- Kabalkina S S, Losev V G, Gasanly N M Solid State Commun. 44 1383 (1982)
- 7. Дюжева Т И и др. *Неорганические материалы* **39** 1384 (2003) [Dyuzheva T I et al. *Inorganic Mater.* **39** 1198 (2003)]
- Dyuzheva T I, Bendeliani N A, Brazhkin V V, Kuznetshov L M J. Alloys Comp. 315 59 (2001)
- 9. Дюжева Т И и др. *ДАН СССР* **298** 100 (1988) [Dyuzheva T I et al. *Sov. Phys. Dokl.* **33** 1 (1988)]
- 10. Стишов С М, Попова С В Геохимия (10) 837 (1961)
- 11. Ицкевич Е С, Попова С В Вестн. АН СССР 9 59 (1980)
- 12. Popova S V Phys. Scripta T1 131 (1982)
- 13. Popova S V, Boiko L G High Temp. High Press. 3 237 (1971)
- Попова С В, Фомичева Л Н, Хвостанцев Л Г Письма ЖЭТФ 16 609 (1972) [Popova S V, Fomicheva L N, Khvostantsev L G JETP Lett. 16 429 (1972)]
- Бенделиани Н А, Автореф. дисс. ... д-ра хим. наук (М.: МГУ, Хим. фак., 1982)
- Верещагин Л Ф и др. Письма ЖЭТФ 26 536 (1977) [Vereshchagin L F et al. JETP Lett. 26 394 (1977)]
- Хлыбов Е П, Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: МГУ, Физ. фак., 1985)
- Казаков С М, Ицкевич Е С, Богачева Л Н Письма ЖЭТФ 58 340 (1993) [Kazakov S M, Itskevich E S, Bogacheva L N JETP Lett. 58 343 (1993)]; Бойко Л Г, Попова С В Письма ЖЭТФ 12 101 (1970) [Boiko L G, Popova S V JETP Lett. 12 70 (1970)]
- 19. Kuzemskaya I G et al. J. Superconduct. 11 117 (1998)
- 20. Ekimov E A et al. *Nature* **428** 542 (2004)
- 21. Бражкин В В и др. *Письма в ЖЭТФ* 76 805 (2002) [Brazhkin V V et al. *JETP Lett.* 76 681 (2002)]
- 22. Brazhkin V V, Lyapin A G, Popova S V, Voloshin R N, Antonov Yu V, Lyapin SG, Kluev Yu A, Naletov A M, Mel'nik N N *Phys. Rev. B* **56** 11465 (1997)
- 23. Brazhkin V V, Lyapin A G, Popova S V, Klyuev Yu A, Naletov A M J. Appl. Phys. 84 219 (1998)
- 24. Демишев С В и др. *Письма в ЖЭТФ* **78** 984 (2003) [Demishev S V et al. *JETP Lett.* **78** 511 (2003)]
- 25. Dyuzheva T I, Litaygina L M, Bendeliani N A J. Alloys Comp. 377 17 (2004)
- 26. Дюжева Т И и др. *Кристаллография* **51** 370 (2006) [Dyuzheva T I et al. *Crystallogr. Rep.* **51** 342 (2006)]
- 27. Bolotina N B et al. J. Alloys Comp. 278 29 (1998)
- 28. Brazhkin V V, Popova S V, Voloshin R N Physica B 265 64 (1999)
- 29. Brazhkin V V et al. Phys. Rev. Lett. 100 145701 (2008)
- Попова С В, Бражкин В В, Волошин Р Н, Гримсдич М УФН
 122 4486 (2002) [Popova S V, Brazhkin V V, Voloshin R N, Grimsditch M Phys. Usp. 45 445 (2002)]
- Стальгорова О В, Громницкая Е Л, Бражкин В В Письма в ЖЭТФ 62 334 (1995) [Stal'gorova O V, Gromnitskaya E L, Brazhkin V V JETP Lett. 64 356 (1995)]
- 32. Brazhkin V V, Lyapin A G, Popova S V, Voloshin R N *Phys. Rev. B* **51** 7549 (1995)
- 33. Brazhkin V V, Lyapin A G J. Phys: Condens. Matter 15 6059 (2003)
- 34. Tsiok O B, Brazhkin V V, Lyapin A G, Khvostantsev L G *Phys. Rev.* Lett. **80** 999 (1998)
- Brazhkin V V et al. (Eds) New Kinds of Phase Transitions: Transformations in Disordered Substances (NATO Science Ser. II, Vol. 81) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2002)

PACS numbers: 61.50.Ks, **62.50. + p**, **74.70. - b** DOI: 10.3367/UFNr.0178.200810k.1106

Исследования термодинамических, упругих, сверхпроводящих и магнитных свойств веществ под давлением

Л.Н. Джавадов, Е.Л. Громницкая,

Г.Н. Степанов, Ю.А. Тимофеев

В работе приведено краткое описание методических разработок ИФВД РАН и некоторые результаты.

