

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

539. 893

ПОСЛЕДНИЕ СОБЫТИЯ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ*С. М. Стишов*

В 1968 и 1972 гг. появились две статьи^{1,2}, во многом определившие направление переднего края исследований в физике высоких давлений наших дней.

В первой из них Н. Ашкрофт указал на возможность метастабильного существования металлического водорода при атмосферном давлении и оценил температуру его сверхпроводящего перехода. Результат этой оценки был весьма вдохновляющим: оказалось, что температура сверхпроводящего перехода в гипотетическом металлическом водороде должна быть порядка $100^\circ\text{K} - 300^\circ\text{K}$.

Во второй цитированной работе группа авторов (Р. Формен, Г. Пьермарини, Дж. Барнетт и С. Блок) описали свои эксперименты с миниатюрными алмазными наковальнями. Поместив крохотный кусочек рубина между алмазными наковальнями, они обнаружили, что *R*-линия люминесценции рубина сдвигается заметным образом при увеличении давления. Последнее обстоятельство открыло путь для измерения давления в алмазных наковальнях и привело к широкому применению этого метода (см. подробнее перевод статьи С. Блока и Г. Пьермарини, помещенный в этом номере УФН).

Перспективы получения и исследования металлического водорода оказались столь заманчивы (см. по этому поводу^{3,4}), что вскоре после выхода в свет упомянутой статьи Н. Ашкрофта три экспериментальные группы объявили о своих намерениях приступить к соответствующим экспериментам⁵.

Экспериментальная группа из Ливерморской лаборатории им. Лоуренса (США) намеревалась использовать технику магнитного взрыва, две другие (Корнелльский университет, США, и Институт физики высоких давлений АН СССР) предполагали использовать метод статических давлений. Поскольку ожидаемая величина давления перехода водорода в металлическое состояние по данным различных расчетов (см., например,⁶) составляет величину не меньше 1 Мбар , то предстояло почти на порядок увеличить диапазон экспериментально достижимых давлений⁷).

Заметим, что до начала «водородного» бума экспериментальная группа Н. Каваи из университета г. Осака (Япония) сообщала о достижении статических давлений свыше одного мегабара в многопуансонной двухступенчатой установке^{6,7}. Однако лишь немногие относились к этим результатам с полным доверием.

В 1970 г. Л. Ф. Верещагин с соавторами⁸ сообщили о достижении давлений, превышающих один мегабар, при вдавливании усеченного конуса, изготовленного из синтетического карбонадо⁹), в поверхность пластины из того же материала. Для определения максимального давления измерялись площадь отпечатка, оставляемого конусным индентором на поверхности пластины, и усилие, прилагаемое к индентору.

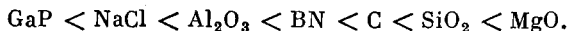
В дальнейшем группа ИФВД АН СССР объявила о наблюдении металлического перехода в таких веществах, как алмаз, кремнезем SiO_2 , окись алюминия Al_2O_3 , окись магния MgO , вода H_2O , водород H_2 ⁹⁻¹⁴. Эксперименты по металлизации указанных веществ проводились с модифицированной формой индентора, коническая вершина которого была округлена. Очевидно, что при приложении нагрузки на инденторе в месте контакта возникает плоский участок, однако его размеры являются функцией нагрузки и ряда других факторов, что затрудняет определение давления. Реги-

*) В СССР первые расчеты параметров перехода водорода в металлическое состояние проведены Абрикосовым²⁸.

**) Непрозрачный мелкокристаллический алмазный агрегат.

страция фазовых переходов производилась путем измерения сопротивления тонкого слоя вещества, находящегося между индентором и пластиной. Этому способствовало то обстоятельство, что синтетический карбонадо является проводящим благодаря присутствию частиц металлического катализатора. Последнее позволяло использовать индентор и пластину в качестве электрических зондов.

К сожалению, авторы работ⁸⁻¹⁴ не смогли сколько-нибудь определенно оценить давления наблюдаемых превращений, а ограничились указанием, что металлизация алмаза и водорода происходит где-то вблизи одного мегабара. Однако, исследуя электрическое сопротивление смесей веществ, группе ИФВД АН СССР удалось установить последовательность переходов. По данным¹⁴ давление перехода в металлическое состояние увеличивается слева направо в ряду следующих веществ:



Практически одновременно с группой ИФВД АН СССР о металлизации кремнезема SiO_2 , водорода H_2 , воды H_2O и окиси магния MgO сообщили Н. Каваи с сотрудниками¹⁵⁻¹⁸. Эта группа использовала многопуансонную двухступенчатую установку, не содержащую алмазных частей, разработанную Н. Каваи.

