждает свечение этой поверхности в видимом диапазоне. Это свечение регистрируется щелевым фотохронографом.

Как правило, в экспериментах по ударной сжимаемости с нагружением лазером измеряется скорость фронта ударной волны [2–4]. Данная скорость определяется по задержке УВ в слоях известной толщины, а момент выхода УВ фиксируется по появлению свечения поверхности слоя.

Для правильной интерпретации и повышения точности получаемых параметров вещества за фронтом УВ очень полезны были бы также измерения температуры. В качестве первого шага в реализации измерений температуры нами разработана методика изучения спектрального состава излучения тыльной поверхности мишени.

Второй целью исследований спектра излучения тыльной поверхности материалов являлось повышение чувствительности методики для работы с относительно слабыми УВ, распространяющимися со скоростью < 10 км/с, и оптимизации динамического диапазона регистрации, так как амплитуды регистрируемых сигналов от различных материалов сильно разнятся.

Для получения таких данных разработана фотохронографическая методика, обеспечивающая высокое спектральное и временное разрешение регистрации. Отработка, испытание и внедрение разработанной методики проведены на стенде исследований уравниваний состояния вещества установки ЛУЧ. В работе приведены экспериментальные результаты по исследованию спектра излучения и его длительности при выходе ударной волны с тыльной поверхности алюминия и свинца.

Излучение, регистрируемое фотохронографом в экспериментах по УРС, характеризуется коротким фронтом нарастания интенсивности сигнала с характерной длительностью порядка 100 пс. При обработке экспериментальных данных в анализ включаются амплитуды сигналов фронтов свечения исследуемых образцов. Дальнейшее свечение мишени является фоновым и из диагностики исключается гашением фотохронографа.

Изображение тыльной поверхности мишени строится диагностическим объективом на входной щели регистратора СЭР-5. Для защиты от фонового лазерного излучения из камеры служит светофильтр СС4, ослабляющий силовое лазерное излучение до 10^6 раз.

Основные параметры фотохронографической части методики: длительность развертки составляет 4,2 нс/экран; методика обеспечивает погрешность определения временных задержек сигналов УВ из исследуемых образцов в пределах временного разрешения электронно-оптического преобразователя (ЭОП) $\delta t \leq 20$ пс; пространственное разрешение по мишени составляет $\delta l \leq 15$ мкм; динамический диапазон регистратора составляет ≈ 600 .

Для получения дополнительных данных о спектральном составе регистрируемого излучения в оптическую схему включен диспергирующий элемент – спектрограф. Основные требования к спектрографу по рабочему диапазону длин волн и спектральному разрешению следуют из спектрального диапазона чувствительности (от 300 до 700 нм) и пространственного разрешения (70 мкм) регистратора.

Требования, предъявляемые к спектрографу:

- обзорность по длине волны – от 300 до 700 нм;
- спектральное разрешение $\delta \lambda \leq 1$ нм;
- возможность вписать в существующую оптическую схему, простота обращения, компактность.

Для разрабатываемой методики был использован линзовый спектрограф с компенсацией астигматизма SL 100M производства предприятия Solar ТП (Белоруссия). Данная модель обеспечивает спектральное разрешение 0,5 нм в диапазоне от 360 до 1400 нм. Конструкция спектрографа предусматривает регулировку наблюдаемого диапазона и позволяет провести сопряжение получаемой спектральной дисперсии с вертикальной щелью хронографа.

Схема диагностики представлена на рис. 1, там же схематично показано соответствие входных щелей спектрографа и фотохронографа. По схеме видно, что из всего изображения мишени

на регистрацию попадает локальный элемент изображения, вырезанный щелями спектрографа и фотохронографа. Пространственный анализ, задаваемый вертикальной координатой фотохронографа, превращен в этой методике в спектральный. Входная ширина щели спектрографа задает спектральное разрешение регистрации, ширина щели фотохронографа – временное (T). Подобный метод анализа спектрально-временного состава оптического излучения был использован авторами ранее [5].

