УДК 81.23

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-1-68-73

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА VISAR ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ГАЗЕ И ТВЁРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Зиборов В. С., Ростиллов Т. А.

*Объединённый институт высоких температур Российской академии наук
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, Российская Федерация*

Аннотация. Статья посвящена развитию экспериментальных методов исследования физико-химических процессов в ударных волнах. Метод лазерной интерферометрии VISAR применён для измерения скорости свободной поверхности твёрдого тела при взаимодействии с фронтом газовой ударной волны. Впервые получены профили скорости поверхности при воздействии ударной волны в лёгком и относительно тяжёлом газе. Показано, что метод позволяет обеспечить более высокое временное разрешение, чем лазерный шлирен метод применительно к ударным волнам, что делает его перспективным для измерений структуры фронта ударных волн в газах.

Ключевые слова: ударная волна, метод лазерной интерферометрии, структура фронта, профиль скорости.

APPLICATION OF THE VISAR METHOD TO STUDY THE INTERACTION OF THE SHOCK FRONT IN THE GAS AND SOLID SURFACE

V. Ziborov, T. Rostilov

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
ul. Izhorskaya 13, stroenie 2, 125412 Moscow, Russian Federation*

Abstract. The paper considers the development of experimental methods for the study of physical and chemical processes in shock waves. The VISAR laser interferometry method is used to measure the velocity of a free surface of a solid body interacting with the front of a gas shock wave. For the first time, free surface velocity profiles are obtained in interaction with a shock wave in a light and a relatively heavy gas. It is shown that the method provides a higher temporal resolution than the laser schlieren method applied to shock waves, which makes it promising for measuring the structure of the shock wave front in gases.

Keywords: shock wave, method of laser interferometry, wavefront structure, velocity profile.

Введение

Физико-химические процессы во фронте ударных волн остаются наиболее сложным объектом для экспериментального исследования ввиду объективных причин [1]. На треке в 10÷100 парных соударений в условиях даже относительно слабых ударных волн наблюдаются возбуждение сверх равновесного излучения, ионизация [2; 3]. Присутствие малых концентраций тяжёлого инертного газа

оказывает влияние на сдвиг порогов детонации, что связывают с увеличением толщины фронта ударной волны [4]. Существующие численные модели описывают эти явления лишь качественно, требуются надёжные экспериментальные данные для верификации.

Экспериментальный подход

Одним из наиболее информативных является лазерный шлирен метод. Он был применён авторами [5] для исследования структуры фронта УВ в гелии с малой добавкой ксенона. Относительно большая толщина фронта, связанная с наличием ксенона в смеси, позволила выявить ряд закономерностей, но примерно 80 нс начального участка профиля плотности оказались нечувствительны к любым изменениям параметров ударной волны, что рационально отнести к влиянию пограничного слоя. Более высокое временное и пространственное разрешение было достигнуто при диагностике предпробойных состояний в газе [6; 7]. Однако это достигнуто в условиях, когда газ изначально покоился относительно оптических окон, сквозь которые вводится лазерный луч. Движение фронта ударной волны вызывает появление пограничного слоя, который имеет конечную толщину и изгибает фронт волны, делая его трёхмерным. Появляется так называемая дуга прогиба, радиус которой как, правило, соизмерим с толщиной фронта ударной волны. В данной работе предпринята попытка обойти эту трудность.

В рамках развития экспериментальных методов исследования физико-химических процессов в ударных волнах метод лазерной интерферометрии VISAR [8; 9] применён для измерения профиля скорости свободной поверхности серебряной фольги, взаимодействующей с ударной волной в инертных газах гелии и аргоне. На данном этапе была поставлена задача убедиться, что тип газа, его атомарный вес влияют на результаты измерений данным методом.

Эксперимент

Генератором ударных волн в газе служила высоковакуумная ударная труба калибром 100 мм (стенд Яшма). Лазерный луч от VISAR попадал на мишень, установленную перпендикулярно нормали к фронту ударной волны, через окно в торце ударной трубы. Схема измерений показана на рис. 1. Вплоть до достижения ударной волной торца ударной трубы исследуемый газ перед оптическим окном для ввода лазерного излучения покоился. Фото измерительной секции установки показано на рис. 2. Использован непрерывный одноволновой лазер «Моцарт» с длиной когерентности луча более 100 м. Схема интерферометра взята из [6]. Полученные профили скорости движения свободной поверхности фольги из серебра толщиной 1 мкм показаны на рис. 3 и 4.

Хорошо видно, что метод позволяет «видеть» нарастание скорости в течение нескольких сотен наносекунд, далее, вероятно, фольга разрушается. Также видно, что темпы увеличения скорости свободной поверхности фольги в гелии (кривая (1) на рис. 3 и рис. 4) и в аргоне заметно различаются (кривые (2), (3)), что говорит о чувствительности профилей к атомному весу газа. Также в не-

Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – ударная труба, 2 – торец УТ, 3 – окно, 4 – луч лазера VISAR, 5 – кольцо, 6 – фольга Ag 1 мкм.

Рис. 2. Измерительная секция УТ Яшма.

Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности фольги из Ag 1 мкм: (1) – He 2760 м/с, (2) – Ar 2510 м/с, (3) – Ar 2400 м/с.

Рис. 4. Профили скорости свободной поверхности фольги Ag 1 мкм:
(1) – He 2900 м/с, (2) – Ar 2200 м/с.

которых режимах наблюдаются участки профилей с резким изменением темпа роста скорости (за ~ 10 нс на 20% и более), что даёт основания полагать, что метод применим для определения структуры фронта ударной волны с точностью, более чем на порядок величины, превышающей достигнутую в более ранних работах.

