

## НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ УДАРНОГО СЖАТИЯ СЕРЫ

М. Ф. Гоголя, М. А. Бражников

Сера является веществом, обладающим большим числом фаз высокого давления, и единственным элементом периодической системы, у которого в жидком состоянии обнаружены довольно четкие фиксируемые переходы [1]. Несмотря на сложность фазовой диаграммы и противоречивость имеющихся данных, сера является интересным объектом исследования с точки зрения поведения конденсированного вещества при динамических нагрузках в условиях высокого давления и температуры. В частности, большое количество работ посвящено изучению возможности перехода серы из полупроводникового в металлическое состояние при сильном сжатии как в условиях статического нагружения [2–5], так и в ударных волнах [6–9].

По своим химическим свойствам сера является сильным окислителем, способным взаимодействовать с различными веществами с выделением большого количества энергии. В последнее время интерес к поведению серы при высоких давлениях усилился в связи с необходимостью описания твердофазных экзотермических реакций сульфидирования, принципиальная возможность которых экспериментально показана при ударном нагружении в ампулах сохранения [10] и при ударном сжатии в прямой волне [11, 12].

Однако в настоящее время известно всего несколько работ [6–9, 13], в которых определялись параметры ударной адиабаты твердой серы, и лишь в одной из них [9] приводятся данные по поведению расплавленной (жидкой) серы. Диапазон давлений, при которых исследовалась твердая сера, составляет 4–26.6 ГПа, а для жидкой серы он составляет 4.1–17.1 ГПа, причем наблюдается большой разброс приводимых авторами данных по ударно сжатой твердой сере.

Литературные источники не дают никакой информации об экспериментальном определении температуры ударно сжатой серы ни в твердом, ни в жидком начальных состояниях.

В настоящей работе был, во-первых, расширен диапазон определения ударной адиабаты как твердой, так и жидкой серы, а во-вторых, была получена информация о температурах ударного сжатия.

Исследования проводились на природных кристаллах ромбической серы Куйбышевского месторождения плотностью  $2.07 \text{ г/см}^3$ , а также с жидкой серой в виде расплава, полученного из порошка серы (ГОСТ 127-76), при температуре  $145^\circ$ . Как правило, толщина образцов составляла 2–3 мм. Кристаллы серы имели желто-лимонный цвет, а расплав — коричневый. Кристаллы серы шлифовались вручную, расплав получали в глицериновой бане, сера плавилась в толстостенной алюминиевой ювенте, которая позволяла термостатировать жидкую серу в течение времени проведения опыта.

Регистрация времени прохождения ударной волны по образцу и интенсивности возникающего при этом излучения проводилась на двухканальной оптической установке с эффективными длинами волн 420 и 720 нм. Временное разрешение установки в целом определялось типом используемого регистрирующего осциллографа С1-75 или ОК-33<sup>М</sup>, частотные характеристики которых 150 и 17 МГц соответственно. Время прохождения ударной волны по образцу данной толщины определялось главным образом на С1-75.

Для анализа полученных результатов необходимо учесть поглощение света в образцах в исходном состоянии. Проведенная с учетом данных [14, 15] предварительная оценка поглощения кристаллической и жидкой серы показывает, что в первом приближении в случае кристаллов им можно пренебречь. Для жидкой серы при толщинах образцов порядка 4 мм в синей области (в начальный момент времени) возможно двукратное занижение измеряемого сигнала. Эта оценка согласуется с визуальными наблюдениями. Что же касается поглощения

ударно сжатой (кристаллической и жидкой) серы, то по совокупности данных [6—9, 14, 16, 17] в рассматриваемом диапазоне давлений ее можно считать непрозрачной.

