КВАЗИДВУМЕРНЫЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ВОДОРОД В ДИФОСФИДЕ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Н. Н. Дегтяренко, Е. А. Мазур*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» 115409, Россия, Москва

Поступила в редакцию 21 февраля 2016 г.

Анализируются структурные, электронные, фононные и другие характеристики различных нормальных фаз гидридов фосфора со стехиометрией PH_k. Проводится расчет свойств исходного вещества — дифосфина, в котором, в отличие от гидридов фосфора со стехиометрией PH₃, при сжатии высоким гидростатическим давлением может сформироваться квазидвумерная решетка металлического водорода, стабилизированная фосфором. Показано, что образующаяся структура с элементами H–P–H является локально устойчивой по фононному спектру, т. е. метастабильной. Проведено сравнение свойств дифосфина со свойствами подобных структур гидридов серы.

DOI: 10.7868/S0044451016080125

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений поиска новых сверхпроводящих материалов с высокими критическими температурами является изучение соединений с высоким содержанием водорода. В работе [1] был обнаружен переход в сверхпроводящее состояние металлической фазы сероводорода под давлением порядка 170 ГПа при температуре T = 203 К. Идея эксперимента [1] основана на теоретических работах по исследованию свойств металлического водорода, в которых предсказана высокая критическая температура $T_c \sim 200-400$ К [2]. В работах [3,4] было показано, что подобная фаза водорода может быть метастабильной. После публикации результатов [1] интерес к поиску соединений, способных перейти в сверхпроводящее состояние при более высоких температурах, значительно возрос. Высокое значение T_c в сероводороде под давлением [1] является свойством исключительно электрон-фононной системы. Было экспериментально показано наличие изотопического эффекта и эффекта Мейснера в фазе сероводорода, образованной при давлении порядка 170 ГПа [1].

В работе [1] группы Еремца в качестве одного из возможных объяснений высокого значения T_c в сероводороде рассматривается тот факт, что при высоком давлении и при дополнительном нагреве в результате диссоциации SH_2 образуется гидрид SH_n $(n \leq 3)$ [4]. Эта фаза при помощи компьютерного моделирования в [6] рассматривается в качестве основного кандидата на роль сверхпроводящей фазы.

В работе [7] наряду с соединениями SH_n $(n \leq 3)$ была найдена фаза SH_2 , имеющая симметрию I4/mmm, для которой рассчитаны электронные и фононные спектры, а также плотности электронных и фононных состояний в интервале давлений 100-225 ГПа. Представленная в [7–9] фаза SH_2 , в которой при определенных давлениях образуется квазидвумерный металлический водород, является кандидатом на роль вещества, ответственного за сверхпроводящие свойства металлического сероводорода, наряду с фазой SH_3 .

В данной работе предлагается проведение экспериментов по исследованию сверхпроводящих свойств дифосфина при его гидростатическом сжатии без нагрева. В работе [5] представлены предварительные экспериментальные результаты по сжатию фосфида PH₃ и его сверхпроводимости при T = 100 K. Отличительной чертой сжатия дифосфина P₂H₄, как показывают представленные расчеты, является формирование под давлением структуры с плоскостями сосредоточения водорода. Эксперименты по сжатию дифосфина нам не известны. Изучение свойств дифосфина может стать «критически» важным для развития теории сверхпроводимости.

^{*} E-mail: eugen mazur@mail.ru



Рис. 1. а) Структура дифосфина при нормальных условиях; б) изоповерхность электронной плотности для молекулы дифосфина на уровне 0.6, указывающая на ковалентные связи в этой молекуле; 6) примитивная ячейка с двумя элементами Н-Р-Н при давлении P = 150 ГПа; г) зона Бриллюэна, соответствующая примитивной ячейке при давлении P = 150 ГПа; атомы фосфора имеют больший размер

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ДИФОСФИНА

В данной работе мы представляем расчеты электронных и фононных свойств системы дифосфина H_2P-PH_2 при сжатии гидростатическим давлением до 250 ГПа. Расчеты структурных, электронных и фононных характеристик молекулы и периодической кристаллической структуры PH_k в интервале давлений 0–250 ГПа проводились методом DFT, полностью аналогичным методу, применяемому в расчетах [7–9].

