

## Переход металл – диэлектрик в нитевидных кристаллах квазиодномерного проводника NbS<sub>3</sub> под давлением

Е. М. Дижур<sup>1)</sup>, М. А. Ильина, С. В. Зайцев-Зотов<sup>+</sup>

Институт физики высоких давлений им. Л.Ф.Вережагина РАН, 142190 Троицк, Московская обл., Россия

<sup>+</sup> Институт радиотехники и электроники РАН, 125009 Москва, Россия

Поступила в редакцию 6 июня 2007 г.

Изучено влияние давления на электропроводность квазиодномерного проводника NbS<sub>3</sub>. Обнаружен индуцированный давлением переход диэлектрик – металл, сопровождающийся возрастанием проводимости при комнатной температуре на 6 порядков. На температурных зависимостях сопротивления при давлениях 3–4 ГПа обнаружен дополнительный фазовый переход, проявляющийся в увеличении локальной энергии активации проводимости, причем величина  $d \ln(R)/d(1/T)$  достигает максимума при давлениях 4–5 ГПа, а температурное положение максимума производной  $d \ln(R)/d(1/T)$  зависит от давления как  $T^* \approx 7.5 \times P + 202$  К.

PACS: 71.45.–d, 72.15.Nj

Квазиодномерный проводник (II)NbS<sub>3</sub> является представителем семейства трихалькогенидов переходных металлов с общей формулой MX<sub>3</sub> (M = Nb, Ta; X = Se, S) [1]. Вещества данной группы представляют собой сильно анизотропные проводники, состоящие из проводящих цепочек, слабо связанных ван-дер-ваальсовским взаимодействием. При этом соединения семейства MX<sub>3</sub> обладают существенно различными электронными свойствами. Так TaSe<sub>3</sub> является металлом, в NbSe<sub>3</sub> при температурах 145 и 59 К происходят переходы с образованием волны зарядовой плотности (ВЗП), однако этот материал сохраняет металлическую проводимость в области низких температур; в моноклинном TaS<sub>3</sub> также происходят два перехода с образованием ВЗП при 240 и 160 К, однако в отличие от NbSe<sub>3</sub>, в этом соединении наблюдается полная диэлектризация электронного спектра; в ромбическом TaS<sub>3</sub> полная диэлектризация электронного спектра возникает в результате единственного пайерлсовского перехода при температуре 220 К, а NbS<sub>3</sub> уже при комнатной температуре проявляет диэлектрические свойства [2]. Таким образом, “усиление” металлического характера проводимости происходит в последовательности: NbS<sub>3</sub> → TaS<sub>3</sub> → NbSe<sub>3</sub> → TaSe<sub>3</sub>.

Для квазиодномерных проводников давление представляет собой инструмент, позволяющий уменьшить расстояние между цепочками, что эквивалентно изменению эффективной размерности электронной системы и дает возможность проверить

существующие представления о физических механизмах проводимости квазиодномерных проводников. Экспериментальные исследования зависимости свойств неорганических квазиодномерных проводников от давления до сих пор проводились на NbSe<sub>3</sub> и на TaS<sub>3</sub>. Было показано, что при увеличении давления до ~ 1 ГПа в ромбическом TaS<sub>3</sub> и (TaSe<sub>4</sub>)<sub>2</sub>I происходит некоторая стимуляция состояния с ВЗП, проявляющаяся в увеличении температуры пайерлсовского перехода (в (TaSe<sub>4</sub>)<sub>2</sub>I), возрастании энергии активации проводимости в пайерлсовском состоянии (в TaS<sub>3</sub>) и уменьшении порогового поля начала нелинейной проводимости (оба соединения) [3]. В NbSe<sub>3</sub>, начиная с давления 0.85 ГПа, происходит, напротив, подавление нижнего по температуре перехода, что сопровождается появлением сверхпроводимости с  $T_c \sim 2.5$  К [4]. Под давлением ~ 3 ГПа происходит подавление и верхнего перехода [5], а  $T_c$  достигает максимума ~ 6 К [6].

Представляло интерес исследовать влияние давления на проводимость квазиодномерного “изолятора” NbS<sub>3</sub>. После того как в ходе предварительных исследований [7] нами было обнаружено, что при комнатной температуре сопротивление  $R$  образцов этого соединения падает более чем на 5 порядков при приложении квазигидростатического давления 6 ГПа (насколько нам известно, подобное поведение в квазиодномерных проводниках с ВЗП ранее не наблюдалось), мы провели систематические исследования влияния квазигидростатического давления на температурную зависимость проводимости кристаллической модификации (I)NbS<sub>3</sub> в области давлений 3–7 ГПа

<sup>1)</sup> e-mail: dizhur@ns.hppi.troitsk.ru

при температурах 77–300 К. Оказалось, что при увеличении давления происходит переход диэлектрик – металл, сопровождающийся плавным уменьшением энергии активации проводимости диэлектрической фазы и, начиная примерно с 6 ГПа, температурная зависимость проводимости приобретает металлический характер.