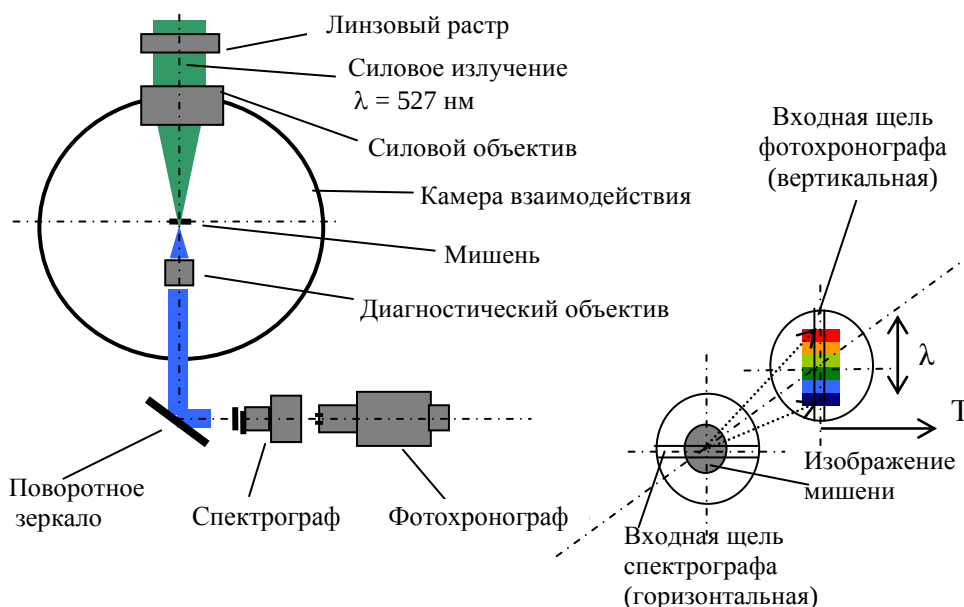


Рис. 1. Схема измерения спектрального состава сигнала ударной волны

Высота щели фотохронографа составляет $h = 8,5$ мм, спектральная дисперсия спектрографа равна $23,7$ нм/мм. Отсюда следует, что щель регистратора охватывает спектральный диапазон $\Delta\lambda = 200$ нм. Интересующий спектральный диапазон составляет $\Delta\lambda = 700 - 300 = 400$ нм. Поэтому для получения информации о светимости материалов во всем диапазоне чувствительности регистратора требуется проведение двух экспериментов со спектральной перестройкой методики.

Калибровка спектральной чувствительности методики

Оптическая схема диагностики включает в себя ряд элементов, вносящих искажения в регистрируемый спектр: выходное окно камеры взаимодействия, диагностический объектив, поворотное зеркало, объективы и дифракционная решетка спектрографа, а также входной объектив хронографа. Это обусловлено нелинейностью их работы в разных участках спектра: пропускание, отражение, нелинейность спектральной эффективности решетки. Электронно-оптическая часть методики (фотокатод ЭОП) также имеет существенную особенность в виде нелинейности спектральной чувствительности.

Ввиду сложности аттестации отдельных частей методики была проделана сквозная калибровка спектральной чувствительности измерительного канала. В качестве источника непрерывного по спектру излучения использовалась эталонная вольфрамовая лампа СИ-10-300.

Вольфрамовая лента накаливания лампы СИ-10-300 устанавливалась перед рабочей мишенью со стороны облучения.

На рис. 2 приведен пример изображений спектра излучения лампы, снятых для диапазонов длин волн 450–520 нм, а также записи регистрируемого спектра – $f_{\text{рег}}(\lambda)$. На спектрограмме присутствует лазерный репер – $\lambda = 527$ нм.