1. Метод импульсно-адиабатической модуляции давления

Первые измерения температурного отклика системы при адиабатическом изменении давления были выполнены, по-видимому, Джоулем [1]. Однако систематические исследования этим методом возобновились лишь спустя более 100 лет [2-9], что можно объяснить сложностью подобного эксперимента при использовании инерционной регистрирующей аппаратуры. Изэнтропическое сжатие может быть реализовано модернизированной аппаратурой высокого давления, предназначенной для создания статического давления. Однако реализация этого процесса для интервала давлений > 100 МПа затруднительна, поскольку предполагает приложение/снятие довольно большого усилия за время, на которое накладываются ограничения: безударность сжатия с одной стороны и отсутствие теплообмена с другой (гидростатичность и условие постоянства энтропии S = const). Кроме этого, необходимо также учитывать необходимую релаксацию напряжений в элементах аппаратуры высокого давления. Альтернативой является модуляционный метод — измерение производной $(\partial T/\partial P)_{s}$. В этом случае сравнительно легко обеспечить необходимые условия, хотя, в ущерб информативности, при наличии фазового перехода первого рода небольшая амплитуда модуляции давления может оказаться недостаточной для изменения концентрации фаз от 0 до 1. Среди разнообразных конструкций аппаратов высокого давления, по-видимому, только аппарат типа цилиндрпоршень позволяет управлять давлением, хотя и в этом случае остаются ограничения, обусловленные трением уплотнения поршня. В ИФВД РАН использован малоинерционный вариант управления усилием. Фронт импульса нагружения при низком давлении не превышает 10 мс. Статическое усилие передается на поршень через пружину, а дополнительное усилие для модуляции давления прикладывается непосредственно к поршню [5]. Установка позволяет регистрировать температурный отклик образца при резком изменении давления на величину до ± 50 МПа. Максимальное давление 3 ГПа, допустимый интервал температур 273-700 К. Среда, передающая давление, — жидкость. Критерием адиабатичности является наличие отсечки на кривой $\Delta T(t)$.

При расчете термодинамических функций по результатам адиабатических экспериментов предполагается, что система находится в равновесном состоянии и характерные времена релаксационных процессов, таких как диффузионный механизм образования точечных дефектов (вакансии, межузельные атомы), меньше, чем время измерения. Очевидно, в этом случае должно выполняться условие:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{S,\,\Delta P>0} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{S,\,\Delta P<0}$$

Формально, задача сводится к решению дифференциального уравнения

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = J_S(T,P)\,,$$

в котором $J_S(T, P)$ — некоторая аналитическая функция, описывающая результаты измерения. Искомую адиабату $T_S(T_0, P)$ для начальной (при P = 0) температуры $T = T_0$ находят в результате решения этого уравнения, которое может быть выполнено численным методом. Зная семейство адиабат и граничные условия, например, температурную зависимость энтропии при нормальном давлении S(T,0), легко рассчитать T-P-зависимость таких величин, как энтропия S, теплоемкость C_P и тепловое расширение $(\partial V/\partial T)_P$. Если в дополнение к этим данным известна барическая зависимость объема при некоторой температуре T_r , можно рассчитать уравнение состояния:

$$V(T,P) = V(T_r,P) + \int_{T_r}^T \frac{J_S(T,P) C_P(T,P)}{T} dT.$$

Если C_V является некоторой функцией (T/Θ) , а Θ зависит только от объема, на адиабате также постоянно отношение (T/Θ) , а следовательно, и C_V . В этом случае, зная $J_S(T_S, P)$, легко рассчитать барическую зависимость характеристической температуры Θ .

На рисунке 1 представлены результаты измерений для Li, Na, K. Как видно, значения производной $(\partial T/\partial P)_S$ в смешанном состоянии (т.е. в состоянии смеси твердого тела и жидкости) приближаются к соответствующей производной линии плавления dT/dP. Соотношение между величинами $(\partial T/\partial P)_S$ и наклона линии плавления, dT/dP, позволяет сделать заключение, что адиабатическое сжатие должно приводить к кристаллизации жидкого Na и к плавлению твердого Li.