Для четкой фиксации толщины жидких образцов (расплавов) использовались прозрачные при обычных условиях преграды, такие как плексиглас (ПММА) и оптические кристаллы каменной соли (NaCl) и фторида лития (LiF), последний использовался наиболее часто. В отличие от NaCl и LiF, которые принято считать прозрачными при ударном нагружении, ПММА должен терять прозрачность (прозрачность вещества рассматривается в исследуемом диапазоне давлений). Предполагая отсутствие каких-либо модификационных превращений в сере при ударном сжатии, можно ожидать в случае прозрачных окон прирост излучения в отраженной волне сжатия и резкое падение его (отсечку) в случае ПММА. В опытах с кристаллами серы в качестве "окна" использовался LiF.

Ударные волны в образцах создавались ударом метаемой металлической пластины по металлическому экрану, на который помещались образцы. Пластины и экраны изготовлялись из дюралюминия. Скорость полета ударников определялась в предварительных опытах. Типичные записи (для жидкой и кристаллической серы) приведены на рис. 1.

Исходя из оценки поглощения кристаллов серы ожидалось, что запись излучения во времени будет иметь вид полки с подъемом интенсивности в момент отражения ударной волны от границы LiF. Однако полученные при разных интенсивностях ударного сжатия экспериментальные записи отличаются от ожидаемой картины. После быстрого подъема излучения (за время чуть больше, чем временное разрушение установки) происходит его постепенный спад с небольшим подъемом излучения на LiF, сравнимым по величине с реализующимися в первый момент времени (рис. 1, а).

В опытах с жидкими образцами ожидалось нарастающие профили излучения с большими градиентами в синей области (эффективная длина волны 420 нм) из-за более сильного поглощения несжатой серы; при отражении волны от NaCl, LiF ожидалось приросты интенсивности излучения. Полученные экспериментальные записи качественно совпадают с предполагаемыми, т. е. наблюдается нарастающий профиль излучения, действительно более резкий в синей области, с подъемом на NaCl и LiF (рис. 1, б) и с резким спадом (отсечкой) в случае использования ПММА. Однако экспериментальные профили излучения не могут быть описаны в рамках закона Бугера—Бэра с постоянным коэффициентом поглощения на эффективной длине волны (предполагая, что излучение фронта ударной волны в жидкой сере не зависит от времени).

Точность определения времени прохождения ударной волны по образцу жидкой серы главным образом зависела от точности определения момента выхода

волны на контактную границу с преградой (исключая опыты с использованием ПММА), сложность определения момента выхода понятна из рассмотрения рис. 1, б. Поэтому при данной постановке опытов ошибка измерения скорости составила около 3.5%. По измеренной скорости ударной волны  $D$  и известной изотропе материала экрана находились давление ударной волны  $p$  и массовая скорость  $u$ .

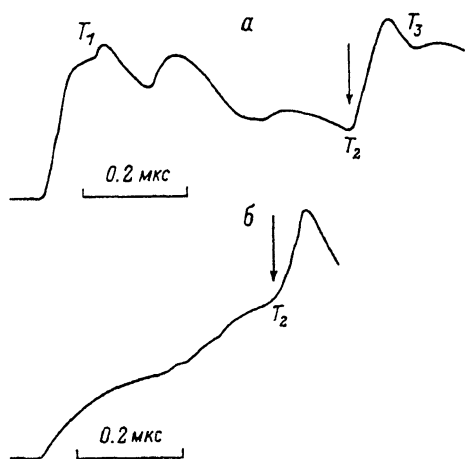


Рис. 1. Типичные записи интенсивности излучения во времени.

а — образцы кристаллической серы ( $p=38.8$  ГПа), б — расплавленной серы ( $p=39$  ГПа) с использованием LiF в качестве оконного материала. Стрелками указаны моменты выхода ударной волны на контактную границу образца — LiF.

Полученные интенсивности излучения были пересчитаны на яркостную температуру. При этом необходимо отметить, что, хотя значения этих температур на разных длинах волн различаются в пределах ошибки измерения, наблюдается систематическое превышение температур в синей области над температурами в красной.

