Список литературы

- 1. Сахаров А Д и др. *ДАН СССР* **165** 65 (1965) [Sakharov A D et al. *Sov. Phys. Dokl.* **10** 1045 (1966)]
- Сахаров А Д УФН 88 725 (1966) [Sakharov A D Sov. Phys. Usp. 9 294 (1966)]
- Протасов М С и др., в сб. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 26
- Чернышев В К и др., в сб. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 23
- Pavlovskii A I et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power Systems* (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 331
- Chernyshev V K et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power* Systems (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 347
- Fowler C M et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power Systems* (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 337
- Павловский А И и др. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 347
- Шевцов В А и др., в сб. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение (Под ред. В К Чернышева, В Д Селемира, Л Н Пляшкевича) (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997) с. 282
- Demidov V A et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power Systems* (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 351
- 11. Мохов В Н и др. *ДАН СССР* **247** (1) 83 (1979) [Mokhov V N et al. *Sov. Phys. Dokl.* **24** 557 (1979)]
- Demidov V A et al., in Megagauss Magnetic Fields and High Energy Liner Technology (Eds G F Kiuttu, R E Reinovsky, P J Turchi) (Piscataway, NJ: IEEE, 2007) p. 245
 Aryutkin M Yu et al., in The 13th Intern. Conf. on Megagauss
- Aryutkin M Yu et al., in *The 13th Intern. Conf. on Megagauss* Magnetic Field Generation and Related Topics, Suzhou, China, 2010 (to be published)
- Чернышев В К и др. Вопр. атом. науки и тех. Мат. моделир. физ. процессов 4 33 (1992)
- 15. Selemir V D et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 38 1762 (2010)
- Buyko A M et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power Systems* (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 743
- Гриневич Б Е и др., в сб. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение (Под ред. В К Чернышева, В Д Селемира, Л Н Пляшкевича) (Саров: РФЯЦ– ВНИИЭФ, 1997) с. 677
- Демидов В А и др. ПМТФ (6) 106 (1981) [Demidov V A et al. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 22 829 (1981)]
- 19. Demidov V A IEEE Trans. Plasma Sci. 38 1773 (2010)
- Павловский А И и др., Авт. свидетельство № 243103. МКИ H02N 11/00. Приоритет 28.11.67; Бюлл. изобрет. (33) (1969)
- Веселов В Н и др., Авт. свидетельство № 1409087. МКИ Н02N 11/00. Приоритет 09.10.85; Бюлл. изобрет. (13) (2000)
- 22. Demidov V A IEEE Trans. Plasma Sci. 38 1780 (2010)
- Селемир В Д и др., в сб. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение (Под ред. В К Чернышева, В Д Селемира, Л Н Пляшкевича) (Саров: РФЯЦ– ВНИИЭФ, 1997) с. 248
- Chernyshev V K, Volkov G I, Vakhrushev V V, in *Megagauss* Physics and Technology (Ed. P J Turchi) (New York: Plenum Press, 1980) p. 663
- Павловский А И, Васюков В А, Руссков А С Письма в ЖТФ 3 789 (1977)
- Петрухин А А и др., в сб. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 384
- Chernyshev V K et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power* Systems (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 465
- Демидов В А, Скоков В И, в сб. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение (Под ред. В К Чернышева, В Д Селемира, Л Н Пляшкевича) (Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 1997) с. 385
- Петрухин А А и др., в сб. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 406

- Chernyshev V K et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power* Systems (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 533
- Chernyshev V K et al., in Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications (Eds V Cowan, R B Spielman) (New York: Nova Sci. Publ., 1994) p. 731
- 32. Demidov V A et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 38 1768 (2010)
- Chernyshev V K et al., in Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications (Eds V Cowan, R B Spielman) (New York: Nova Sci. Publ., 1994) p. 519
- Буйко А М н др. Вопр. атом. науки и тех. Методики и программы численного решения задач математической физики (3(14)) 30 (1983)
- 35. Буйко А М и др. *ДАН СССР* **344** 323 (1992)
- Веселов В Н и др., Авт. свидетельство № 1616386. МКИ Н02N 11/00. Приоритет 14.03.88; Бюлл. изобрет. (22) (1995)
- Демидов В А и др., Авт. свидетельство № 1526480. МКИ Н02N 11/00. Приоритет 14.03.88; Бюлл. изобрет. (6) (1996)
- Demidov V A, Kazakov S A *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1758 (2010)
 Selemir V D, Demidov V A, Repin P B *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1754 (2010)
- 40. Бродский А Я и др. *ДАН СССР* **314** 846 (1990) [Brodskii A Ya et al. *Sov. Phys. Dokl.* **35** 876 (1990)]
- Vasyukov V A et al., in Proc. of the 13th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, 2010 (to be published)
- Павловский А И и др., in Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications (Eds V Cowan, R B Spielman) (New York: Nova Sci. Publ., 1994) p. 969
- Павловский А И и др., in Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications (Eds V Cowan, R B Spielman) (New York: Nova Sci. Publ., 1994) p. 977
- Selemir V D et al., in Proc. of the 15th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Monterey, Calif., 2005 (Eds J Maenchen, E Schamiloglu) p. 541
- Arinin V A et al., in Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Berlin, Germany, 2005 (Ed. M Von Ortenberg) p. 348
- Spielman R B et al., in Proc. of the 10th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, USA, 1995 (Eds W Baker, G Cooperstein) p. 396
- 47. Дябилин К С и др. *ТВТ* **34** 479 (1996) [Dyabilin K S et al. *High Temp.* **34** 473 (1996)]
- Селемир В Дидр. Физ. плазмы 25 1085 (1999) [Selemir V D et al. Plasma Phys. Rep. 25 1000 (1999)]
- Селемир В Д и др. Физ. плазмы 33 424 (2007) [Selemir V D et al. Plasma Phys. Rep. 33 381 (2007)]
- Ивановский А В и др., в сб. VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006) с. 563
- 51. Долгачёв Г И и др. ПТИ (2) 1 (2007)

