

ИЗОМОРФНЫЙ $\gamma \rightarrow \alpha$ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ЦЕРИЯ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

М. Н. Павловский, В. В. Комиссаров, А. Р. Кутсар

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

При помощи манганинового датчика давления зарегистрирована конфигурация ударного фронта в церии, свидетельствующая об осуществлении в нем изоморфного превращения при давлении 0,76 ГПа.

Экспериментальная информация о свойствах веществ, находящихся в сжатом состоянии, представляет большой интерес в научном и практическом отношении. Представляет интерес, в частности, и информация об осуществлении в сжатых веществах фазовых превращений, носящих как полиморфный, так и изоморфный характер, полученная при помощи оптических, рентгеноструктурного, электрофизических и других методов [1, 2] исследования. Если к настоящему времени о полиморфных превращениях твердых тел при их сжатии накоплен довольно обширный экспериментальный материал [3], то сведения об изоморфных фазовых превращениях весьма скудны. Признаки протекания изоморфных фазовых превращений отмечены лишь у небольшого числа веществ, например у церия, цезия, иттербия, стронция и некоторых других. Получение же сведений о влиянии давления на свойства, например, металлов, состоящих из атомов с незаполненными d -уровнями и заполненными уровнями с более высокими главными квантовыми числами, полезно для общего представления о смещении зон в металлах в зависимости от давления. Поэтому новые данные об изоморфных фазовых переходах имеют особую ценность.

Превращение церия $\gamma \leftrightarrow \alpha$ [4, 5] является наиболее изученным изоморфным фазовым переходом первого рода, при котором скачкообразно изменяется объем ($\approx 16,5\%$), а симметрия кристаллической решетки церия (кубическая, гранецентрированная) остается неизменной. Это превращение принято связывать с изменением структуры электронной оболочки, переходом $4f$ -электронов на уровень $5d$ [5]. С повышением температуры объемный и тепловой эффекты перехода одновременно уменьшаются, что позволило предположить, а в даль-

нейшем и установить экспериментально существование у церия критической точки [6, 7] изоморфного фазового перехода первого рода, в которой тепловой и объемный эффекты перехода обращаются в нуль. Изучению превращения церия $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ при статическом сжатии посвящено большое количество исследований, обзор которых дан в [3, 8]. В то же время в литературе полностью отсутствуют сведения о электронном превращении церия $\gamma \rightarrow \alpha$ в условиях ударного сжатия. Протекание фазового перехода при ударном сжатии, сопровождающегося большим изменением объема, приводит, как известно [9], к расщеплению ударного фронта (УФ) и образованию в определенном интервале давлений многоволновой структуры. Регистрация такого расщепления УФ убедительно доказывает протекание фазового перехода. В настоящей работе в результате проведения опытов выявлена многоволновая структура УФ в церии.

Схема экспериментов показана на рис. 1. Для выявления профиля УФ использована методика манганинового датчика [10], вклеиваемого при помощи эпоксидной смолы между двумя дисками из церия, начальная плотность которого составляла $\rho_0 = 6,76 \text{ г/см}^3$. Датчики представляли собой плоские бифилярные спирали диаметром $\approx 4,5 \text{ мм}$, толщиной $0,03 \text{ мм}$. Их изолировали с помощью пластин слюды толщиной $0,02 \text{ мм}$. Суммарная толщина пакета датчика с изоляцией $\approx 0,10 \text{ мм}$. Импульсное питание датчика включалось за $\approx 40 \text{ мкс}$ до прихода к нему ударного фронта. Чтобы не учитывать сопротивления медных выводов при определении электросопротивления датчика в ударно-сжатом состоянии, датчик снабжен четырьмя одинаковыми выводами. Одна пара выводов служила для подачи на датчик напряжения питания. При помощи другой пары с