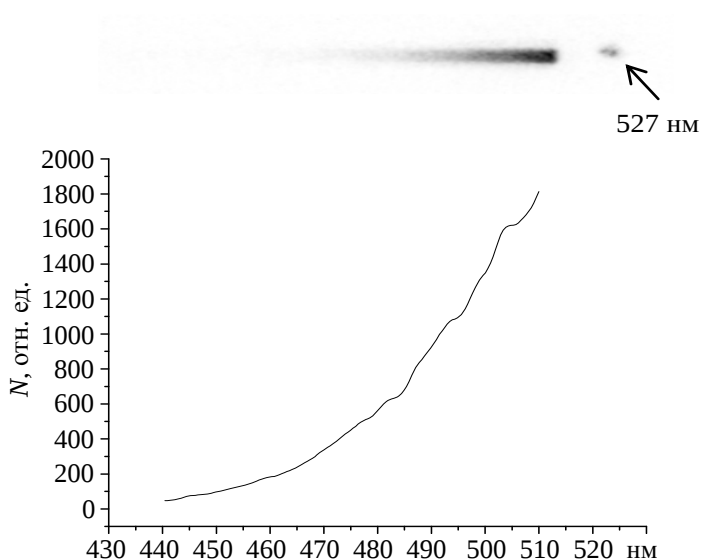


Рис. 2. Зарегистрированное спектральное распределение свечения образцовой лампы в диапазоне 450–520 нм

На рис. 3 приведен результат сквозной калибровки методики $f_{\text{кал}}(\lambda)$ для всего спектрального диапазона регистрации. К полученной кривой была применена операция сглаживания высоких частот. Для достоверности кривой корректировки спектральной чувствительности с коротковолновой стороны был отброшен крайний участок спектра лампы до $\lambda = 450$ нм, так как в этом диапазоне уровень полезного сигнала сравним с уровнем фона.

При настройке методики на заданный спектральный участок в эксперименте с рабочей мишенью привязка к калибровочной кривой осуществлялась по лазерной линии.

Была проведена оценка реальной погрешности спектрального распределения, полученного с помощью описанного метода восстановления. Для этого проводилось сравнение восстановленного спектра образцовой лампы с ее паспортными характеристиками. Результат сравнения представлен на рис. 4.

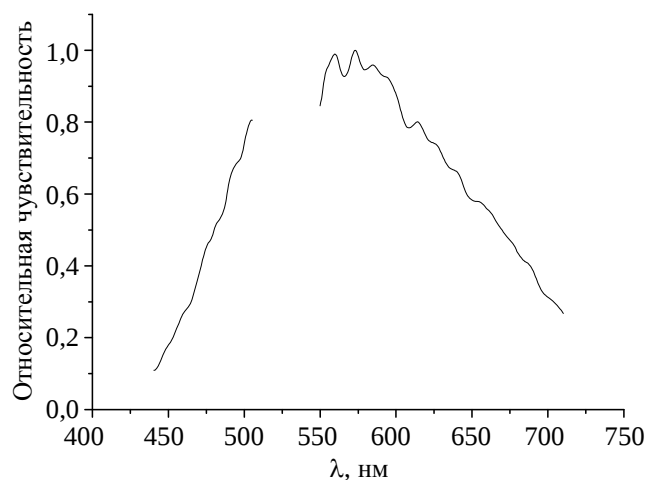


Рис. 3. Результат сквозной калибровки спектральной чувствительности оптической схемы и фотохронографа $f_{\text{кал}}(\lambda)$