PACS numbers: 07.35. + k, 47.40. - x, 61.05.C - DOI: 10.3367/UFNr.0181.2011041.0427

Импульсные рентгенографические исследования структуры веществ в ударных волнах

А.М. Подурец

При проведении ударно-волновых исследований, как правило, экспериментально измеряются физические величины, по которым можно лишь косвенно судить о структуре вещества за фронтом ударной волны (УВ). Поэтому необходимую информацию о структуре фаз высокого давления мы получаем в основном из экспери-

А.М. Подурец. ФГУП "Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ E-mail: am.podurets@gmail.com ментов по статическому сжатию или по лабораторному изучению образцов, сохранённых после ударного нагружения. В то же время очевидно, что прямого соответствия структур в статических и динамических экспериментах может и не быть из-за различия во времени протекания процессов. Это делает очень важной проблему получения структурной информации непосредственно в ударно-волновых экспериментах. Кроме того, при изучении уравнений состояния ударно-волновые данные, как правило, интерпретируют, основываясь на предположении о полной релаксации материала (гидродинамическое приближение), которое само также нуждается в проверке. Единственным прямым способом изучения структуры вещества непосредственно за фронтом УВ является импульсный рентгеноструктурный анализ (ИРА). Этим и объясняется большой интерес к данной методике, суть которой состоит в регистрации рентгенограмм исследуемого вещества за время, в течение которого оно сжато УВ, т.е. не более чем несколько сотен наносекунд.

Целью настоящей статьи является обзор результатов исследований с помощью ИРА, полученных более чем за 40 лет существования этой методики. В основу обзора легли работы, проведённые в Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском научноисследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ).

Во второй половине 1960-х годов Л.В. Альтшулером и Л.А. Егоровым с соавторами была продемонстрирована возможность и отработана методика съёмки структурных рентгенограмм за времена порядка 1 мкс [1, 2]. Вскоре была решена и задача получения импульсных рентгенограмм в момент ударно-волнового воздействия на образец [3].

Метод рентгеноструктурного анализа основывается на связи угла рассеяния излучения θ с межплоскостным расстоянием в кристаллической решётке *d*. Эта связь определяется формулой Вульфа – Брэгга

 $2d\sin\theta = \lambda$,

где λ — длина волны излучения (метод используется в диапазоне, где λ и *d* сравнимы по порядку величины). Таким образом, изменение структуры кристалла (*d*) определяется по изменению углового положения дифракционной линии (её "сдвигу").

По мере развития методики исследователи стали ставить перед собой два основных вопроса.

1. Как деформирована кристаллическая решётка за фронтом УВ?

2. Какова структура вещества в случае его фазового превращения в УВ? (Это особенно интересно, если фаза высокого давления не сохраняется после разгрузки до нормального давления и тем самым становится недоступной для структурного исследования обычными методами материаловедения.)

Первые работы по ИРА были опубликованы в начале 1970-х годов советскими [3] и американскими [4–6] исследователями. В скором времени аналогичные работы были проведены также во Франции [7], Японии [8–11] и Германии [12].

При постановке экспериментов с использованием ИРА исследователи сталкиваются с рядом трудностей, первая из которых — подбор образца для анализа. Необходимые времена экспозиции малы, поэтому для

опытов подходят только образцы с высокой отражающей способностью. Это накладывает ограничения как на материал, так и на структуру образцов. В качестве объекта исследования в большинстве работ использованы монокристаллы различных веществ: LiF, NaCl, KCl, SiO₂, Si, Bi и некоторые другие. Это связано с тем, что монокристаллы, находясь в правильном отражающем положении, дают значительно более интенсивные рефлексы на рентгенограммах, чем поликристаллические вещества (монокристалл весь отражает в одном направлении, в то время как в поликристалле в формировании отражения участвует только часть зёрен с определённой ориентацией). Однако съёмка поликристаллов (когда это возможно) обладает преимуществами, в частности, она позволяет получить на одной рентгенограмме сразу несколько рефлексов при использовании монохроматического излучения. Иногда оказывается возможным получение достаточно интенсивной рентгенограммы при применении поликристаллов с ярко выраженной текстурой.

С развитием методики появились схемы рентгеновской съёмки, при которых удаётся одновременно получить два отражения от двух плоскостей монокристалла в одном опыте [13]. Применение таких схем позволяет исследовать сжимаемость кристалла в двух взаимно перпендикулярных направлениях при одних и тех же условиях нагружения и даже в одном опыте [14, 15] (в англоязычной литературе это называется multiple x-ray diffraction).

Интенсивность дифракционной линии (без учёта типа кристаллической структуры)

$$I \sim \frac{1}{\mu \rho}$$
,

где μ — массовый коэффициент поглощения излучения материалом образца, ρ — плотность. Следовательно, с точки зрения материала образца, предпочтительными для исследования являются, как правило, элементы с малыми атомными номерами, так как с возрастанием атомного номера увеличивается коэффициент поглощения рентгеновского излучения μ и, следовательно, уменьшается количество вещества, участвующего в формировании рефлекса.