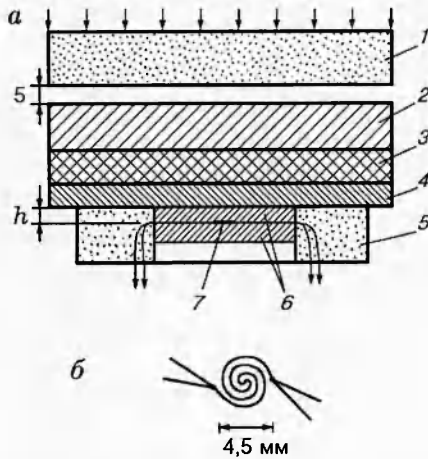


Рис. 1. Схема опыта по выявлению конфигурации ударного фронта нагружения в церии (а) и поперечное сечение рабочего участка манганинового датчика 0,03 × 0,3 мм (б):

а: 1 — заряд взрывчатого вещества $\varnothing 120 \times 20$ мм из ТНТ, 2 — медный ударник толщиной 12 мм, 3 — прокладка из полиэтилена толщиной 9 мм, 4 — медный экран толщиной 6 мм, 5 — эпоксидная смола, 6 — образец церия (или меди) толщиной $h = 4$ мм, 7 — манганиновый датчик давления

датчика снимался регистрируемый сигнал. Поскольку изменение сопротивления манганинового датчика в процессе ударного сжатия составляло лишь $1 \div 7\%$ его начального значения, использовали потенциметрическую схему измерений [10] с компенсацией [11] снимаемого с датчика базового напряжения.

В качестве регистраторов использовали цифровой запоминающий осциллограф типа С9-8, осциллограф типа С9-4 и цифровое устройство преобразования информации СУПИ-19. Приведенный на рис. 2 многоволновый профиль УФ в церии представляет собой результат обработки данных эксперимента на компьютере. Первым по церию распространяется упругий предвестник с амплитудой p_1 . Далее через интервал времени $t_1 = 0,25$ мкс к датчику приходит первая ударная волна сжатия, амплитуда которой p_3 соответствует критическому давлению фазового перехода. Малая крутизна фронта этой волны определяется, видимо, протеканием в ее переходной области процессов, связанных с вязкостью, сдвиговой прочностью и другими факторами. Еще через интервал времени $t_2 = 0,65$ мкс к датчику приходит вторая ударная волна сжатия с амплитудой p_2 . Время размытия ее фронта t_3 харак-

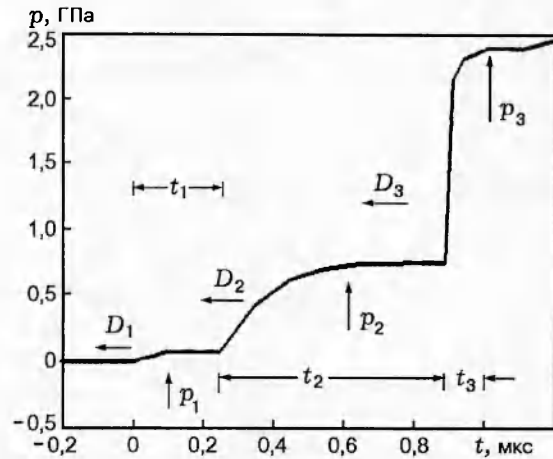


Рис. 2. Многоволновый профиль УФ в церии после обработки исходных экспериментальных данных на компьютере

теризует время протекания фазового перехода. Крутой фронт этой волны свидетельствует об очень быстрой перестройке электронной оболочки церия.

Как показали измерения, увеличение электросопротивления манганинового датчика $\Delta R/R_0$ в результате его сжатия распространяющейся по церию упругой волной составило $\approx 0,21\%$, первой ударной волной сжатия — $2,1\%$, второй ударной волной — 7% . Давление в распространяющихся по церию плоских волнах определяли по следующей зависимости электросопротивления манганина от давления ударного нагружения:

$$p = 37,0 \frac{\Delta R}{R_0} - 33,4 \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 \text{ [ГПа]}$$

при $p < 2,5$ ГПа.

Определенные таким образом значения давлений p_1, p_2 и p_3 приведены в таблице.