Исследовавшиеся образцы представляли собой нитевидные кристаллы с поперечными размерами 10–100 мкм и длиной около 5 мм. Следует отметить существование нескольких политипов соединения  $\text{NbS}_3$ , различающихся по величине проводимости при комнатной температуре [2]. Исследования, о которых идет речь в настоящей работе, выполнены на нитевидных кристаллах  $\text{NbS}_3$  наиболее высокоомной модификации (I), имеющей сопротивление при комнатной температуре 80 Ом·см. Для создания высоких давлений использовалась камера с эффективной поддержкой ячейки высокого давления, разработанная в ИФВД РАН [8], позволяющая получать квазигидростатические давления в интервале  $P$  от 2 до 8 ГПа·кбар в объеме, используя в качестве среды, передающей давление, пирофиллит. В камеру высокого давления вводились четыре электропровода, выполненные из медной проволоки диаметром 0.16 мм, которые уверенно работали во всем интервале давлений. Измеряемая часть образца в этой конструкции не превышала примерно 1 мм, что обеспечивало достаточную однородность давления. Измерения температурных зависимостей вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились четырехконтактным методом в режиме развертки по напряжению на установке с “холодным” мультипликатором, описанной в работе [9], на естественном отогреве помещенной в криостат камеры, предварительно охлажденной до температуры жидкого азота. В ходе измерений производился учет температурного дрейфа, и измеренные ВАХ приводились к фиксированным значениям точек по температуре путем математической обработки.

На рис.1 представлена температурная зависимость электросопротивления  $\text{NbS}_3$  при различных давлениях, а на рис.2 представлена соответствующая температурная зависимость локальной энергии активации  $d \ln(R)/d(1/T)$ .

Во всем исследованном диапазоне давлений на кривых  $R(T)$  отчетливо видна особенность в виде ступеньки, которой отвечает максимум локальной энергии активации  $d \ln(R)/d(1/T)$ . Увеличение давления приводит к сдвигу  $T^*$  в сторону высоких температур по близкому к линейному закону  $T_{\text{[К]}}^* \approx 7.5 \times P_{\text{[ГПа]}} + 202$  (вставка на рис.2). Амплиту-

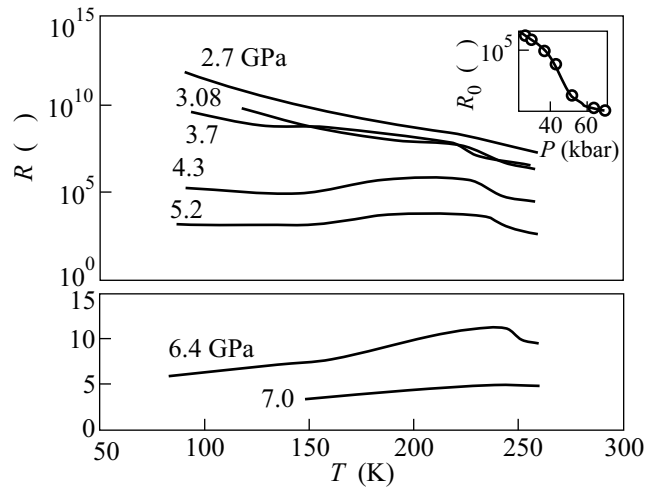


Рис.1. Температурная зависимость сопротивления  $\text{NbS}_3$  при различных давлениях, которые указаны около кривых. На вставке показано расположение точек на кривой барической зависимости сопротивления при комнатной температуре из работы [7]