Как видно из вышеприведенного описания полученных записей интенсивности, в ударно сжатой сере реализуется сложный профиль температур, на который в случае жидкой сере накладывается поглощение света еще несжатым веществом, различными для разных длин волн. Поэтому для жидкой сере мы считаем возможным привести лишь значения температур в момент подхода ударной волны к LiF. Для кристаллической сере — три значения температур: максимальное значение в начальный момент времени  $T_1$ , значение перед выходом на контактную границу с LiF  $T_2$  и значения температуры сере в отраженной ударной волне  $T_3$ . Так как в кристаллической сере реализуется спадающий профиль температур, то для правильной интерпретации полученных данных необходимо указать толщину исследуемого образца —  $L$ .

Состояние сере	$u_3$ , км/с	$D$ , км/с	$p$ , ГПа	$u$ , км/с	$T_1$ , К	$T_2$ , К	$T_3$ , К	$L$ , мм
Кристаллическая	2.39	6.89	41.2	2.91	2500 2680	2350 2570	2550 2780	2.58 2.05
	2.29	6.73	38.8	2.80	2470	2340	2530	1.91
	2.05	6.30	32.8	2.52	2430	2120	2450	3.76
	1.87	6.08	29.0	2.31	Уровень температуры 1700—1900 К			
Жидкая	3.07	8.09	55.0	3.80	—	4550±250	—	—
	2.39	7.30	39.0	2.98	—	3600±150	—	—
	2.29	7.19	36.9	2.86	—	3250±100	—	—
	2.05	6.50	30.5	2.61	—	2500±100	—	—
	1.71	6.00	23.7	2.21	—	1850±100	—	—

Результаты экспериментов приведены в таблице. Яркостные температуры получены с учетом усреднения значений по длинам волн и по количеству приведенных опытов (от двух до шести на точку). Условные обозначения таблицы соответствуют обозначениям, введенным в тексте, кроме того, массовая скорость, определяющая состояние в экране, обозначена как  $u_3$ .

Полученные в результате обработки значений скоростей ударных волн параметры ударных адиабат жидкой и твердой сере приведены на рис. 2, для сравнения там же представлены данные авторов [8, 9, 13]. Из представленного рисунка видно, что результаты настоящей работы и данные [9] как по жидкой, так и по твердой сере лежат на гладких кривых, что предполагает возможность их совместной обработки. Для жидкой сере такая обработка приводит к следующей зависимости:  $D = 1.80 \cdot u + 2.36 \cdot u^2 - 0.184 \cdot u^3$  [км/с] со среднеквадратичным отклонением  $\sigma = 0.11$  км/с, а для твердой сере  $D = 2.26 + 1.71 \cdot u - 0.039 \cdot u^2$  км/с со среднеквадратичным отклонением  $\sigma = 0.15$  км/с.

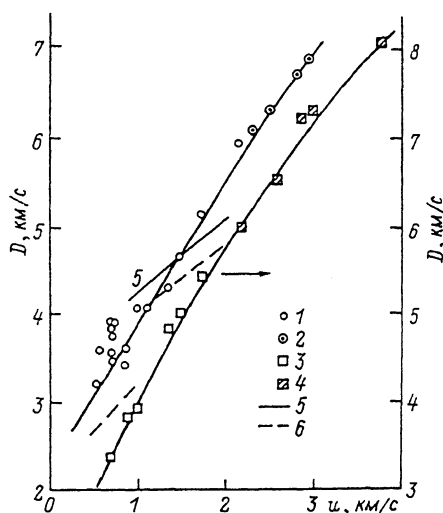


Рис. 2.  $D$ - $u$  зависимости. Экспериментальные результаты.

Твердая сере: 1 — [9], 2 — настоящая работа, 3 — [13], 4 — [8]; жидкая сере: 3 — [9], 4 — настоящая работа.