Дифосфин при обычных условиях представляет собой бесцветную жидкость (температура плавления $T_m = -99$ °C, температура кипения $T_b =$ = 65.2 °C). Это соединение образуется одновременно с фосфином H₃P при гидролизе фосфидов [10]. На рис. 1*a* представлена структура молекул дифосфина P₂H₄ при нормальном давлении. Сжатие совокупности таких молекул в интервале 25–250 ГПа приводит к образованию металлической кристаллической фазы. Основной структурный элемент этой фазы H₂P–PH₂ имеет прямолинейные связи H–P–H, направленные под углом 180° (рис. 1*г*).

Были проведены расчеты при каждом давлении. Сначала в расчетах для молекулярной фазы принималось, что исходная начальная симметрия ячейки с молекулой P₂H₄ является низшей и имеет симметрию P1. В табл. 1 представлены результаты расчетов по сжатию молекулярной фазы дифосфина P₂H₄ гидростатическим давлением в интервале 10–200 ГПа. При давлении P = 10 ГПа образуется



Рис. 2. Структура, образованная из молекул дифосфина, при давлении P=125 ГПа. Показано двумерное распределение электронной плотности в плоскости сосредоточения атомов водорода, которые создают двумерную квадратную решетку с периодом $a=1.51\,\text{\AA}$; минимальное значение электронной плотности между атомами водорода составляет 0.367 эл./Å 3

молекулярная структура с диэлектрической щелью $\Delta \varepsilon \approx 0.4$ эВ, величина которой уменьшается с давлением. При давлении порядка и более 25 ГПа дифосфин P₂H₄ становится металлической фазой в силу перекрытия электронных оболочек молекул. Конечная симметрия при этих расчетах оказалась различной, но преимущественной является структура с симметрией элементарной ячейки *I4/mmm*. Данный этап расчетов (табл. 1) был необходим для установления симметрии элементарной ячейки дифосфина.

Следующим этапом расчетов было использование в качестве стартовой ячейки с симметрией I4/mmm. Кристаллическая структура с такой симметрией элементарной ячейки была исследована в диапазоне давлений 25–250 ГПа. Конечная симметрия при этих расчетах оказалась также I4/mmm. В результате структурной модификации элементарной ячейки в исследуемой фазе P_2H_4 с симметрией I4/mmm кристалла образуется набор параллельных плоскостей из атомов водорода с полным сосредоточением всех атомов водорода в этих плоскостях (рис. 2) во всем интервале давлений 25–250 ГПа. В этих плоскостях атомы водорода образуют квадратную решетку с периодом, зависящим от давления.

P, ГПа	Стартовая симметрия	$\Delta H,$ э $\mathrm{B}/\mathrm{форм.}\mathrm{eg.}$	$V, Å^3$	$h, \mathrm{\AA}$	Результирующая симметрия	
	p					
10	P1	-418.072	55.46	—	P-1	
25	P1	-411.268	43.74	_	P-1	
50	P1	-405.409	34.34	0.429	Fmmm	
75	P1	-400.352	30.98	0.243	I4/mmm	
100	P1	-395.722	28.64	0.112	I4/mmm	
125	P1	-391.397	26.95	0.034	I4/mmm	
150	P1	-386.930	25.28	0.101	P21/m	
175	P1	-382.311	24.56	_	C2/m	
200	P1	-379.567	23.36	0.275	I4/mmm	

Таблица 1. Сжатие молекулярного дифосфина Р₂Н₄ гидростатическим давлением

В результате электронные свойства системы приобретают квазидвумерный характер. Атомы фосфора формируют «свои» плоскости. Каждый атом фосфора имеет в первой координационной сфере четыре атома P, расположенные в плоскости, и по два атома водорода, как показано на рис. 2.

На рис. 3 показаны двумерные распределения электронной плотности в плоскости, проходящей через ось элемента Н–Р–Н (рис. 3*a*), и в плоскости атомов водорода (рис. 3*б*). Рассчитанный объем элементарной ячейки при давлении P = 125 ГПа составил V = 13.54 Å³, что дает для общей величины плотности электронов значение $n_e \approx 10^{24}$ эл/см³ (14 электронов на ячейку).