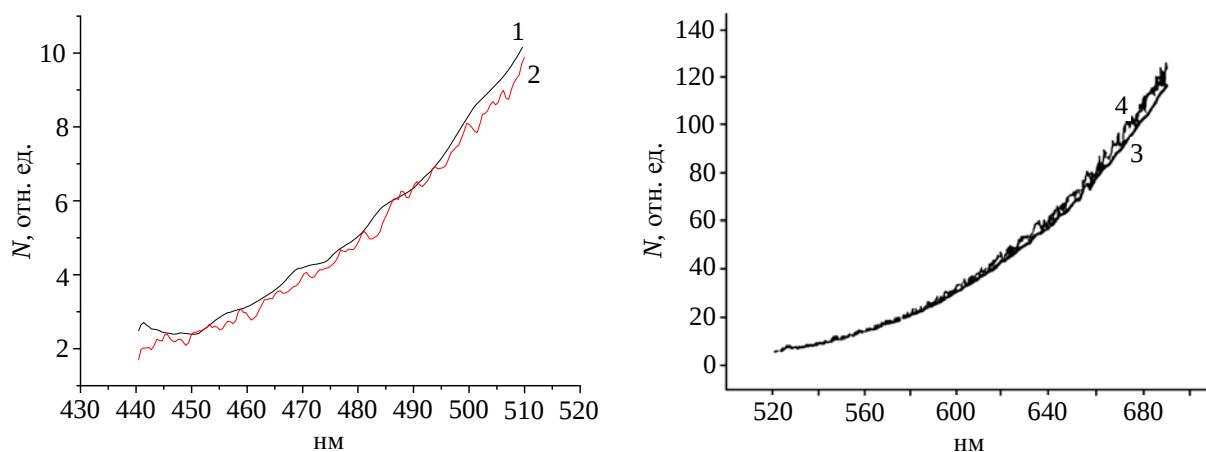


Рис. 4. Спектры образцовой лампы: 1 – паспортный спектр лампы при токе $I = 12$ А; 2 – восстановленный спектр («синяя» область); 3 – паспортный спектр лампы при токе $I = 10$ А; 4 – восстановленный спектр («красная» область)

Для восстановления были выбраны снятые спектры свечения лампы, не использованные при получении сквозной чувствительности канала регистрации. Погрешность восстановленного спектра составила $\delta\lambda = \pm 10\%$.

Постановка экспериментов

Эксперименты по исследованию спектра свечения мишеней при воздействии УВ проводились на малой камере установки ЛУЧ. Облучение мишеней осуществлялось в штатной постановке экспериментов по изучению свойств ударной сжимаемости различных материалов. Длина волны силового лазерного излучения составляла $\lambda = 527$ нм, энергия облучения $E \approx 350$ Дж, дли-

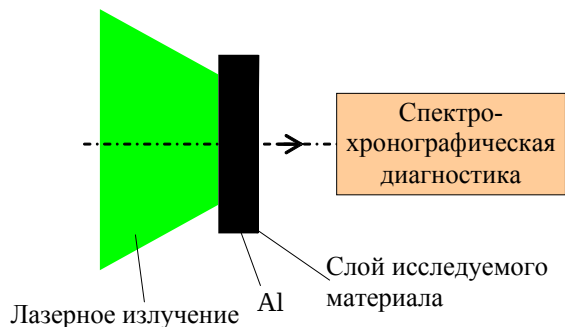


Рис. 5. Схема мишени для спектральных исследований

ной ударной волны. На внешнюю сторону напылен слой исследуемого материала толщиной порядка 4 мкм.

Теоретический расчет по программе СНДП [6] показал, что в существующих условиях оптимальная толщина базового слоя алюминия составляет 30 мкм, на котором скорость создаваемой УВ максимальна. Следовательно, повышается яркость светового сигнала, сопровождающего выход УВ, что дает запас по чувствительности методики при исследовании различных материалов.

Как указывалось выше, спектральная дисперсия измерительного канала такова, что одновременно весь интересующий спектральный диапазон от 350 до 700 нм не помещается по высоте щели фотохронографа. Поэтому спектральный диапазон разбит на два участка: 400–527 нм и 527–700 нм. Регистрация свечения в этих областях проводилась в двух разных экспериментах. Для уменьшения ошибки сопряжения спектральных характеристик «синей» и «красной» областей мощность облучения мишеней поддерживалась одинаковой.

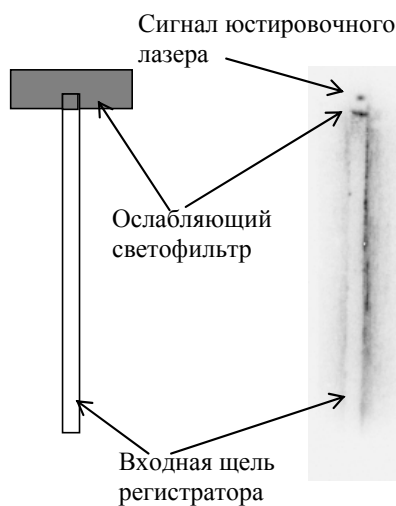


Рис. 6. Схематичное изображение входной щели регистратора и настроечный статический кадр с сигналом юстировочного лазерного излучения $\lambda = 527$ нм

тельность лазерного импульса по полувысоте $\tau_{0,5} = 2$ нс, интенсивность лазерного излучения облучения порядка $0,5 \cdot 10^{14}$ Вт/см².

В данной работе предполагается сравнить спектры свечения разных материалов при выходе на поверхность ударной волны, поэтому в экспериментах с разными материалами необходимо обеспечивать одинаковые конструкции мишеней и условия облучения.