Полученные в результате настоящей работы данные, по мнению авторов, могут быть использованы для предварительных количественных оценок хода твердофазных химических реакций при ударном сжатии с серой в качестве одного из компонентов. Вместе с тем проделанная работа выявила сложную картину излучения серы, реализующуюся при ударном сжатии. Такая картина, а также противоречивость имеющихся на сегодняшний день данных по ударному сжатию серы (это наглядно видно на рис. 2) соответствуют, с одной стороны, сложному поведению серы вблизи нормальных условий, а с другой стороны, объясняется сильным влиянием ее начальных параметров, таких как плотность и структура (прессованная, литая, кристаллическая) — для образцов твердой серы, и температуры — для жидкой, на реализующееся в результате ударного сжатия состояние.

Авторы выражают признательность С. М. Гаврилкину за участие в проведении ряда экспериментов.

#### Список литературы

- [1] Тонков Е. Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. М., 1979. 192 с.
- [2] Вережагин Л. В., Яковлев Е. Н., Виноградов В. В., Сакун В. П. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. Вып. 8. С. 540—542.
- [3] Dunn K. J., Bundy F. P. // J. Chem. Phys. 1977. Vol. 67. N 11. P. 5048—5053.
- [4] Chhabildas L. S., Ruff A. L. // J. Chem. Phys. 1977. Vol. 66. N 3. P. 983—985.
- [5] Яковлев Е. Н., Степанов Г. Н., Тимофеев Ю. А., Виноградов В. В. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28. Вып. 6. С. 369—371.
- [6] David H. G., Hamann E. D. // J. Chem. Phys. 1958. Vol. 28. N 5. P. 1006.
- [7] Joigneau S., Thouvenin J. // Comp. Rend. 1958. Vol. 246. N 23. P. 3422—3425.
- [8] Berger J., Joigneau S., Bottet G. // Comp. Rend. 1960. Vol. 250. N 26. P. 4331—4335.
- [9] Постнов В. И. Канд. дис. Черноголовка, 1986. 142 с.
- [10] Бацанов С. С. // Хим. физика. 1987. Т. 6. № 11. С. 1576—1582.
- [11] Бацанов С. С., Доронин Г. С., Клочков С. В., Теуд А. И. // ФГВ. 1986. Т. 22. № 6. С. 134—137.
- [12] Гоголя М. Ф., Воскобойников И. М., Долгобородов А. Ю. и др. // Хим. физика. 1991. Т. 10. № 3. С. 429—431.
- [13] March S. P. University of California Press. Berkeley (California), 1980.
- [14] Mellor J. W. A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. Vol. X. London; New York; Toronto, 1930. 958 p.
- [15] Лекае В. М., Елкин Л. М. Физико-химические и термодинамические константы элементарной серы. М., 1964. 121 с.
- [16] Slykhouse T. E., Drickamer H. G. // J. Phys. Chem. Sol. 1958. Vol. 7. N 2/3. P. 275.
- [17] Peansky M. J., Jurgensen C. W., Drickamer H. G. // J. Chem. Phys. 1984. Vol. 81. N 12. Pt II. P. 6407—6408.

Институт химической физики  
им. Н.Н.Семенова РАН  
Москва

Поступило в Редакцию  
11 марта 1991 г.

07

Журнал технической физики, т. 62, в. 3, 1992

© 1992 г.

## ВИНТОВЫЕ ДИСЛОКАЦИИ КАК ФАЗОВЫЕ ДЕФЕКТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТЕА СО<sub>2</sub> ЛАЗЕРА

Б. Д. Бобров, Г. Ю. Снежков

Технологическим СО<sub>2</sub> лазерам свойственны высокие плотности потока излучения, что является причиной многочисленных эффектов, оказывающих заметное влияние на выходные характеристики лазерного пучка [1]. Совместно с газодинамическими неоднородностями и флуктуациями плотности активной среды, неоднородностями разряда ответственность за нестабильность характеристик пучка несут также самовоздействие, термодиформации зеркал и прозрачных элементов,