Представленная на рис. 3 осциллограмма контрольного опыта характеризует профиль УФ в таком же образце из меди, т. е. характеризует ударный импульс, нагружающий образец церия. Время размытия ударного фронта

Трехволновый фронт ударного нагружения церия	p , ГПа	$D^{\text{лаб}}$, км/с	$u^{\text{лаб}}$, км/с	v , см ³ /г
Упругий предвестник	0,08	2,33	0,005	0,1478
Первая ударная волна	0,76	2,03	0,060	0,1440
Вторая ударная волна	2,42	1,55	0,214	0,1280

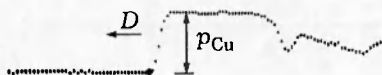


Рис. 3. Профиль ударной волны в меди:
период дискретизации 50 нс

в меди ($\approx 0,3$ мкс) определяет, естественно, примерно такое же время размытия фронта первой ударной волны сжатия церия. Изменение сопротивления манганинового датчика в этом случае составило 17 %, что соответствует давлению за фронтом ударной волны в меди (т. е. в экране нагружающего устройства) — $p_{Cu} = 5,9$ ГПа. При определении давления p_{Cu} , более высокого, чем в церии, использована зависимость $\Delta R/R_0 = f(p)$ для манганина [12].

Исходя из измеренных давлений за фронтами волн в церии (p_1 , p_2 и p_3), временных интервалов t между моментами прихода волн к манганиновому датчику, давления нагружения в медном экране нагружающего устройства, а также из известной скорости звука в церии $c_l = 2,33$ км/с [13] рассчитаны степени сжатия церия и его удельные объемы v за фронтами волн (см. таблицу). Параметры сжатия церия упругой и следующими за ней ударными волнами определены по формулам

$$u_1 = \frac{p_1}{\rho_0 c_l}, \quad \rho_1 = \rho_0 \frac{c_l}{c_l - u_1}, \quad v_1 = \frac{1}{\rho_1},$$

$$D_2^{лаб} = \frac{h + u_1 t_1}{h/c_l + t_1}, \quad D_2^{отн} = D_2^{лаб} - u_1,$$

$$\Delta u_{12} = u_2 - u_1 = \frac{p_2 - p_1}{\rho_1 D_2^{отн}}, \quad u_2 = u_1 + \Delta u_{12},$$

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{D_2^{отн}}{D_2^{отн} - \Delta u_{12}}, \quad v_2 = \frac{1}{\rho_2},$$

$$D_3^{лаб} = \frac{h + u_1 t_1 + u_2 t_2}{h/c_l + t_1 + t_2}, \quad D_3^{отн} = D_3^{лаб} - u_2,$$

$$\Delta u_{23} = u_3 - u_2 = \frac{p_3 - p_2}{\rho_2 D_3^{отн}}, \quad u_3 = u_2 + \Delta u_{23},$$

$$\rho_3 = \rho_2 \frac{D_3^{отн}}{D_3^{отн} - \Delta u_{23}}, \quad v_3 = \frac{1}{\rho_3},$$

где u_1 , ρ_1 , v_1 — массовая скорость, плотность, удельный объем церия за фронтом упругого предвестника; D_2 , u_2 , ρ_2 , v_2 — волновая скорость первой ударной волны и массовая скорость, плотность, удельный объем за ее фронтом; D_3 , u_3 , ρ_3 , v_3 — то же самое для второй

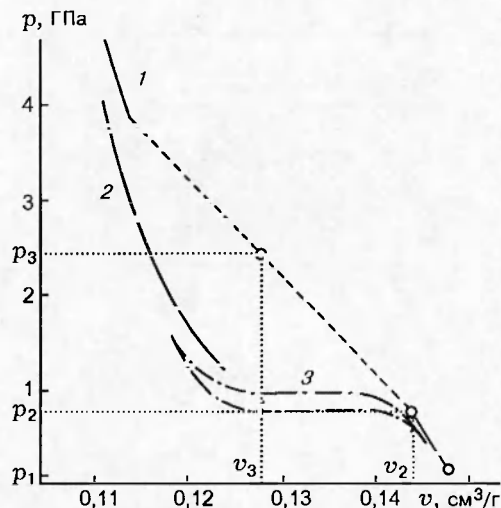


Рис. 4. Зависимость $p(v)$ для церия:

1 — ударная адиабата церия из [13], 2 — изотерма из [14], 3 — данные по статическому сжатию из [15], о — данные таблицы

ударной волны; $D^{лаб}$ и $u^{лаб}$ даны в лабораторной системе координат, $D^{отн}$ и $u^{отн}$ — то же самое относительно движущегося вещества.