Для исследований была выбрана конструкция мишени, схема которой показана на рис. 5. Базовый слой из алюминия служит для создания стационар-

Поскольку из камеры взаимодействия в измерительный канал попадает небольшая часть рассеянного силового излучения $\lambda = 527$ нм (в штатных опытах по изучению ударной сжимаемости веществ это излучение отсекается селективным оптическим фильтром СС4), а применение светофильтров недопустимо, силовое излучение введено в измерительную схему в качестве репера для спектральной привязки рабочей спектрохронограммы. Для защиты от насыщения этот сигнал ослаблялся светофильтром, устанавливаемым на край входной щели фотохронографа.

На рис. 6 приведен настроечный кадр с изображением входной щели регистратора.

Восстановление реального спектрального распределения излучения мишеней

К спектральным распределениям сигналов УВ в экспериментах с алюминием и свинцом была применена процедура восстановления реального спектра путем введения коррекции спектральной чувствительности канала регистрации.

На рис. 7 показан результат совмещения первичных и восстановленных спектральных распределений излучения Al- и Pb-мишеней для всего спектрального диапазона измерений. Из диаграмм видно, что характер восстановленного спектра существенно отличается от первичного, с максимумом на длине волны $\lambda \approx 530$ нм как для Al-, так и для Pb-мишеней. На кривых восстановленного спектра имеется рост сигналов в коротковолновую область спектра, что говорит о том, что максимум интенсивности смещен в коротковолновую область, выходящую за спектральный диапазон измерений. При этом в диапазоне длин волн от 550 до 700 нм первичные и восстановленные спектральные распределения хорошо совпадают.

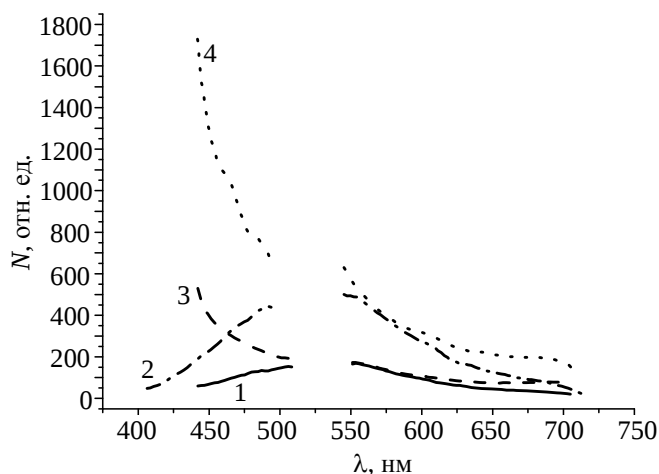


Рис. 7. Результат совмещения первичных и восстановленных спектральных распределений излучения Al- и Pb-мишеней при средней интенсивности лазерного излучения $0,5 \cdot 10^{14}$ Вт/см²: 1, 2 — измеренное распределение в алюминии и свинце, 3, 4 — восстановленное распределение в алюминии и свинце

Характер восстановленных спектральных кривых качественно подтверждает результаты расчетов температуры за фронтом ударной волны в алюминии и свинце. Для расчетных температур тыльной поверхности мишеней в приближении планковского распределения их излучательной способности максимум спектральной кривой примерно соответствует $\lambda \approx 30$ нм.

Количественного сравнения температуры регистрируемого излучения с расчетной температурой за фронтом ударной волны не проводилось. Как следует из работы [7], из получаемых методикой данных возможно восстановление только цветовой температуры излучения. Перевод этой величины в температуру за фронтом УВ представляет ряд особенностей, обсуждение которых выходит за рамки данной работы.

Обсуждение результатов

Проведены измерения спектрального распределения излучения алюминиевых и свинцовых мишеней при выходе на их поверхность ударной волны в спектральном диапазоне от 400 до 700 нм.

Первичные экспериментальные спектральные кривые имеют непрерывный характер с максимумом около $\lambda \approx 530$ нм и спадом практически до нуля на краях наблюдаемого спектрального диапазона. Аналогичные результаты получены в работе [8], где исследуется свечение алюминиевых мишеней при близких условиях нагружения.

Интенсивность свечения свинцовой мишени во всем измеряемом спектральном диапазоне выше, чем у алюминия, приблизительно в 4 раза.