Н. Каваи с сотрудниками дает следующие оценки давлений металлизации в указанных веществах:

$$\begin{aligned} \text{SiO}_2, \quad \text{H}_2 &\sim 2,5 \pm 0,5 \text{ Мбар}, \quad \text{H}_2\text{O} \sim 3,2 \pm 0,7 \text{ Мбар}, \\ \text{MgO} &\sim 3,4 \pm 0,8 \text{ Мбар}. \end{aligned}$$

Обратим внимание на то, что последовательность превращений, обнаруженная Н. Каваи с соавторами, соответствует наблюдениям группы ИФВД АН СССР.

Здесь следует подчеркнуть, что SiO_2 и MgO являются важнейшими составляющими Земли, и если указания о переходе этих соединений в металлическое состояние при давлениях порядка 1 Мбар подтвердятся, то это потребует изменения ряда геофизических концепций.

В последние годы получила существенное развитие и техника алмазных наковален. Н. Мао и П. Белл из Геофизической лаборатории Института Карнеги (США), используя модифицированную форму наковален, смогли получить давление 1 Мбар²⁰ и с помощью рентгеновской дифракции исследовать уравнения состояния ряда металлов и геофизически интересных материалов^{21,22}. Совсем недавно Н. Мао и П. Белл сообщили о достижении давления 1,7 Мбар²³. Для определения давления авторы использовали рубиновый датчик, шкала которого калибровалась по уравнениям состояния металлов, полученных с помощью ударных волн. Следует напомнить, что давление, полученное Н. Мао и П. Беллом в 1,7 Мбар, уже превышает давление на границе земного ядра (1,4 Мбар), и, учитывая те возможности, которые предоставляют алмазные наковальни для проведения физических исследований, следует надеяться на скорое решение ряда интригующих проблем.

Группа А. Руоффа (Корнелльский университет, США) готовит в настоящее время аппаратуру для наступления на водородную проблему.

Дж. Венеджил и А. Руофф построили сферический шестипуансонный аппарат с наковаленками из твердого сплава; впоследствии они надеются заменить их алмазными²⁴. В твердосплавной версии их аппарата давление не превышает 450 кбар. Недавно А. Руофф любезно сообщил автору этих строк, что в его лаборатории обнаружен переход в металлическое состояние твердого ксенона при давлении 350 кбар и температуре 32 °К. В этих экспериментах А. Руофф использовал камеру с алмазным индентором, практически аналогичную аппарату Л. Ф. Верещагина с соавторами⁸. Метод диагностики ограничивался измерением электросопротивления образца.

Следует думать, что детальное исследование превращения в ксеноне, что вполне возможно осуществить, например, с помощью алмазных наковален, даст много ценной информации о характере перехода металл — диэлектрик.

Последняя работа, о которой здесь следует рассказать, это работа группы авторов из Ливерморской лаборатории им. Лоуренса во главе с П. Хоуком²⁵ по измерению электрического сопротивления водорода при его изоэнтропическом сжатии с помощью техники магнитного взрыва^{*}). Авторы наблюдали, что водород становится хорошим проводником при давлении ~2 Мбар и плотности 1,06 г/см³, температура при этом не превышала 400 °К. Сжатие неона в этих же условиях не привело к увеличению электропроводности вплоть до 5 Мбар (ожидаемое давление металлизации неона превышает 10 Мбар).

Заметим, что давление перехода водорода в металлическое состояние, даваемое в этой работе, совпадает с оценкой Н. Каваи.

В заключение следует указать, что работы по металлизации водорода в статических условиях, проведенные в Москве и Осаке, хотя и уязвимы для критики, тем

*) В этой связи смотрите также работы советских авторов^{29,30}.

не менее в общем согласуются между собой и с данными изознтропического сжатия и теоретическими оценками в отношении давления перехода. Что же касается металлизации плотноупакованных окислов, таких, как MgO и Al_2O_3 , то значения давлений их металлизации, даваемых в цитированных работах, представляются слишком низкими. Д. Либерман, основываясь на расчетах зонной структуры MgO , считает, что давление перехода MgO в металлическое состояние должно быть около 50 Мбар²⁶. Существует такое мнение, что резкое падение электросопротивления при сжатии окислов вызвано их разложением²⁷.