Рис. 1. (а) Температурная зависимость $J_S = (\partial T/\partial P)_S$ для лития и натрия при различных давлениях. (б) Барическая зависимость характеристической температуры Θ для Li, Na и K.

2. Упругие свойства твердых тел при высоких давлениях

Ультразвуковая методика, разработанная и применяемая в ИФВД РАН, позволяет вести непрерывное наблюдение за изменением состояния вещества при различных термодинамических условиях, получать барические и термические зависимости упругих характеристик, что также дает информацию и для построения фазовых диаграмм. Следует отметить, что ультразвук успешно используется и для тестирования новых веществ, синтезируемых в ИФВД РАН, что позволяет усовершенствовать технологический процесс их изготовления.

Разработка для ультразвуковых исследований модификации камеры типа "тороид" с катлинитовым контейнером в качестве ячейки высокого давления (рис. 2) ("тороид" с плоским дном) дала возможность проводить исследования до 9 ГПа при комнатной температуре, в том числе и на монокристаллах [10, 11]. Давление в каждом эксперименте определялось по скачкам электросопротивления при фазовых переходах в реперных металлах Bi, Tl, Ba. В качестве пьезодатчиков использовались кварцевые пластины несущей частоты 5 и 10 МГц. С использованием этой камеры был исследован большой класс веществ, таких как щелочные металлы, монокристаллы полупроводников, щелочные галоиды, соединения группы $A^{III}B^V$ и др. [12–17]. Отметим ряд наиболее интересных результатов.

Впервые при электронном изоструктурном $\gamma - \alpha$ переходе (0,75 ГПа) было обнаружено смягчение продольных акустических мод фононного спектра церия, в то же время при структурном $\alpha - \alpha'$ переходе (5,1 ГПа) наблюдалось смягчение поперечных акустических мод церия [12]. Найденное смягчение акустических мод в фононном спектре γ - и α -церия объясняет, в соответствии с представлениями Линдемана, особенности фазовой диаграммы церия — отрицательный наклон кривой плавления.

Впервые были определены упругие характеристики цезия до 5,0 ГПа [16] и выявлены аномалии в упругих свойствах при переходах CsI-CsII-CsIII-CsIV. Сжатие



Рис. 2. Модифицированная камера типа "тороид" для ультразвуковых исследований.

цезия при высоких давлениях приводит к существенному уменьшению объема (~ 50 % при 5 ГПа) и вызывает ряд интересных и ярких явлений, связанных с изменениями его кристаллической и электронной структуры. Наблюдалось появление мягкой сдвиговой моды в фононном спектре цезия в предпереходной области CsI (ОЦК)-CsII (ГЦК). Выявлены аномалии в зависимостях модуля объемной упругости, модуля сдвига и их производных по давлению и параметру решетки от сжатия при P > 1,4 ГПа, что свидетельствует о происходящем изменении характера электронов проводимости (s-d-переход) и подтверждает известные теоретические расчеты. Установлено, что электронно-структурному превращению CsII-CsIII предшествует аномальная сжимаемость ГЦК фазы, а также смягчение продольных и поперечных акустических мод фононного спектра цезия.

Следующим шагом в модернизации ультразвуковой методики стало освоение широкого температурного диапазона. Был разработан низкотемпературный ультразвуковой пьезометр, который работает в диапазоне давлений 0–3 ГПа и температур 77–360 К и до сих пор является, насколько нам известно, уникальным [18]. Барические и температурные зависимости скоростей продольных и поперечных ультразвуковых волн определяются с помощью аппаратуры "Акустомер-1", разработанной также в нашем Институте. Точность измерения времени пробега составляет 0,001 мкс, а пути пробега — 0,005 мм. Хладоагентом является с помощью медь-константановых термопар с точностью ± 1 К.



Рис. 3. Барические зависимости объемного модуля *B*, модуля сдвига *G* и коэффициента Пуассона σ для галлия при различных температурах: *T* = 247 K (*I*), *T* = 259,5 K (*2*), *T* = 268 K (*3*).

В дальнейшем на этой установке были проведены исследования упругих свойств льдов (H₂O и D₂O), металлического галлия и поликристаллического фуллерита при высоких давлениях и различных температурах, а также ряда других веществ. Остановимся на исследованиях льда и галлия.