Для оптимизации методики исследований свойств ударной сжимаемости веществ интерес представляют именно первичные спектры излучения, снятые непосредственно в эксперименте и не подвергавшиеся процедуре восстановления реального спектра. На рис. 8 приведена первичная кривая спектрального распределения излучения алюминиевой мишени. Прямоугольником (а) выделен спектральный диапазон, который в настоящее время используется для регистрации сигналов УВ в штатных исследованиях по УРС. Для отстройки от силового лазерного излучения используется светофильтр СС4 толщиной 3 мм. Прямоугольником (б) обозначен спектральный диапазон, выделяемый светофильтром ОС12 толщиной 5 мм.

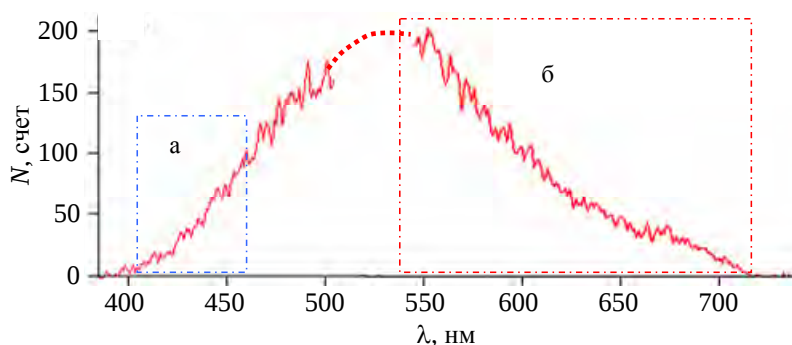


Рис. 8. Первичный спектр излучения Al-мишени: а – спектральный диапазон регистрации со светофильтром СС4; б – со светофильтром ОС12

При полученном спектральном распределении выгоднее брать диапазон не в области длин волн от 400 до 460 нм (рис. 8,а), а в более длинноволновой – от 540 до 720 нм (рис. 8,б). В этом случае интенсивность регистрируемого сигнала можно увеличить примерно в 7 раз.

При дальнейших исследованиях возможна доработка мишенного узла камеры взаимодействия для обеспечения полной герметизации измерительного тракта от проникновения силового лазерного излучения. В этом случае для регистрации можно будет использовать весь спектр излучения мишени – от 400 до 700 нм, что позволит в результате увеличить амплитуду сигнала до 20 раз.

Шаги по увеличению чувствительности методики в экспериментах по изучению УРС могут быть необходимы для продвижения исследований в диапазон с меньшими скоростями ударных волн. В этом случае станет возможна аттестация метода «отражения» в диапазоне низких давлений.

В настоящее время нижний порог регистрации скоростей УВ-методикой составляет от 8 до 10 км/с. Результаты регистрации УВ с такими скоростями приведены в работе [9]. Увели-

чение регистрируемого сигнала в 20 раз расширит диагностируемый диапазон скоростей УВ вниз до примерно 4 км/с, что даст возможность проводить исследования веществ в области давлений < 1 Мбар.

Временной анализ полученных спектрограмм показал, что временной характер сигналов ударной волны в разных участках спектра не отличается от временной формы интегрального по спектру сигнала УВ, регистрируемого в штатных экспериментах по исследованию УРС. Сигналы УВ для алюминиевой и свинцовой мишеней (интегральные по спектру) приведены на рис. 9.