Обратим внимание также на некоторое противоречие. Дело в том, что по данным ИФВД АН СССР давление перехода Al_2O_3 в металлическое состояние составляет величину менее 1 Мбар, в то время как в алмазных наковальнях Н. Мао и П. Белла рубин служит датчиком давления вплоть до 1,7 Мбар²³, а в установке магнитного взрыва П. Хоука и др.²⁵ детали из окиси алюминия остаются непроводящими вплоть до 5 Мбар.

Тем не менее результаты последних лет вселяют определенный оптимизм. Совершенно ясно, что физика вступила в новый неосвоенный диапазон давлений.

Конкретные результаты, полученные в настоящее время, интересны, однако поздравления авторам соответствующих работ следует отложить до тех пор, пока доказательства не станут более полными.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ashcroft N. W.— Phys. Rev. Lett., 1968, v. 21, p. 1748.
2. Forman R. A., Piermarini G. J., Barnett J. D., Block S.— Science, 1972, v. 172, p. 284.
3. Gross E.— Science News, 1970, v. 97, p. 623.
4. Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике,— М.: Наука, 1974.
5. Neese G. A., Rogers F. J., Hoover W. J.— J. Comput. Phys., 1971, v. 7, p. 621.
6. Kawai N., Endo S.— Rev. Sci. Instr., 1970, v. 41, p. 1178.
7. Kawai N., Mochizuki S., Fujita H.— Phys. Lett. Ser. A, 1971, v. 34, p. 107.
8. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Бибаев К. Х., Степанов Г. Н., Виноградов Б. В.— Письма ЖЭТФ, 1972, т. 16, с. 240.
9. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Степанов Г. Н., Виноградов Б. В.— Ibid., с. 382.
10. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Виноградов Б. В., Сакун В. П.— Ibid., 1974, т. 20, с. 540.
11. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Виноградов Б. В., Сакун В. П., Степанов Г. Н.— Ibid., с. 472.
12. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Тимофеев Ю. А.— Ibid., 1975, т. 21, с. 190.
13. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Тимофеев Ю. А.— Ibid., с. 643.
14. Яковлев Е. Н., Верещагин Л. Ф., Виноградов Б. В., Тимофеев Ю. А.— Ibid., 1976, т. 22, с. 570.
15. Kawai N., Nishiyama A.— Proc. Japan Acad., 1974, v. 50, p. 72.
16. Kawai N., Nishiyama A.— Ibid., p. 634.
17. Kawai N., Togaya M., Mishima O., Neindre B. L.— Ibid., 1975, v. 51, p. 627.
18. Kawai N., Togaya M., Mishima O.— Ibid., p. 630.
19. Kawai N., Togaya M., Mishima O. High-pressure Research.— In: Application in Geophysics/Ed. M. H. Maughnani, Syun-iti-Akimoto. — N.Y.: Academic Press, 1977.
20. Мао Н. К., Bell P. M.— Science, 1976, v. 191, p. 851.
21. Мао Н. К., Bell P. M.— In: Carnegie Institution of Washington, Year Book, 75.
22. Мао Н. К., Bell P. M.— In: Carnegie Institution of Washington, Year Book, 76.
23. Мао Н. К., Bell P. M.— Science, 1978, v. 200, p. 1145.
24. Wanagel J., Ruoff A. L.— In: Abstracts of papers presented at the 6th AIRAPT Intern. High Pressure Conference. July 25—29, 1977. Boulder, Colorado, USA.
25. Hawke P. S., Burgess T. J. et al.— Phys. Rev. Lett., 1978, v. 41, p. 994.
26. Liberman D. A.— Phys. and Chem. Sol., 1978, v. 39, p. 255.
27. Кусков О. Л., Хитаров Н. А.— Письма ЖЭТФ, 1978, т. 27, с. 288.
28. Абрикосов А. А.— Астроном. ж., 1954, т. 31, с. 112.
29. Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Михайлова О. Л., Толочко А. П., Урлин В. Д.— Письма ЖЭТФ, 1972, т. 16, с. 286.
30. Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Михайлова О. Л., Толочко А. П., Урлин В. Д.— ЖЭТФ, 1975, т. 69, с. 743.