Лед H_2O имеет одну из наиболее сложных фазовых диаграмм: наблюдается не менее 12 кристаллических и ряд аморфных модификаций. На основе наших экспериментальных данных впервые получено экспериментальное подтверждение механической неустойчивости кристаллической решетки льда при твердофазной аморфизации под давлением и значительно дополнена фазовая диаграмма льда. Обнаружены изотопические различия в поведении температурных зависимостей упругих свойств (модуля объемной упругости) H_2O и D_2O [19, 20].

Исследования галлия, который является редким примером вещества с сосуществованием ковалентного и металлического типов связи в одной фазе GaI, выявили необычно высокое значение производной модуля объемной упругости по давлению и рост коэффициента Пуассона с давлением, что нами было связано с ослаблением ковалентности GaI при сжатии. При ультразвуковых исследованиях было также обнаружено необычное поведение упругих модулей при фазовом превращении GaI – GaII. Сильное падение объемного модуля (30 %) и модуля сдвига (55 %), а также увеличение коэффициента Пуассона от "ковалентного" ($\approx 0,22$) до "металлического" ($\approx 0,32$) являются свидетельством исчезновения ковалентности и превращения Ga в обычный металл (рис. 3) [21].

- 3. Регистрация сверхпроводимости
- в камере с алмазными наковальнями

методом лазерной модуляции температуры образца

Предлагается модуляционный метод разделения фонового сигнала и сигнала от сверхпроводящего образца. В основе этого метода лежит периодическое разрушение сверхпроводящего состояния образца вблизи сверхпроводящего перехода, приводящее к амплитудной, низкочастотной модуляции высокочастотного сигнала (10 кГц), осуществляемое путем периодического, незначительного нагрева образца лазерным излучением, модулированным по амплитуде на низкой частоте (25 Гц) и сфокусированным на образец.

Регистрация сигнала осуществляется следующим образом. Высокочастотный выходной сигнал системы катушек индуктивности, находящихся в камере высокого давления, поступает в компенсационный блок для уменьшения фоновой компоненты, затем на высокочастотный усилитель (10 кГц) и синхронный детектор, где происходит выделение низкочастотной компоненты сигнала (25 Гц). Низкочастотный сигнал поступает на усилитель, затем на низкочастотный синхронный детектор для выделения постоянной составляющей, поступающей в компьютер для накопления и обработки данных. При регистрации таким способом сверхпроводящий переход представлен пиком на зависимости амплитуды низкочастотного сигнала от температуры.

Результаты эксперимента на образце $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ представлены на рис. 4. Два пика соответствуют атмосферному давлению и давлению 4,3 ГПа. Температура сверхпроводящего перехода определялась по положению максимума пика. При атмосферном давлении T_c



Рис. 4. Сверхпроводящие переходы в сверхпроводнике YBa₂Cu₃O_{7-x}, зарегистрированные методом лазерной модуляции температуры исследуемого образца.

равнялась 80,8 К и 94,8 К при давлении 4,3 ГПа. Такое изменение температуры сверхпроводящего перехода с давлением соответствует барическому коэффициенту, равному 3,3 К ГПа⁻¹, что находится в согласии с литературными данными [22].

4. Установка для исследования эффекта Мёссбауэра под давлением при низких температурах

В некоторых случаях, например, при изучении влияния давления на величину магнитных полей на ядрах, может быть существенно понижение температуры исследуемого вещества. Основными частями установки (рис. 5) являются вибратор 3, который обеспечивает доплеровское сканирование энергии источника у-лучей 4, криостат 5, камера высокого давления 6, детектор у-излучения 7. Камера 6 обеспечивает юстировку взаимного расположения алмазных наковален и фиксацию усилия, приложенного к ним. Излучение источника 4 проходит через наковальни вдоль их оси. Алмазные наковальни при их общей толщине ~ 4 мм пропускают ~ 80 % падающего на них у-излучения изотопа ^{119m}Sn с энергией квантов 23,8 кэВ. Если диаметр рабочей площадки алмазных наковален ~ 0.3 мм, то металлическая прокладка между наковальнями, изготовленная из W или Re и играющая также роль коллиматора, имеет толщину ~ 0,03 мм.



Рис. 5. Схема низкотемпературного мёссбауэровского спектрометра для исследований в алмазной ячейке.