Другой важной проблемой в экспериментах является синхронизация работы источника излучения и устройства, генерирующего в образце УВ. Времена жизни интересующих нас состояний в ударно-нагруженных образцах редко превышают несколько долей микросекунды. Соответственно времена экспозиции рентгеновской съёмки в ИРА составляют от 0,1–1 нс (при возбуждении рентгеновского импульса лазерным пучком) [16, 17] до 100–200 нс при использовании импульсных рентгеновских трубок [3, 8].

При возбуждении в образце УВ возникает опасность разрушения аппаратуры (системы регистрации и источника излучения) осколками или продуктами взрыва. Поэтому проблемой, которую также необходимо решать при постановке экспериментов, является защита аппаратуры, в том числе регистрирующей, от возможного воздействия генератора УВ. Ниже мы рассмотрим варианты постановки экспериментов и их особенности.

На рисунке 1 приведена схема проведения экспериментов, описанных в работах РФЯЦ-ВНИИЭФ [3, 18,



Рис. 1. Схема постановки опытов по [3]: *1* — заряд ВВ, *2* — разгоняемый ударник, *3* — слой лития, *4* — коллиматор рентгеновского пучка, *5* — кассета с рентгеновской плёнкой, *6* — падающий и отражённый пучки.

19]. Схожая в общих чертах схема использовалась и в работах других экспериментаторов. Взаимное геометрическое расположение источника рентгеновского импульса, образца и детектора излучения соответствует условию фокусировки лучей (в разных вариантах постановки оно может быть различным).

Общее условие фокусировки при съёмке от плоского образца выражается формулой Курдюмова [20]:

$$\tan\psi = \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta + L/l}\,,$$

где ψ — угол между падающим пучком и образцом, θ — угол дифракции, L и l — расстояния от образца до источника излучения и до детектора соответственно. Соотношение между L и l выбирается сообразно требованиям сохранности детектора и источника, а также нужной интенсивности рентгенограммы.

Образец нагружается плоской УВ, создаваемой ударником, который разгоняется с помощью взрыва химического взрывчатого вещества (ВВ). Таким способом выполнено большинство работ ВНИИЭФ, а также работы Джонсона с соавторами [5, 6]. УВ также может создаваться с помощью электровзрыва [12, 21, 22], пороховой [7, 23] или газовой [8, 9, 24, 25] пушки. В работах Уарка с соавторами УВ в образце кремния создавалась лазерным импульсом [16, 17, 26]. Различие в способах формирования нагружающей образец УВ определяет и диапазон реализуемых в экспериментах давлений. Так, использование электровзрыва или порохового ускорителя позволяет получать меньшие давления в образцах (до нескольких ГПа) по сравнению с таковыми в экспериментах с ВВ или с газовыми пушками (до нескольких десятков ГПа). В экспериментах по лазерному нагружению была слабо развита диагностика газодинамических характеристик и поэтому о величине достигаемых в них давлений можно судить только приблизительно либо пользоваться расчётными значениями. Существенным преимуществом ВВ и пушек является также возможность удерживать образец под давлением в течение некоторого времени (при наличии стационарной волны нагружения).

Рентгеновская съёмка обычно производится через подпорный слой лёгкого инертного вещества, который

препятствует разгрузке образца во время съёмки. В качестве такого слоя, который одновременно прозрачен для рентгеновских лучей, используют литий, углерод, бериллий, плексиглас. Проводя съёмку без подпорного слоя, можно зафиксировать состояние, существующее в образце сразу после разгрузки. Так можно получить информацию о стабильности фазы высокого давления в волне разрежения [27].

В качестве источника излучения в наших экспериментах используются импульсные рентгеновские трубки различной конструкции с медным или молибденовым анодом. Дифрагированное излучение регистрируется с помощью либо рентгеноплёнки, либо фоточувствительной техники.

При интерпретации полученных дифрактограмм неизбежно возникает проблема привязки получаемых рефлексов к абсолютной шкале углов дифракции. Наиболее простой выход из этой ситуации — съёмка образца в одной и той же геометрии до и во время ударноволнового воздействия. При этом угловое положение линий на взрывной рентгенограмме определяется по их сдвигу относительно линий ненагруженного образца на предварительном снимке. Иногда удаётся получить одновременно снимки от несжатой и сжатой структуры на одной плёнке: для этого синхронизация проводится таким образом, чтобы часть экспозиции приходилась на несжатое состояние до прихода УВ, а другая часть — на уже сжатое [9]. Аналогичный эффект может быть достигнут и при съёмке тонкого сжатого слоя, когда одновременно "виден" и лежащий под ним слой ещё не сжатого кристалла [17]. Применяется съёмка исследуемых образцов с образцами-эталонами. В качестве эталонного может использоваться вещество, характер сжатия которого в УВ уже известен. Например, при исследовании различных веществ рядом с образцами помещались эталоны из молибдена или алюминия, которые подвергались ударно-волновому воздействию вместе с образцами (так называемый нагружаемый эталон). Удобство этого способа заключается в том, что положение линий образца в этом случае определяется относительно линий эталонного вещества, фиксируемых на той же рентгенограмме [19, 27, 28]. Используется также вариант постановки экспериментов, в котором эталон выносится из-под воздействия УВ, но его линии также фиксируются на одной плёнке с образцом (ненагружаемый эталон) [22, 29].

Бо́льшая часть работ по ИРА посвящена исследованию монокристаллов, из них более других оказался исследованным фторид лития (LiF). Этот кубический кристалл структурного типа NaCl без фазовых переходов при высоком давлении чаще других используется в импульсных рентгеноструктурных исследованиях, поскольку его сжимаемость в УВ достаточно подробно исследована другими методиками. Тем не менее картина поведения LiF до конца не ясна.