Как видно из сравнения рис. 3, распределение электронов является неравномерным в пространстве (более темные области соответствуют большему значению электронной плотности). Наибольшая плотность электронов соответствует «ковалентной» связи Н-Р-Н элемента и связям между атомами фосфора (минимальное значение порядка $0.8 \text{ эл}/\text{Å}^3$). Электронная плотность в плоскости атомов водорода примерно составляет величину в три раза меньшую $(0.359 \text{ эл}/\text{Å}^3)$. При возрастании давления картины распределения электронной плотности, показанные на рис. 3, остаются топологически подобными. Однако из-за уменьшения объема элементарной ячейки с ростом давления минимальные значения электронной плотности в промежутках между атомами возрастают.

На рис. 4 показаны свойства электронной подсистемы для значений давления 175 ГПа. На рис. 4 видно, что уровень Ферми находится на скате, вблизи пика электронной DOS. Парциальная плотность числа электронных состояний для атомов водорода соответствует только *s*-электронам (рис. 4*e*). Отметим, что форма кривой LPDOS подобна кривой для PDOS *s*-электронов всей системы (рис. 4*b*). Из сравнения рис. 4*e*, на которых представлены кривые парциальной плотности числа электронных состояний для атомов водорода LPDOS, с зонной структурой электронов (рис. 4*a*) следует, что *s*-электроны водородных плоскостей лежат ниже уровня Ферми и принадлежат этим зонам.

При возрастании давления происходит некоторое изменение зонной структуры. Так, например, при $P = 175 \Gamma \Pi a$ (рис. 4) минимум одной из зон опустился ниже уровня Ферми. Оценка эффективной массы носителей для максимумов и минимумов вблизи уровня Ферми дает значение порядка $0.1m_{e0}$. При давлении $P = 175 \Gamma \Pi a$ уровень Ферми пересекает три подзоны (рис. 4), ферми-поверхности которых представлены на рис. 5.

В фононном спектре кристалла фазы P_2H_4 с симметрией I4/mmm отсутствуют мнимые частоты в интервале давлений 25–250 ГПа (рис. 6), т.е. фаза P_2H_4 с симметрией I4/mmm является стабильной в этом интервале давлений. Фононный спектр содержит две области частотных колебаний. Максимальные частоты лежат в области энергий порядка 265 мэВ. Оптические моды колебаний, соответствующие смещениям атомов водорода, как видно на рисунке для фононного спектра (рис. 6), существуют не только при малых q (точка G), но и для всех значений волнового вектора $q \neq 0$ обратного пространства на отрезках, соединяющих точки симмет-



Рис. 3. *а*) Двумерное распределение электронной плотности в вертикальной плоскости, проходящей через ось элемента H–P–H (места расположения атомов обозначены символами H и P); минимальное значение электронной плотности между атомами H соответствует 0.36 эл./Å³ (белые изолинии определяют профиль этого значения); минимальное значение электронной плотности между атомами H и P соответствует 0.75 эл./Å³. *б*) Двумерное распределение электронной плотности сосредоточения атомов водорода (места расположения атомов обозначены символом H), атомы создают двумерную квадратную решетку с периодом a = 1.51 Å; минимальное значение электронной плотности между атомами H соответствует 0.359 эл./Å³ (белые изолинии определяют профиль этого значения)

рии зоны Бриллюэна (рис. $1e^{1}$). В результате можно сделать вывод, что синфазные колебания атомов водорода в этих плоскостях не являются сдвиговыми модами. С ростом давления спектр становится несколько более жестким.

В кристалле рассматриваемой симметрии сохраняется набор параллельных плоскостей из атомов водорода с полным сосредоточением всех атомов водорода в этих плоскостях. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Из сравнения значений энтальпии ΔH из табл. 1 и табл. 2 следует, что сжатие молекулярных фаз приводит к структурам, обладающим большей энтальпией по сравнению с металлической фазой P_2H_4 с симметрией I4/mmm, которая в интервале давлений 50–250 ГПа имеет только действительные частоты, т. е. является устойчивой.

Интересным является эффект перераспределения электронной плотности N_e между атомами с ростом давления, который определяется по возрастанию с давлением ее минимального значения между атомами водорода в плоскости их сосредоточения. В интервале давлений P = 50-250 ГПа величина N_e возросла примерно в 1.5 раза. Кроме того, в зависимости от давления меняются условные милликеновские заряды атомов фосфора $Z_M(\mathbf{P})$ и водорода $Z_M(\mathbf{H})$. Милликеновские заряды атомов фосфора $Z_M(\mathbf{P})$ положительные и увеличиваются, а для водорода возрастает отрицательный милликеновский заряд $Z_M(\mathbf{H})$. В том же интервале давлений значение $Z_M(\mathbf{H})$ изменилось в 2 раза.