Диаметр отверстия в прокладке ~ 0,1 мм. Две алмазные наковальни и прокладка являются стенками камеры высокого давления, отверстие в прокладке — ее рабочий объем. В рабочий объем помещается слой исследуемого вещества и рубиновое зерно размером ~ 10 мкм для измерения давления по сдвигу R₁-линий люминесценции рубина [23]. Для передачи давления на образец рабочий объем можно заполнить, например, полиэтилсилаксановой жидкостью ПЭС-5. Линии люминесценции рубина R₁ и R₂ остаются разрешенными до 80 ГПа. Хорошее разрешение линий R_1 и R_2 не свидетельствует, однако, об идеальной гидростатичности давления, так как в центре рабочего объема и у его стенки давление отличается на ~ 10 %. Для работы при разумных экспозициях (обычно не менее 7 сут) необходимо применять источники 4 с высокой интенсивностью, поглотители обогащать мёссбауэровскими изотопами. Источник 4, совершающий колебательные движения, должен находиться в непосредственной близости от основания алмазной наковальни для обеспечения большого телесного угла, в котором проходит у-излучение. Охлаждение камеры 6 производится в криостате. В нижнюю часть сосуда для жидкого гелия впаяна медная трубка 9. Камера 6, смазанная по боковой поверхности вакуумной смазкой для улучшения теплообмена, помещается в трубке 9. В трубку 9 устанавливаются медные экраны 11 с отверстиями. Один из них припаян к трубке 9 легкоплавким припоем, второй съемный. Отверстия в экране 11 и в "азотной юбке" криостата заклеивались тонкой алюминиевой фольгой. В конструкции отсутствуют охлаждаемые вакуумноплотные окна для прохода ү-излучения, что существенно повышает надежность криостата по вакуумным течам. Колеблющийся источник 4 располагается в вакуумном пространстве криостата. Области высокого вакуума (теплоизоляции криостата) и низкого вакуума (расположения вибратора) 3 разделены мягким сильфоном. Фланец 13 уплотняется после юстировки источника относительно камеры 6. При этом положение источника 4 относительно камеры 6 не меняется. Источник 4 при юстировке нужно расположить так, чтобы учесть уменьшение длины гелиевого сосуда при заливке в него гелия или азота, т.е. при комнатной температуре источник 4 располагается выше рабочего состояния на ~2 мм. Итак, для проведения эксперимента необходимо создать давление, поместить камеру 6 в криостат, произвести юстировку и уплотнение фланца 13. Откачать криостат. Предварительное охлаждение криостата и камеры 4 жидким азотом продолжается не менее 24 ч, поскольку камера 4 охлаждается через вакуумный промежуток. Емкость сосуда для жидкого гелия составляет 3 л. Испарение гелия происходит в течение 3 сут. При длительных экспозициях производится подлив гелия. Температура камеры 4 после заливки гелия составляла 4,5 К. Более низкие температуры до 2,5 К могут быть получены путем откачки паров гелия. Высокостабильное движение источника и накопление информации обеспечивалось при помощи специальных электронных приборов, работающих по схеме Канкелайта [24].

5. Установка для измерения плотности

и кинетических свойств конденсированных газов

Установка позволяет смешивать газы и жидкости в заданной пропорции и измерять температурную и барическую зависимости плотности, вязкости, теплопровод-



Рис. 6. Принципиальная схема установки для определения уравнения состояния и кинетических свойств конденсированных газов.

ности, электропроводности. Допустимый интервал давлений и температур: 0-150 МПа и 0-150 °C.

Проблема, с которой приходится сталкиваться при определении уравнения состояния газов, — большая сжимаемость и возможность неконтролируемой утечки через скользящие уплотнения. В настоящей работе эта задача решается с помощью мембранного разделителя и контролирования объема в той части мембранного разделителя (жидкость), который связан с насосом высокого давления (рис. 6). В этом случае при выпуске исследуемого вещества в мембранный разделитель увеличение объема можно определить по количеству вытесненной из разделителя жидкости. Оценка объема при сбросе давления предпочтительней, чем при накачке, поскольку при накачке возможна утечка рабочей жидкости в уплотнении штока насоса.

Для измерения давления использован манганиновый датчик, точнее, четыре отрезка проволоки, включенных в мостовую схему, расположенные в одном корпусе в "холодной" зоне, вне нагревателя. Два элемента моста (по диагонали) расположены в зоне высокого давления, два других — в зоне нормального давления. Такой вариант подключения позволяет вдвое увеличить чувствительность по сравнению с одним манганиновым датчиком в зоне высокого давления и значительно уменьшить температурную зависимость, поскольку все элементы моста находятся при одной и той же температуре.