При давлениях 6,6 и 13,5 ГПа Л.А. Егоровым с соавторами зафиксированы отражения, соответствующие изотропному сжатию кристаллической решётки при съёмке монокристаллов, ориентированных перпендикулярно направлению УВ кристаллографическими плоскостями (100), (110) и (111) [22]. В то же время на рентгенограммах имелись дифракционные линии, совпадающие по положению с линиями несжатого материала. Авторы интерпретировали их как полученные от областей кристалла, находящихся в состоянии сжатия, но повёрнутых и сжатых вдоль направления (111). При этом величина объёмного сжатия $\sigma = V_0/V$ областей кристалла, сжатых изотропно, и областей, сжатых вдоль (111), была одинаковой и равнялась сжатию, вычисляемому из ударной адиабаты:

$$\sigma = \frac{D}{D-u} \, ,$$

где *D* и *u* — волновая и массовая скорости VB соответственно. Такая интерпретация несмещённых линий на рентгенограммах представляется пока дискуссионной, однако подобные явления отмечаются [22, 29] и при исследовании других веществ.

При давлениях до 5 ГПа наблюдалась различная сжимаемость монокристаллов LiF с различной ориентацией: кристаллы с ориентацией (100) сжимались как в направлении УВ, так и в поперечном направлении, в то время как в кристаллах с ориентацией (111) поперечной сжимаемости не было обнаружено [15].

При давлениях 22 и 24 ГПа К. Кондо с соавторами также зафиксировали отсутствие изотропности сжатия решётки LiF. При этом в направлении (100) отмечается сжимаемость решётки бо́льшая, чем та, которая должна была быть в случае изотропной деформации, а в направлении (111) — меньшая. "Неизотропность" сжатия решётки отмечена и при исследовании поликристалла LiF при P = 18 ГПа [9, 11]. В области более высоких давлений исследователями отмечается лишь изотропное сжатие кристаллической решётки — при давлениях 30 ГПа [5], 38,5 ГПа [30], 40–110 ГПа [24].

При исследовании *хлорида натрия* (NaCl) картина деформации иная. В трёх работах наблюдалась одномерная деформация решётки в направлении [100]: при давлениях 0,3–1 ГПа [7], 1,75 ГПа [13] и 30 ГПа [12]. В последней работе благодаря малому времени экспозиции (4 нс) удалось зафиксировать структуру УВ (упругую и пластическую волны), производя съёмку в разные моменты после прихода УВ к поверхности образца.

В монокристалле *хлорида калия* (KCl) в направлении (100) при давлениях, меньших давления фазового перехода 1,4–2 ГПа, наблюдалось изотропное сжатие решётки [31].

В поликристаллическом алюминии при малых давлениях (1,92, 2,97 и 3,91 ГПа) по дифракционным линиям (111) и (200) зафиксировано сжатие решётки, близкое к одномерному [23]. При более высоких давлениях, 11,8 и 23,1 ГПа, в работе [18] также были получены дифракционные линии (111) и (200), но изменения параметра решётки Al, вычисленные по этим линиям, оказались различными. Если сжатие, вычисленное по сдвигу линии (200) при допущении сохранения симметрии решётки, с точностью до ошибки измерения оказалось равным объёмному (полученному из ударной адиабаты), то сжатие, вычисленное по сдвигу линии (111), оказалось в 1,03-1,04 раза бо́льшим, чем объёмное. Это свидетельствует о кристаллографической неизотропности деформации кубической кристаллической решётки Al. При съёмке монокристалла Al, ориентированного в направлении (111), при давлении 32 ГПа зафиксировано изотропное сжатие [6].

Поведение *бериллия* исследовалось в работе [22]. При давлении 22,8 ГПа была получена рентгенограмма с



Рис. 2. Рентгенограмма молибдена в УВ. Р = 15 ГПа.

линиями (100) и (101). Из рентгеноструктурных данных сделан вывод, что сжатие гексагональной решётки Ве происходит вдоль кристаллографической оси *с*.

Ещё один пример изучения характера сжимаемости вещества, не претерпевающего фазовых превращений, исследование поликристаллического текстурированного молибдена [19]. Опыты проведены при давлениях 10, 15, 30,5 и 33,5 ГПа. На рисунке 2 приведена рентгенограмма Мо при $P = 15 \Gamma \Pi a$. Зафиксированы две дифракционные линии (200) от К_α- и К_β-линий молибденового анода. Межплоскостное расстояние *d* определялось по угловому расстоянию между К_α- и К_в-линиями. Точность определения *d* таким способом невелика, поскольку величины сжатия Мо в этом интервале давлений малы и поэтому увеличение углового расстояния между линиями незначительно. По приблизительным оценкам точность определения d равняется 0,001 нм, точность определения $\sigma = 2-3$ %. Результаты представлены на рис. 3, где приведены значения σ , вычисленные в предположении как изотропности, так и одноосности (в направлении распространения УВ) сжатия. Приведённые данные позволяют сделать вывод о том, что в исследованном интервале давлений в пределах достигнутой точности при длительности рентгеновского импульса 200-300 нс за фронтом УВ в молибдене наблюдается изотропное сжатие кристаллической решётки.