Приведенные в таблице значения получены по результатам шести опытов, выполненных в одной и той же постановке. Воспроизводимость амплитуд сигналов с манганиновых датчиков была в пределах разрешающей способности регистратора, которая составляла $\approx 1\%$. Погрешность в определении давлений с учетом точности калибровки не превышала $\pm 1,5 \div 2\%$, объема — $\pm 3\%$.

Полученные экспериментальные точки для церия приведены на рис. 4 и сопоставлены с известными данными о его ударной [13] и статической [14, 15] сжимаемости. Для корректности сопоставления давлений перехода, зафиксированных в динамике и статике, необходимо учитывать анизотропность одномерного сжатия церия в ударной волне. Измеренное в ударной волне продольное напряжение p_2 превышает, как известно [9], гидростатическое давление фазового перехода на $(2/3)Y$ (Y — динамический предел текучести). Сравнение показало практическое согласие критических давлений изоморфного фазового перехода церия в статике [4–7, 14, 15] и динамике.

Результаты выполненного исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Изоморфный фазовый переход, зафиксированный ранее при статическом сжатии це-

рия [15], осуществляется и в условиях динамического сжатия.

2. Перекрытие электронных оболочек церия осуществляется при ударном сжатии за время менее 0,1 мкс.

3. Выявлена закономерность протекания изоморфного и полиморфных фазовых переходов; критические давления изоморфного электронного фазового перехода в динамике и в статике практически совпадают; ранее это было зафиксировано при исследовании многих полиморфных фазовых превращений [9, 12, 16].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика** высоких плотностей энергии / Под ред. П. Кальдиरोлы и Г. Кнопфеля. М.: Мир, 1966.
2. **Высокоскоростные** ударные явления. М.: Мир, 1973.
3. **Тонков Е. Ю.** Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. М.: Наука, 1979.
4. **Bridgman P. W.** The electrical resistance to 30,000 kg/cm² of twenty-nine metals and intermetallic compounds // Proc. Amer. Acad. Arts and Sci. 1951. V. 79. P. 149-179.
5. **Lawson A. W., Tang T. Y.** Concerning the high pressure allotropic modification of cerium // Phys. Rev. 1949. V. 76, N 2. P. 301-302.
6. **Понятовский Е. Г.** О критической точке на кривой полиморфного превращения церия // Докл. АН СССР. 1958. Т. 120, № 5. С. 1021-1023.
7. **Аптекарь И. Л., Понятовский Е. Г.** К теории изоморфизма церия. Равновесная фазовая p - T -диаграмма // Физика металлов и металловедение. 1968. Т. 25, вып. 5. С. 777.
8. **Твердые тела под высоким давлением** / Под ред. В. Пола и Д. Варшауэра. М.: Мир, 1966.
9. **Альтшулер Л. В.** Фазовые превращения в ударных волнах (обзор) // ПМТФ. 1978. № 4. С. 93-103.
10. **Павловский М. Н., Комиссаров В. В.** Полиморфные превращения олова в ударных волнах сжатия и разгрузки // ЖЭТФ. 1990. Т. 98, вып. 5(11). С. 1748-1751.
11. **Тиль Р.** Электрические измерения неэлектрических величин. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 25-27.
12. **Павловский М. Н., Комиссаров В. В.** Особенности фазового превращения висмута в волне разрежения // ЖЭТФ. 1982. Т. 83, вып. 6(12). С. 2146-2151.
13. **LASL Shock Hugoniot Data** / S. P. March (Ed.). University of California Press, 1980.
14. **Bridgman P. W.** Certain effects of seven rare earth metals // Proc. Amer. Acad. Arts and Sci. 1954. V. 83, N 1. P. 1-20.
15. **Кутсар А. Р.** О положении критической точки изоморфного фазового $\gamma \leftrightarrow \alpha$ перехода в церии // Физика металлов и металловедение. 1972. Т. 33, вып. 5. С. 1104-1107.
16. **Альтшулер Л. В.** Применение ударных волн в физике высоких давлений // Успехи мат. наук. 1965. Т. 85, вып. 2. С. 179-258.

Поступила в редакцию 22/VIII 1997 г.,
в окончательном варианте — 11/III 1998 г.