Наличие насоса и мембранного разделителя позволяют подготовить смесь заданной концентрации в измерительной ячейке. В процессе заправки давление в ячейке возрастает до максимального значения (при комнатной температуре). Предварительно для выбранной рабочей жидкости регистрируется зависимость от давления объема вытесненной жидкости при сбросе давления при незаполненной измерительной ячейке: $L_0(P)$. Регистрация этой же зависимости $L_1(P)$ при заполненной измерительной ячейке позволяет определить объем, занимаемый исследуемым веществом, в зависимости от давления, т.е. функцию $\rho(T_0, P)$. Для определения уравнения состояния смеси $\rho(T, P)$ данные по изотермической сжимаемости при комнатной температуре дополняются измерениями температурной зависимости давления при разогреве измерительной ячейки в изохорических условиях при различных начальных давлениях.

В измерительной ячейке расположены датчики для измерения вязкости, теплопроводности и электропроводности. Для измерения вязкости использован метод вибрационного вискозиметра — регистрация частоты и затухания свободного колебания стержня после ударного возбуждения. Ударное возбуждение осуществляется подачей на один из двух электромагнитов прямоугольного импульса тока. Регистрируемый сигнал пропорционален углу отклонения стержня. Для измерения теплопроводности используется метод нагретой проволочки. Измерение электропроводности осуществляется по току между двумя пластинами, на которые подается напряжение.

Список литературы

- 1. Joule J P Philos. Mag. 17 364 (1859)
- 2. Boehler R, Getting I C, Kennedy G C J. Phys. Chem. Solids 38 233 (1977)
- Джавадов Л Н, Кротов Ю И ФТТ 22 1245 (1980) [Dzhavadov L N, Krotov Yu I Sov. Phys. Solid State 22 728 (1980)]
- 4. Boehler R, Ramakrishnan H J. Geophys. Res. 85 (B12) 6996 (1980)
- 5. Джавадов Л Н, Кротов Ю И ПТЭ (3) 168 (1985)
- Джавадов Л Н ФТТ 27 3310 (1985) [Dzhavadov L N Sov. Phys. Solid State 27 1993 (1985)]
- 7. Джавадов Л Н Журн. физ. хим. **61** 1106 (1987)
- 8. Dzhavadov L N High Temp. High Press. 21 401 (1989)
- Джавадов Л Н ФТТ 47 2223 (2005) [Dzhavadov L N Phys. Solid State 47 2315 (2005)]
- Воронов Φ Φ, Григорьев С В Бюлл. изобрет. СССР (2) 142 (1972)
- 11. Khovostansev L G, Vereshchagin L F, Novikov A P *High Temp. High Press.* **9** 637 (1977)
- Воронов Φ Φ, Гончарова В А, Стальгорова О В ЖЭТФ 76 1351 (1979) [Voronov F F, Goncharova V A, Stal'gorova O V Sov. Phys. JETP 49 687 (1979)]
- 13. Voronov F F Adv. Space Res. 1 147 (1981)
- Гончарова В А, Чернышева Е В, Воронов Ф Ф ФТТ 25 3680 (1983) [Goncharova V A, Chernysheva E V, Voronov F F Sov. Phys. Solid State 25 2118 (1983)]
- Goncharova V F, Chernysheva E V Semicond. Sci. Technol. 4 114 (1989)
- Воронов Φ Φ, Стальгорова О В, Громницкая Е Л ЖЭТФ 122 90 (2002) [Voronov F F, Stal'gorova O V, Gromnitskaya E L JETP 95 77 (2002)]
- Громницкая Е Л, Стальгорова О В ЖЭТФ 106 1453 (1994)
 [Gromnitskaya E L, Stal'gorova O V JETP 79 785 (1994)]
- Стальгорова О В и др. ПТЭ 39 (6) 115 (1996) [Stal'gorova O V et al. Instrum. Exp. Tech. 39 880 (1996)]
- 19. Gromnitskaya E L et al. Phys. Rev. B 64 094205 (2001)
- Ляпин А Г и др. ЖЭТФ 121 335 (2002) [Lyapin A G et al. JETP 94 283 (2002)]
- 21. Gromnitskaya E L et al. Phys. Rev. Lett. 98 165503 (2007)
- 22. Wijngaarden R J High Press. Res. 3 105 (1990)
- 23. Mao H K et al. J. Appl. Phys. 49 3276 (1978)
- 24. Kankeleit E Rev. Sci. Instrum. 35 194 (1964)