По результатам исследования монокристаллического *кремния* различными авторами единодушно делается вывод об одномерном характере сжатия при давлениях, меньших давления фазового перехода [14, 33, 34] (начало перехода в УВ фиксируется в области 12–13 ГПа). В [14] такое поведение Si объясняется низкой скоростью и плотностью дислокаций, при этом за времена съёмки деформация не успевает пластически релаксировать и сжатие решётки остаётся одномерным.

При сжатии монокристалла *меди* вдоль $\langle 100 \rangle$ полученные при P = 18 ГПа данные интерпретируются как результат либо изотропного гидростатического сжатия [14], либо некоторого отклонения от гидростатики [35]. В случае меди, по оценкам авторов, дислокационная структура, в отличие от таковой в Si, позволяет пластической деформации пройти за субмикросекундные времена.



Рис. 3. Данные по ударной сжимаемости молибдена. Ударная адиабата по [32] в сравнении со сжатием, вычисленным по рентгеноструктурным данным в предположении изотропной и одномерной деформации решётки.

И наконец, в *железе* при давлении 5,4 ГПа было зафиксировано одномерное сжатие решётки в направлении (100) [36].

Таким образом, мы рассмотрели результаты исследований веществ без фазовых переходов в УВ (или в состояниях ниже переходов, если последние есть в изучаемых веществах). Задачей этих работ было выяснение характера сжимаемости на уровне кристаллической решётки. При этом мы сосредоточили внимание в основном на конечных выводах, не углубляясь в тонкости постановки эксперимента, хотя некоторые детали методики весьма существенны, например длительность рентгеновской экспозиции, время жизни исследуемого состояния, а также соотношение этих двух времён. Исследованные вещества различаются по типу решётки (кубические, гексагональные) и химической связи (металлы, галогениды и др.), и все они могут иметь собственные кинетические параметры структурной релаксации и механизмы деформирования, что требует дальнейшего изучения. Перспективным, очевидно, является привлечение для анализа дифракционных данных представлений о дислокационной структуре, о механизмах пластического течения на микроуровне.

Ниже будут рассмотрены результаты работ, в которых изучалось изменение структуры при ударно-волновых фазовых переходах.

Первой такой работой стала [5], в которой были получены рентгенограммы ударно-сжатого пиролитического *нитрида бора* (ВN). Использовались монокристаллические образцы, ориентированные плоскостью (001) параллельно ударному фронту, на рентгенограммах также фиксировалась дифракционная линия (001). При давлениях 14,5 и 20,5 ГПа зафиксировано уменьшение параметра решётки с. При P = 24,5 ГПа на рентгенограмме появилась линия с d = 0,220 нм, интерпретированная авторами как отражение (100) вюрцитоподобной фазы.

В работе [4] объектом исследования являлся *графит*. Во время нагружения УВ (давление не указано) по сдвигу



Рис. 4. Зависимость относительного изменения параметров решётки графита от давления в УВ (ромбы $-c/c_0$, квадраты $-a/a_0$).

линии (002) было измерено изменение параметра решётки $c: c/c_0 = 0.82$. Далее авторы предположили, что если допустить, что $a/a_0 = 0.99$, то σ будет равна 1,25, что соответствует величине, получаемой из ударной адиабаты в гидростатическом приближении.

Для того чтобы предположение о различии сжимаемости вдоль направлений (100) и (001) превратить в утверждение, необходимо было провести измерение зависимости от давления обоих параметров гексагональной решётки графита. Это было сделано в работе [28] на образцах природного графита. Сжимаемость вдоль большой оси (с) определялась по угловому сдвигу линии (002), а вдоль оси а — по сдвигу линии (100). Ввиду требования необходимой интенсивности рентгенограмм различные линии были получены от образцов с разной текстурой и разной начальной плотностью (линия (002) снималась на образцах с $\rho_0 = 2,15$ г см⁻³, линия (100) — с $\rho_0 = 1,93$ г см⁻³). Оценки, сделанные авторами, показали, что это не внесло большой ошибки в интерпретацию результатов. Опыты были проведены при давлениях 11, 22, 24, 28 и 35,5 ГПа. Результаты приводятся на рис. 4, на основе их анализа можно сделать следующие выводы.

1. Ударная сжимаемость графита вдоль оси $c \langle 001 \rangle$ больше, чем вдоль оси $a \langle 100 \rangle$.

2. Значения объёмного сжатия, вычисленные по рентгеноструктурным данным при давлениях до 22 ГПа, находятся в хорошем согласии со значениями, полученными из ударной адиабаты в гидродинамическом приближении.

3. Излом на графике c/c_0 при $P \approx 22$ ГПа свидетельствует о фазовом превращении — при давлениях, превышающих это значение, вычислять по рентгеноструктурным данным сжатие нельзя, так как за фронтом УВ присутствует, наряду с графитом, уже и фаза высокого давления.

Фаза высокого давления обнаружена на рентгенограмме графита при P = 35,5 ГПа, когда при съёмке линии (002) была зафиксирована линия с d = 0,218 нм, которая интерпретирована как линия (100) гексагонального алмаза — лонсдейлита.

Монокристаллы *хлорида калия* (KCl) при давлениях, превышающих давление фазового перехода, исследова-



лись в работах [22, 31, 37] в интервале давлений 2-6 ГПа. Во всех случаях авторами зафиксированы отражения от фазы высокого давления. Переход КСІ из структуры типа NaCl в структуру CsCl, который известен по статическим экспериментам, происходит при давлении около 2 ГПа. В динамике начало фазового перехода зафиксировано при том же давлении [38]. Авторами всех трёх работ отмечены, помимо линий структуры типа CsCl, не идентифицируемые в рамках обеих известных фаз дифракционные линии, которые отнесены ими к промежуточным состояниям, сопровождающим процесс фазового превращения. Но промежуточные структуры интерпретированы авторами по-разному. В [22] описан целый комплекс ромбоэдрических структур, реализующихся в зависимости от давления нагружения образца и его ориентации относительно кристаллографических осей. В [37] промежуточная структура при $P = 3 \Gamma \Pi a$ идентифицирована как простая кубическая.