Из результатов расчетов, представленных в табл. 2, следует, что давление P «выдавливает» электронную плотность из областей пучностей электронной плотности вокруг атомов фосфора в области атомов водорода, что приводит к возрастанию минимального значения электронной плотности между атомами водорода в плоскости почти в 1.5 раза. В табл. 2 также представлены результаты изменения с ростом давления расстоя-

¹⁾ Интеграл по электронной плотности по объему ячейки V_c (рис. 16) при изменении давления сохраняется и равен числу электронов ($N_e = 14$). Профиль плотности меняется, в том числе меняются и максимальные значения на атомах, но интерес представляют минимальные значения, определяющие связи атомов. Отметим, что среднее значение плотности порядка одного электрона на 1 Å³. Именно поэтому здесь и далее изоповерхности и двумерные распределения электронной плотности представлены в шкале по оттенкам серого в интервале 0–1. Все значения плотности большие единицы, присутствующие вблизи ядер атомов, представлены одним значение м равным единице, как наиболее темные области. Меньшие значения плотности от 0 до 1 эл./Å³ имеют градиент серого цвета.



Рис. 4. *a*) Зонная структура электронов P_2H_4 с симметрией I4/mmm при давлении P = 175 ГПа, $E_F = 0$ — уровень Ферми; δ) парциальная плотность числа состояний (PDOS): 1 - s-электронные состояния; 2 - p-электронные состояния; 3 - суммарная плотность; *в*) парциальная плотность числа состояний для атомов водорода (LPOS) только для s-электронов

<i>Р</i> , ГПа	Стартовая симметрия	<i>ΔН</i> , эВ/форм. ед.	$V, \mathrm{\AA}^3$	$h, \mathrm{\AA}$	N _e (H), эл./Å	$Z_M(\mathbf{P})$	$Z_M(\mathbf{H})$	<i>а</i> (Н), Å	Резуль- тирующая симмет-	Наличие (Im) или отсутствие (Re) мнимых
	Ť				7				рия	частот в DPhOS
0	I4/mmm	-210.256	27.21	0.310	_	0.20	-0.10	_	I4/mmm	Im
25	I4/mmm	-206.949	18.56	0.160	-	0.18	-0.09	1.716	I4/mmm	Im
50	I4/mmm	-204.257	16.32	0.130	0.320	0.22	-0.110	1.612	I4/mmm	Re
75	I4/mmm	-201.853	14.83	0.120	0.359	0.25	-0.125	1.554	I4/mmm	Re
100	I4/mmm	-199.637	13.76	0.105	0.359	0.28	-0.140	1.521	I4/mmm	Re
125	I4/mmm	-195.634	13.54	0.081	0.359	0.30	-0.150	1.513	I4/mmm	Re
150	I4/mmm	-193.581	12.81	0.0	0.359	0.33	-0.165	1.498	I4/mmm	Re
175	I4/mmm	-191.630	12.22	-0.084	0.390	0.36	-0.180	1.485	I4/mmm	Re
200	I4/mmm	-189.764	11.69	-0.192	0.422	0.39	-0.185	1.484	I4/mmm	Re
250	I4/mmm	-186.24	10.88	-0.98	0.453	0.43	-0.215	1.477	I4/mmm	Re

Таблица 2. Сжатие гидростатическим давлением фазы P_2H_4 с симметрией I4/mmm

ния h между двумя сближающимися плоскостями, в которых сконцентрированы атомы водорода, образующие квазидвумерную квадратную решетку с периодом a. Как следует из данных для h, полное сосредоточение атомов водорода происходит при P = 150 ГПа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ФОСФИНА

Были рассчитаны электрон-фононные характеристики кристаллической структуры «фосфина»



Рис. 5. Поверхности Ферми зон, пересекающих уровень Ферми для P_2H_4 при давлении P = 175 ГПа: a — зона 5 (от -0.127 эВ до 13.341 эВ); δ — зона 4 (от -6.224 эВ до 7.852 эВ); ϵ — зона 3 (от -11.520 эВ до 5.029 эВ). Для спинов «вверх» и спинов «вниз» вид и интервалы энергий совпадают