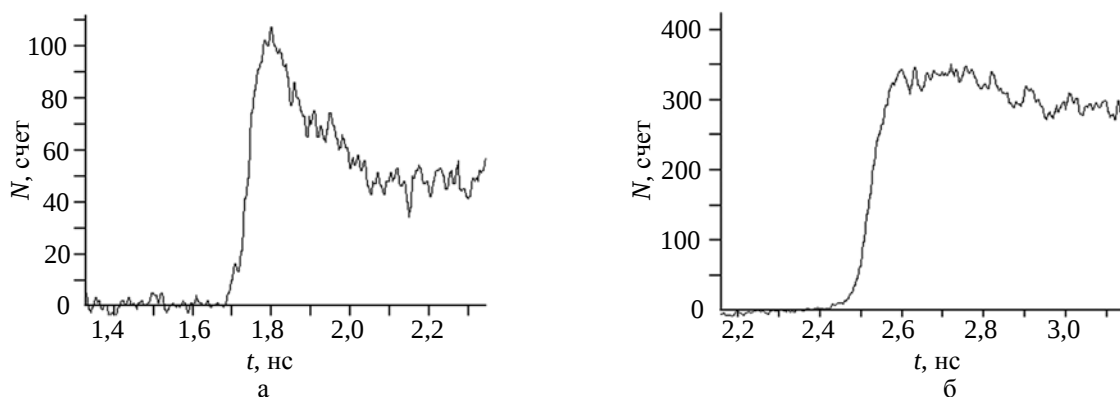


Рис. 9. Временная форма импульса сигнала УВ в Al (а) и Pb (б)

Для сигналов характерен короткий фронт нарастания < 100 пс, но форма сигналов за фронтом различается. У алюминия после фронта наблюдается резкий спад (примерно вдвое) за время порядка 200 пс, сигнал свинцовой мишени имеет пологий спад. Проведенные исследования показали, что такая разница во временной форме сигналов УВ Al и Pb не связана со спектральными характеристиками излучения этих мишеней. Возможно, это явление связано с параметрами газообразного вещества (плотность, прозрачность), улетающего с тыльной поверхности мишени при выходе на нее ударной волны.

Спектрально-временной анализ сигналов УВ позволил обнаружить до этого не замеченный эффект – отставание фронта сигнала УВ в «красной» части спектра. Этот эффект наблюдается и для алюминия, и для свинца.

Заключение

Зарегистрированы и обработаны спектры свечения тыльной стороны мишеней в спектральном диапазоне длин волн от 400 до 700 нм.

Установлено, что интенсивность свечения свинцовой мишени во всем измеряемом спектральном диапазоне выше алюминиевой примерно в 4 раза при близких условиях нагружения.

Обнаружен эффект отставания фронта сигнала ударной волны в «красной» части спектра. Максимальная задержка свечения на длине волны $\lambda = 700$ нм относительно $\lambda = 500$ нм составила 50 пс.

Намечены пути увеличения чувствительности методики до 20 раз за счет выбора оптимального спектрального диапазона регистрации, что даст возможность проводить исследования веществ в области давлений < 1 Мбар.

Для расширения динамического диапазона регистрации предложен метод, заключающийся в покрытии наблюдаемых поверхностей из разных материалов тонким слоем ($\sim 0,1$ мкм) одного из материалов. При этом амплитуда сигналов УВ была приблизительно одинакова и соответствовала свечению материала покрытия.

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И. и др. // Квантовая электроника. 2005. № 35. С. 299.
2. Альтшулер Л. В. // УФН. 1965. № 85(2). С. 197.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966.
4. Бельков С. А., Кравченко А. Г., Кунин А. В. и др. // ПТЭ. 2006. № 2. С. 150.
5. Derkach V. N., Bondarenko S. V., Garanin S. G. et al. // Laser and Particle Beams. 1999. Vol. 17(4). P. 603.
6. Бельков С. А., Долголева Г. В. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 1992. Вып. 1. С. 59.
7. Hall T. A., Benuzzi A., Batani D. et al. // Phys. Rev. E. 1997. Vol. 55(6). P. 6356.
8. Basko M., Lower Th., Kondrashov V. N. et al. // Ibid. Vol. 56(1). P. 1019.
9. Ватулин В. В., Жидков Н. В., Кравченко А. Г. и др. // Физика плазмы. 2010. № 4. С. 1.

A Technique for Studying the Spectral Composition and Duration of Radiation Accompanying a Shock Wave at the Rear Surface of Materials under Direct Laser Irradiation

L. A. Dushina, D. S. Kornienko, A. G. Kravchenko, D. N. Litvin, V. V. Mis'ko,
A. N. Rukavishnikov, A. V. Senik, K. V. Starodubtsev, V. M. Tarakanov,
A. E. Chaunin

A photochronographic technique for studying the spectral composition and duration of radiation that accompanies the appearance of a shock wave on the rear surface of a loaded target has been developed. The spectral resolution of this technique was evaluated. A method of the through calibration of the recording channel using radiation of a source with the known spectrum was proposed. The results of the performed calibration are used to restore the spectral distribution on the basis of the obtained spectrochronograms.