С помощью ИРА получены рентгенограммы ε -фазы высокого давления *железа* [19]. Для увеличения интенсивности импульсных рентгенограмм использовались текстурированные образцы трансформаторной стали Fe + 3 % Si плотностью 7,68 г см⁻³ с текстурой (100){110}, увеличивающей на рентгенограммах интенсивность дифракционной линии (110). Известно [39], что сплав Fe-Si, так же как и чистое железо, претерпевает в УВ фазовый $\alpha \rightarrow \varepsilon$ -переход (начало в области давлений 12–15 ГПа). Рентгенограммы кремнистого Fe получены при давлениях 10, 15 и 29 ГПа. На рисунке 5 приведена рентгенограмма, снятая при P = 10 ГПа.

Как и следовало ожидать, при давлениях, меньших давления фазового перехода, на предварительном и взрывном снимках видны только линии (110) K_{α} и K_{β} α -фазы. При давлениях 15 и 29 ГПа картина меняется (рис. 6): дифракционные линии на рентгенограммах соответствуют структуре ε -фазы¹. Кристаллографические данные для неё приведены в таблице.



Рис. 6. Рентгенограмма кремнистого железа с молибденовым эталоном в VB (а) при P = 0 (предварительный снимок) и (б) при $P = 15 \Gamma \Pi a$.

Таблица. Кристаллографические данные для є-фазы Fe

Параметр	P = 15ГПа	P = 29ГПа
<i>d</i> (100), нм	0,220	0,215
d(002), нм	0,204	0,201
d(101), нм	0,191	0,188
а, нм	0,252	0,247
С, НМ	0,408	0,401
a/c	1,62	1,62

В работе [27] была предпринята попытка исследовать фазовое превращение в цирконии. При статическом повышении давления Zr переходит из гексагональной плотноупакованной модификации (α-фаза) в гексагональную ω-фазу. Фазовое превращение в Zr происходит и при ударном нагружении. Излом на ударной адиабате обнаружен при P = 26 ГПа [43]. Какому превращению этот излом соответствует, до сих пор не выяснено, поскольку, как правило, давления переходов при статических и динамических нагрузках близки. Превращение в ударных волнах в Zr, напротив, происходит при давлении, значительно превосходящем давление равновесия. Однако, несмотря на большое количество экспериментальных данных, вопрос о кристаллографии фазового превращения (или превращений) в Zr остаётся открытым.

Рентгенограммы нагруженных ударными волнами образцов Zr снимались при давлениях 5, 9,5, 15 и 25 ГПа. При давлениях 5 и 9,5 ГПа наблюдалась структура исходной α -фазы. При бо́льших давлениях картина менялась. При P = 15 ГПа на рентгенограммах фиксировались две линии Zr, отвечающие межплоскостным расстояниям 0,227 и 0,211 нм. Линия с d = 0,211 нм также зафиксирована при P = 29 ГПа. Однозначно связать эти межплоскостные расстояния со структурой изотропно сжатой ω -фазы (так же, как и β -фазы Zr) нельзя. Остаётся предположить, что либо за фронтом УВ существует одна

¹ Высказанное в [36] и повторённое в [40] утверждение о том, что авторами этих работ впервые получены *in situ* рентгенограммы ударно-сжатого железа, не соответствует действительности. Впервые рентгенограммы Fe в УВ получены в 1986–1987 гг. во ВНИИЭФ А.М. Подурцом, А.И. Баренбоймом, В.В. Пулем и Р.Ф. Труниным. Первые результаты были опубликованы в трудах IV Всесоюзной конференции по детонации [41] в 1988 г., в следующем году состоялась журнальная публикация на русском языке [19]; в 1996 г. в трудах Международной конференции по высоким давлениям в конденсированных средах в Бомбее результаты исследования Fe опубликованы и на английском языке [42].



Рис. 7. Рентгенограмма циркония с молибденовым эталоном в разгрузке после сжатия в УВ до *P* = 12 ГПа.

из этих фаз с сильно деформированной структурой, либо реализуется какая-то иная фаза Zr. Поскольку обе неидентифицированные линии могут принадлежать разным фазам с различной степенью деформации, то однозначно идентифицировать их невозможно.

Из экспериментов с сохранением ударно-обжатых образцов известно, что в интервале давлений 9–24 ГПа после разгрузки сохраняется ω -фаза [44]. Для "стыковки" данных, полученных методом импульсной рентгеновской съёмки в момент приложения нагрузки, с данными, полученными на сохранённых образцах, были проведены опыты, в которых снималась рентгенограмма со свободной поверхности образца Zr после того, как на эту поверхность выходила УВ при давлении 12 ГПа и начиналась разгрузка.

Полученная рентгенограмма (рис. 7) свидетельствует о том, что через 1 мкс после выхода УВ на поверхность образца он состоял из смеси α- и ω-фаз, что подтверждает данные по исследованию сохранённых образцов. Линий неизвестного происхождения на рентгенограммах не было.

Сложная последовательность структурных превращений в УВ зафиксирована в *висмуте*. При наименьшем из давлений, 6,7 ГПа, наблюдалась структура Bi-V [27], известная из статических измерений. Давление 6,7 ГПа находится вблизи области стабильности этой фазы. При большем давлении лежит область фазы VI, характеризующейся объёмноцентрированной кубической (ОЦК) структурой.