РН₃, симметрия которой аналогична симметрии структуры сероводорода с фазой SH₃, которая ответственна, согласно работам [1,6], за большие значения критической температуры сероводородов под давлением. Мы провели расчеты аналогичной фазы РН₃ (симметрия Im-3m). Оказалось, что фононные дисперсии данной фазы фосфина содержат мнимые частоты во всем интервале давлений. Из этих данных следует, что устойчивость данной структуры



Рис. 6. *а*) Фононная дисперсионная зависимость P_2H_4 при давлении P = 175 ГПа; б) плотность фононных состояний P_2H_4 (PhDOS). Максимальная энергия фононов при 175 ГПа — $h\omega \approx 270$ мэВ



Рис. 7. Исследуемая структура фосфина PH_3 с симметрией Immm. Атомы фосфора представлены большим размером; результаты расчетов при давлении P=150 ГПа

РН₃ и SH₃ определяется «основными» элементами фазы (фосфором или серой).

Устойчивой при высоком давлении кристаллической фазой со стехиометрией фосфина РН3 оказалась структура с конечной симметрией Іттт (рис. 7). В этой структуре каждый атом фосфора имеет в первой координационной сфере по два атома Р и по четыре атома Н. Атомы водорода образуют квазидвумерную плоскость, которая имеет наименьшие искажения (отклонения атомов от расположения в плоскости) при низких давлениях, например, при P = 75 ГПа. С ростом давления за счет сжатия структуры эти искажения только увеличиваются и плоскостная структура распадается на две с несколько большим расстоянием между атомами водорода. На рис. 8 представлены зонная структура электронов PH₃ (симметрия структуры *Immm*) при давлении P = 150 ГПа и локальная частичная плот-



Рис. 8. Зонная структура электронов PH_3 (симметрия структуры Immm) при давлении P = 150 ГПа, $E_F = 0$ — уровень Ферми; справа — локальная частичная плотность числа *s*—электронных состояний для атомов H в PH_3 при том же давлении



Рис. 9. Фононная дисперсионная зависимость для фазы PH_3 (симметрия Immm) при давлении P = 150 ГПа; справа — плотность фононных состояний PH_3 при том же давлении

ность числа *s*-электронных состояний для атомов Н при том же давлении.

Данная фаза оказалась устойчивой, это следует из рис. 9, на котором представлены дисперсионная зависимость для фононов и фононная плотность числа состояний при P = 150 ГПа. Отметим, что максимальная фононная частота является величиной порядка 300 мэВ. Эта структура фосфина PH₃



Рис. 10. Изменение энтальпии ΔH различных фаз с ростом давления: 1 (Δ , \blacktriangle) — сульфид SH₂ (симметрия I4/mmm); 2 (\Box , \blacksquare) — дифосфин P₂H₄ (симметрия I4/mmm); 3 (\circ и \bullet) — SH₃ (симметрия Im-3m); 3 (\diamond , \blacklozenge) — PH₃ (симметрия Immm). Светлые символы соответствуют наличию мнимых частот колебаний. Темные символы — дисперсионные фононные зависимости, не содержащие мнимых частот, 1a, 2a, 3a, 4a — интервалы значений давления, в которых структуры не имеют мнимых частот. На графиках (рис. 10) величина энтальпии рассчитана по формуле $\Delta H = H_n PH_k/n - E_0(P) - kE_0(H)$, где n — число структурных единиц PH_k; k — число атомов водорода; $E_0(P)$ и $E_0(H)$ — полная энергия без давления соответственно атомов фосфора и водорода

с симметрией *Immm* элементарной ячейки обладает меньшей энтальпией по сравнению со структурой, полученной из сжатия дифосфида P_2H_4 (рис. 10), но мнимые частоты для этой структуры отсутствуют в достаточно узком интервале $P \approx 100-150$ ГПа.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На рис. 10 представлены графики изменения энтальпии ΔH с ростом давления P для наиболее устойчивых кристаллических фаз сульфида SH₂ и SH₃, дифосфида P₂H₄ и фосфина PH₃. На рис.10 видно, что соединения типа XH₂ являются метастабильными по отношению к фазовому переходу в фазы XH₃, для которых энтальпия имеет меньшие значения при данной величине давления P. Предположительно, для такого фазового перехода в экспериментах [1] использовался нагрев содержимого алмазной ячейки лазерным излучением. Если такой нагрев исключить при сжатии дифосфина P₂H₄, то фаза с симметрией *I4/mmm* может сформироваться и остаться в метастабильном состоянии. Действительно, ее частотный спектр в интервале 50–250 ГПа не содержит мнимых частот, «распрямление» связей H–P–H молекул дифосфина P₂H₄ происходит уже при 25 ГПа. Кроме того, диапазон давлений *P*, в котором структура (со стехиометрией фосфина PH₃ и симметрией *Immm*) не имеет мнимых частот, относительно мал и составляет 100–150 ГПа.