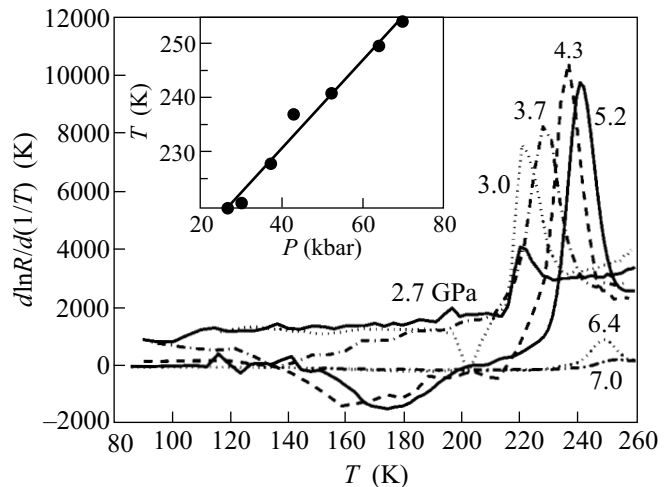


Рис.2. Температурная зависимость локальных энергий активации  $d \ln(R)/d(1/T)$  при различных давлениях. Давление у кривых соответствует рис.1. На вставке показана барическая зависимость температуры  $T^*$ , при которой  $d \ln(R)/d(1/T)$  достигает максимума

да максимума  $d \ln(R)/d(1/T)$  при  $T = T^*$  (высота ступеньки на  $R(T)$  с увеличением давления сначала растет, а, начиная с  $\sim 4$  ГПа, падает. При этом происходит быстрое уменьшение энергии активации проводимости, приводящее в конечном итоге к смене знака производной  $dR/dT$  и возникновению металлической проводимости с  $dR/dT > 0$ .

В целом, эволюция температурных зависимостей образцов (I) $\text{NbS}_3$  под давлением противоположна эволюции температурных зависимостей сопротивления

тонких образцов NbSe<sub>3</sub> при уменьшении их поперечных размеров [10, 11]. В работе [10] такая эволюция связывалась с проявлением эффектов одномерности в тонких образцах. В случае NbS<sub>3</sub> давление, прежде всего, должно приводить к возрастанию вклада межцепочечных перескоков, а значит, к уменьшению эффектов одномерности. В случае достаточно высокого давления можно ожидать, что характер электронной проводимости окажется близким к трехмерному. Такое понимание влияния давления согласуется с наблюдаемой нами экспериментальной картиной перехода от квазиодномерной неметаллической проводимости к металлической. Максимум электропроводности, отчетливо наблюдающийся в области промежуточных давлений  $\sim 3 - 4$  ГПа, напоминает максимумы сопротивления, связанные с переходом лишь части электронов в пайерлсовское состояние, наблюдающиеся, например, в NbSe<sub>3</sub>. Отметим также и отличие: в NbS<sub>3</sub> максимумам предшествует ярко выраженное неметаллическое поведение проводимости ( $dR/dT < 0$ ), в то время как в NbSe<sub>3</sub> максимумы разделяют две металлические фазы с разной концентрацией электронов. Дальнейшие исследования требуются для выяснения природы обнаруженного максимума электропроводности.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований # 05-02-16316.

1. P. Monceau, "Electronic Properties of Quasi-One-Dimensional Materials", Reidel, Dordrecht, 1985, Part II, p. 139; G. Grüner, Rev. Mod. Phys. **60**, 1129 (1988).
2. Z. Z. Wang, P. Monceau, H. Salva et al., Phys. Rev. B **40**, 11589 (1989).
3. D. Moses and R. M. Boyssel, Phys. Rev. B **31**, 3202 (1985).
4. Syuma Yasuzuka and Yoshitoshi Okajima, Phys. Rev. B **60**, 4406 (1999).
5. I. D. Parker, W. N. Creager, A. L. Chen et al., Synthetic Metals **41-43**, 3859 (1991).
6. Syuma Yasuzuka, Tsutomu Fujimoto, Masahiro Shimotori, et al., Proc. of 2nd Asian Conf. on High Pressure Research (ACHPR-2), Nov.1-5, Nara, Japan, 2004, p. 0475.
7. E. M. Dizhur, M. A. Il'ina, S. V. Zaitsev-Zotov, and A. G. Zhuravlev, Proc. of 2nd Asian Conference on High Pressure Research (ACHPR-2), Nov.1-5, Nara, Japan, 2004, p. 0404.
8. Л. Ф. Верещагин, А. П. Новиков, Л. Г. Хвостанцев, Авт. свид. 374919.
9. Л. Ф. Верещагин, М. А. Ильина, Е. С. Ицкевич, ПТЭ **1**, 219 (1969).
10. С. В. Зайцев-Зотов, В. Я. Покровский, П. Монсо, Письма в ЖЭТФ **73**, 29 (2001).
11. E. Slot, M. A. Holst, H. S. J. van der Zant, and S. V. Zaitsev-Zotov, Phys. Rev. Letters **93**, 176602 (2004).