При давлениях 8,5 и 13,7 ГПа картина на рентгенограммах была одинаковой и содержала дифракционную линию, соответствующую межплоскостному расстоянию 0,222-0,225 нм. Такое межплоскостное расстояние могла бы иметь линия (111) кубической структуры, однако в ОЦК-решётке из-за погасания (эффекта, связанного с симметрией структуры) линия с такими индексами запрещена. Если предположить, что за фронтом УВ в Ві структура ОЦК-фазы отличается от идеально симметричной, то погасания данной линии не произойдёт. Структура Ві при давлениях 8,5 и 13,7 ГПа была интерпретирована как искажённая ОЦК-структура, данных о наблюдении которой в статических условиях нет. Подтверждением этого вывода является присутствие на некоторых рентгенограммах линии с d = 0.185 - 0.1850,202 нм, что может соответствовать линии (200) ОЦК-



Рис. 8. Последовательность структурных изменений висмута в УВ. Сплошной кривой показана ударная адиабата. На вставке в левом нижнем углу рисунка приведена статическая фазовая диаграмма Ві [38], на вставке в правой части рисунка — рентгенограмма аморфной структуры Ві.

фазы, при P = 9 ГПа в статике её значение d равнялось 0,1900 нм [45].

При давлении 22 ГПа на рентгенограммах зафиксировано широкое размытое гало в области углов θ , соответствующих межплоскостным расстояниям 0,25 – 0,3 нм (рис. 8). Размытое гало при отсутствии чётких дифракционных пиков свидетельствует о том, что дальний порядок в кристалле нарушается, структура становится более близкой к структуре жидкости или аморфного тела.

При давлении 27 ГПа на всех взрывных рентгенограммах никаких дифракционных линий не зафиксировано. Это явление может быть связано с плавлением Ві в УВ. Величина давления в этих опытах довольно близка к 33 ГПа — величине порога плавления Ві, полученной с помощью другой экспериментальной методики [46].

Таким образом, последовательность структурных изменений в Ві в УВ при рассмотренных давлениях демонстрирует значительные отличия ударно-волновой картины от статической. Наблюдаемая аморфизация при P = 22 ГПа говорит в пользу того, что при ещё большем давлении действительно фиксируется плавление и такое нарушение структуры является предшественником полной потери дальнего порядка.

Мы проанализировали основные результаты, полученные с помощью импульсной рентгеноструктурной методики, не вдаваясь глубоко в технические подробности. Но именно технические аспекты методики имеют решающее значение для её дальнейшего прогресса. Из приведённых примеров видно, что применение ИРА может быть очень информативным и полезным для понимания процессов, происходящих при ударно-волновом воздействии на вещество. Поэтому методика, несомненно, будет использоваться и развиваться. В частности, для получения более достоверных данных должны применяться более стабильные нагружающие системы и источники излучения. Однако трудности использования метода ИРА лежат не только в области техники эксперимента. Уже накопленный экспериментальный материал указывает на сложность процессов, сопровождающих ударное нагружение кристаллов. Необходимо развитие микроструктурных представлений об ударном сжатии, механизме и кинетике фазовых ударно-волновых превращений. Поэтому эксперименты с использованием ИРА должны не только демонстрировать явление (сейчас иллюстративный характер экспериментов нередко обусловлен их относительно невысокой точностью, обсуждение которой мы выносим за рамки данной статьи), но и служить пониманию физики явления. В частности, метод ИРА может быть полезен для исследования плавления в УВ, что продемонстрировано на примере висмута.

Автор благодарит Р.Ф. Трунина за обсуждение и научное редактирование статьи, а также за многолетнее внимание к методу ИРА в РФЯЦ – ВНИИЭФ.