Выводы.

1. Предсказывается возможность проведения экспериментов по гидродинамическому сжатию дифосфина для получения кристаллической структуры с квазидвумерным металлическим водородом, все электрон-фононные характеристики которого указывают на возможность высокотемпературной сверхпроводимости в этой структуре.

2. При давлении P = 10 ГПа образуется молекулярная структура с диэлектрической щелью $\Delta \varepsilon \approx 0.4$ эВ, величина которой уменьшается с давлением. При давлении порядка и более 25 ГПа молекулярная фаза дифосфина P_2H_4 становится металлической в силу перекрытия электронных оболочек молекул.

3. Из расчетов фазы P_2H_4 с симметрией I4/mmm кристалла в интервале давлений P = 50-250 ГПа в результате структурной модификации элементарной ячейки образуется набор параллельных плоскостей из атомов водорода с полным сосредоточением всех атомов водорода в этих плоскостях (рис. 2) с образованием квадратной решетки атомов водорода в этой плоскости. В результате электронные свойства системы приобретают квазидвумерный металлический характер.

4. В фононном спектре кристалла фазы дифосфина P₂H₄ с симметрией *I*4/*mmm* отсутствуют мнимые частоты в интервале давлений 50–250 ГПа и она является стабильной в этом интервале давлений. Фононный спектр содержит две области частотных колебаний. Максимальные частоты лежат в области энергий до 265 мэВ. С ростом давления спектр становится несколько более жестким.

5. Конкурирующая фаза — кристаллическая структура фосфина PH_3 — обладает меньшей энтальпией в интервале давления P = 50-250 ГПа, но диапазон давлений ее устойчивости сужается до интервала значений P = 100-150 ГПа.

6. Гидростатическое давление не только формирует двумерную плоскость с сосредоточением водорода, но и «выдавливает» электронную плотность многоэлектронных атомов (серы или фосфора) в эту плоскость. В интервале P = 50-250 ГПа минимальное значение электронной плотности между атомами водорода в плоскости возрастает почти в 1.5 раза. Условно этот эффект может быть охарактеризован как факт «допирования» этой плоскости водорода (см. табл. 2 для минимального значения электронной плотности между атомами водорода), что стимулирует ее «металличность».

7. Исходя из расчетов свойств нормальной фазы дифосфина, оптимальная область давлений для эффекта сверхпроводимости составляет значение около 150 ГПа.

Авторы выражают благодарность Ю. Кагану за обсуждение работы и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

- A. P. Drozdov, M. I. Eremets, I. A. Troyan, V. Ksenofontov, and S. I. Shylin, Nature 525, 73 (2015).
- 2. N. W. Ashcroft, Phys. Rev. Lett. 21, 1748 (1968).
- **3**. Ю. Каган, Е. Г. Бровман, УФН **105**, 777 (1971).
- Е. Г. Бровман, Ю. Каган, А. Холас, В. В. Пушкарев, Письма в ЖЭТФ 18, 269 (1973).
- 5. A. P. Drozdov, M. I. Eremets, and I. A. Troyan, arXiv:cond.-mat.supr-con,1508.06224.
- D. Duan, Y. Liu, F. Tian et al., Sci. Rep. 4, 6968 (2014).
- N. N. Degtyarenko, E. A. Mazur, Phys. Proc. 71, 374 (2015).
- Н. Н. Дегтяренко, Е. А. Мазур, ЖЭТФ 148, 275 (2015).
- H. H. Дегтяренко, Е. А. Мазур, ЖЭТФ 148, 1215 (2015).
- **10**. Б. В. Некрасов, *Основы общей химии*, Т. 1, Химия, Москва (1973).