Заключение

Экспериментально показана принципиальная возможность применения метода VISAR для измерений во фронте ударной волны в газах. Требуется расширение экспериментальных условий, чтобы оценить диапазон его применения и точность.

Статья поступила в редакцию 10.01.2019 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966, 686 с.
2. Зиборов В. С., Ефремов В. П., Фортов В. Е. Эффект ионизации во фронте слабой ударной волны, распространяющейся в инертном газе, разбавленном малой концентрацией $\text{Mo}(\text{CO})_6$ // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2007. Т. 86. № 3. С. 211–215.
3. The structure of shock wave front in helium containing the small concentration of the heavy molecules $\text{Mo}(\text{CO})_6$ / Ziborov V. S., Efremov V. P., Shumova V. V., Fortov V. E. // ISIS 18: 18th International Shock Interaction Symposium. Rouen, 15–18 July 2008. P. 165–169.
4. Куликов С. В., Червонная Н. А. О влиянии малых добавок Хе на порог детонации смеси $\text{O}_2\text{--H}_2\text{--He}$ // Химическая физика. 2018. Т. 37. № 1. С. 66–70.

5. Применение лазерного шлирен метода для измерений структуры фронта ударной волны в гелии с малой примесью тяжёлых молекул / Зиборов В. С., Галиуллин Р. А., Ефремов В. П., Шумова В. В., Фортвов В. Е. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2014. № 4. С. 106–109.
6. Barker L. M., Hollenbach R. E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // *Journal of Applied Physics*. 1972. Vol. 43(11). P. 4669–4675.
7. Daniel H. Dolan Foundations of VISAR analysis. Technical Report № SAND2006-1950. USA: Sandia National Laboratories, 2006. 90 p.
8. Паркевич Е. В. Установка для исследования предпробойной стадии газового разряда с помощью лазерного зондирования // *Приборы и техника эксперимента*. 2017. № 3. С. 81–87.
9. Особенности формирования прианодной плазмы на ранней стадии наносекундного разряда / Паркевич Е. В., Хирьянова А. И., Агафонов А. В., Ткаченко С. И., Мингалеев А. Р., Шелковенко Т. А., Огинов А. В., Пикуз С. А. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2018. Т. 153. Вып. 3. С. 504–513.

REFERENCES

1. Zel'dovich Ya. B., Raizer Yu. P. *Physics of Shock Waves and High-temperature Hydrodynamic Phenomena*. Mineola, N.Y., Dover Publ., 2002.
2. Ziborov V. S., Efremov V. P., Fortov V. E. [Ionization effect in the front of a weak shock wave propagating in an inert gas diluted by a small amount of Mo(CO)₆]. In: *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters], 2007, vol. 86, no. 3, pp. 211–215.
3. Ziborov V. S., Efremov V. P., Shumova V. V., Fortov V. E. The structure of shock wave front in helium containing the small concentration of the heavy molecules Mo(CO)₆. In: *ISIS 18: 18th International Shock Interaction Symposium. Rouen, 15–18 July 2008*. pp. 165–169.
4. Kulikov S. V., Chervonnaya N. A. [Influence of small Xe additives on the detonation threshold for O₂–H₂–He mixtures]. In: *Khimicheskaya fizika* [Russian Journal of Physical Chemistry B], 2018, vol. 37, no. 1, pp. 66–70.
5. Ziborov V. S., Galiullin R. A., Efremov V. P., Shumova V. V., Fortov V. E. [Application of laser shlieren method for measurment of shock front structure in helium with small admixture of heavy molecules]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2014, no. 4, pp. 106–109.
6. Barker L. M., Hollenbach R. E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. In: *Journal of Applied Physics*, 1972, vol. 43(11), pp. 4669–4675.
7. Daniel H. Dolan Foundations of VISAR analysis. Technical Report № SAND2006-1950. USA, Sandia National Laboratories Publ., 2006. 90 p.
8. Parkevich E. V. [The installation to study the prebreakdown stage of a gas discharge by laser probing]. In: *Pribory i Tekhnika Eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2017, no. 3, pp. 81–87.
9. Parkevich E. V., Khirianova A. I., Agafonov A. V., Tkachenko S. I., Mingaleev A. R., Shelkovenko T. A., Oginov A. V., Pikuz S. A. [Anode plasma formation at the initial stage of a nanosecond air discharge]. In: *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2018, vol. 153, no. 3, pp. 504–513.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зиборов Вадим Серафимович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
e-mail: ziborov.vs@yandex.ru

Ростиллов Тимофей Андреевич – стажёр-исследователь Лаборатории ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
e-mail: t.rostilov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ziborov Vadim Serafimovich – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Senior researcher at the Laboratory of Shock Wave Effects, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences;
e-mail: ziborov.vs@yandex.ru

Rostilov Timofey Andreevich – trainee researcher at the Laboratory of Shock Wave Effects, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences;
e-mail: t.rostilov@yandex.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Зиборов В. С., Ростиллов Т. А. Применение метода VISAR для исследования взаимодействия фронта ударной волны в газе и твёрдой поверхности // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2019. № 1. С. 68–73. DOI: 10.18384-2310-7251-2019-1-68-73

FOR CITATION

Ziborov V. S., Rostilov T. A. Application of the VISAR method to study the interaction of the shock front in the gas and solid surface In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2019, no. 1, pp. 68–73.
DOI: 10.18384-2310-7251-2019-1-68-73