Список литературы

- Альтшулер Л В и др., в сб. Девятое научно-техническое совещание по применению рентгеновских лучей к исследованию материалов, 18–24 декабря 1967 г., Ленинград, Тезисы докладов (Л., 1967) с. 37
- 2. Егоров Л А и др. ПТЭ (2) 200 (1968)
- Егоров Л А, Ниточкина Э В, Орекин Ю К Письма в ЖЭТФ 16 8 (1972) [Egorov L A, Nitochkina E V, Orekin Yu K Sov. Phys. JETP 16 4 (1972)]
- 4. Johnson Q et al. Phys. Rev. Lett. 25 1099 (1970)
- 5. Johnson Q, Mitchell A C Phys. Rev. Lett. 29 1369 (1972)
- 6. Johnson Q, Mitchell A C, Evans L Appl. Phys. Lett. 21 29 (1972)
- 7. Jamet F, in *High Pressure Science and Technology, Proc. VII* AIRAPT Conf., Le Creusot, 1978, p. 974
- 8. Kondo K, Sawaoka A, Saito S, in *Proc. of the 4th Intern. Conf. on High Pressure, Kyoto, 1974,* p. 845
- Kondo K, Sawaoka A, Saito S, in High Velocity Deformation of Solids, Tokyo, 1978, Vol. B, p. 176
- 10. Kondo K et al., in *High Pressure Science and Technology, New York*, 1979, Vol. 2, p. 883
- Kondo K, Sawaoka A, Saito S, in *High Pressure Science and Technology, New York, 1979*, Vol. 2, p. 905
- 12. Muller F, Schulte E Z. Naturforsch. A 33 918 (1978)
- 13. Zaretsky E, in Shock Compression of Condensed Matter 1997, Woodbury, 1998, p. 883
- 14. Loveridge-Smith A et al. Phys. Rev. Lett. 86 2349 (2001)
- 15. Rigg P A, Gupta Y M Phys. Rev. B 63 094112 (2001)
- 16. Wark J S et al. Phys. Rev. B 35 9391 (1987)
- 17. Wark J S et al. J. Appl. Phys. 68 4531 (1990)
- Альтшулер Л В и др. ЖЭТФ 81 672 (1981) [Al'tshuler L V et al. Sov. Phys. JETP 54 359 (1981)]
- 19. Подурец А М и др. Изв. АН СССР. Физика Земли (6) 26 (1989)
- Уманский Я С Рентгенография металлов и полупроводников (М.: Металлургия, 1969) с. 209
- 21. Баренбойм А И и др. ПТЭ (1) 189 (1992)
- 22. Егоров Л А и др. ЖЭТФ **103** 135 (1993) [Egorov L A et al. *JETP* **76** 73 (1993)]
- 23. Зарецкий Е Б и др. ТВТ 29 1002 (1991)
- Johnson Q, Mitchell A C, in High Pressure Science and Technology. Proc. VII AIRAPT Conf., Le Creusot, 1978, p. 977
- 25. Zaretsky E J. Phys. IV France 7 (C3) 329 (1997)
- Woolsey N C et al., in Shock Compression of Condensed Matter 1995, Woodbury Pt. 2 (New York: AIP Press, 1996) p. 997
- Подурец А М, Дорохин В В, Трунин Р Ф *TBT* 41 254 (2003) [Podurets A M, Dorokhin V V, Trunin R F *High Temp.* 41 216 (2003)]
- 28. Подурец А М и др. Изв. АН СССР. Физика Земли (1) 107 (1991)
- 29. Егоров Л А и др. *Хим. физика* **14** (2-3) 100 (1995)
- Баренбойм А И, Дорохин В В, Егоров Л А, в сб. 1 Всесоюзный симп. по макроскопической кинетике и химической газодинамике, Алма-Ата. Тезисы докладов Т. 2, Ч. 2 (Черноголовка, 1984) с. 51
- 31. d'Almeida T, Gupta Y M Phys. Rev. Lett. 85 330 (2000)
- Трунин Р Ф (Ред.) Экспериментальные данные по ударноволновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006)
- Podurets A M, Mokhova V V, in 8 Intern. Conf. on High Pressure Semiconductor Physics, August 9–13, 1998, Thessaloniki

- 34. Kishimura H et al. Phys. Rev. B 74 224301 (2006)
- 35. Meyers M A et al. *Acta Mater*. **51** 1211 (2003)
- 36. Kalantar D H et al. Phys. Rev. Lett. 95 075502 (2005)
- 37. Зарецкий Е Б и др. *ДАН СССР* **316** 111 (1991) [Zaretskii E B et al. *Sov. Phys. Dokl.* **36** 76 (1991)]
- Тонков Е Ю Фазовые диаграммы соединений при высоком давлении (М.: Наука, 1983)
- 39. Graham R A J. Appl. Phys. 39 437 (1968)
- 40. Hawreliak J et al. Phys. Rev. B 74 184107 (2006)
- 41. Подурец А М и др., в сб. *IV Всесоюз. конф. по детонации, Телави, 1988*, Т. 1, с. 162
- Podurets A M, Barenboim A I, Trunin R F, in Intern. Conf. on Condensed Matter Under High Pressures, Bombay, 1996, Proc.: Advances in High Pressure Research in Condensed Matter (Eds S K Sikka, S C Gupta, B K Godwal) (New Delhi, 1997) p. 285
- McQueen R G et al., in *High-Velocity Impact Phenomena* (Ed. R Kinslow) (New York: Academic Press, 1970) p. 293 [Маккуин Р и др., в сб. Высокоскоростные ударные явления (М.: Мир, 1973) с. 299]
- Kutsar A R, Lyasotski I V, Podurets A M, Sanches-Bolinches A F High Pressure Research 4 475 (1990)
- 45. Schaufelberger Ph, Merx H, Contre M *High Temp. High Pressures* **4** 111 (1972)
- 46. Трунин Р Ф и др. *ТВТ* **33** 222 (1995)

PACS numbers: **42.55.**–**f**, **42.62.**–**b**, **52.57.**–**z** DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104m.0434

Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии

С.Г. Гаранин

1. Введение

Во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) работы по созданию мощных лазеров были развёрнуты в 1963 г. по инициативе научного руководителя Ю.Б. Харитона. Возглавили эти работы С.Б. Кормер и Г.А. Кириллов. Активные экспериментальные исследования по данному направлению начались в середине 60-х годов прошлого века. В 1965 г. к Ю.Б. Харитону обратился Н.Г. Басов с предложением провести совместные исследования возможности создания лазеров с максимально достижимой энергией излучения.

Предложение явилось следствием того факта, что взрыв ядерного заряда сопровождается очень мощным световым излучением, которое, как предполагалось, можно было бы использовать для световой накачки лазеров. Однако температура свечения ударной волны в воздухе при действии ядерного взрыва непринципиально отличается от температуры свечения ударной волны в благородных газах, возбуждаемой обычным взрывчатым веществом (ВВ). Этот более простой и реальный способ накачки был выбран в качестве основного для совместных исследований специалистов Физического института им. П.Н. Лебедева Академии наук (ФИАН) и ВНИИЭФ.

С.Г. Гаранин. ФГУП "Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ E-mail: garanin@vniief.ru