

**РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$ И $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ**

**Л.А. Сайпулаева¹, А.Г. Алибеков¹, Н.В. Мельникова², Н.С. Абакарова¹, А.Н. Бабушкин²,
А.В. Тебеньков²**

¹*Институт Физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского Федерального Исследовательского
Центра Российской Академии Наук,
94 ул. М. Ярагского, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367015 Россия,
E-mail: luzasa11@mail.ru;*

²*Уральский Федеральный Университет,
Институт Естественных Наук и Математики,
51 пр. Ленина, г. Екатеринбург, 620000 Россия.*

**RELAXATION EFFECTS IN $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$ AND $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$ AT HIGH
PRESSURES**

**L.A. Saypulaeva¹, A.G. Alibekov¹, N.V. Melnikova², N.S. Abakarova¹, A.N. Babushkin²,
A.V. Teben'kov²**

¹*Institute of Physics n.a. Kh.I. Amirkhanov, Dagestan Scientific Center of Russian Academy of
Sciences,*

*94 M. Yaragskogo str., Makhachkala, the Republic of Daghestan, 367015 Russia;
E-mail: luzasa11@mail.ru*

²*Ural Federal University, Institute of Natural Sciences and Mathematics,
51 Lenina ave., Yekaterinburg, 620000 Russia.*

Представлены результаты экспериментальных исследований электросопротивления (R) при высоких давлениях с вариацией времени воздействия для двух композитов, состоящих из наноразмерных ферромагнитных гранул $MnAs$, расположенных в полупроводниковой матрице Cd_3As_2 , составов $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$ и $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$. Влияние высокого давления (до 50 ГПа) на электрофизические свойства исследовалось в камере высокого давления с наковальнями типа «закругленный конус-плоскость» из искусственных поликристаллических алмазов «карбонадо». На основе анализа зависимости времен релаксации электросопротивления от давления установлено их существенное возрастание в интервалах (18–24) ГПа и (26–34) ГПа для обоих составов, и в области (38–44) ГПа для образца $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$. Это свидетельствует о возможности реализации в данных областях давлений структурного или электронного фазового перехода.

Experimental results of the electrical resistance (R) study at high pressures with varying exposure times for two composites have been presented. $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$ and $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$ composites consist of nanosized ferromagnetic $MnAs$ granules located in Cd_3As_2 semiconductor matrix. The high pressure (up to 50 GPa) effect on electrophysical properties have been investigated in high pressure chamber with rounded cone-plane anvils made of “carbonado” synthetic polycrystalline diamonds. Baric dependences of relaxation time have been analyzed, and significant increase in relaxation times of electrical resistance with pressure have been found for both compositions in the (18–24) GPa and (26–34) GPa ranges and for $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$ sample in the (38–44) GPa range. This indicates that the structural or electronic phase transition can be realized in these pressures ranges.

В последнее время большое внимание уделяется изучению свойств дираковских полуметаллов [1–4], которые интересны в первую очередь из-за особенностей их электронной структуры вблизи уровня Ферми. В электронном спектре таких объемных кристаллов

присутствует конус Дирака, образованный двукратно вырожденными зонами. В силу своих экзотических свойств эти материалы имеют практическую значимость в плане создания электронных приборов нового поколения. Поэтому поиск новых соединений такого класса является актуальной задачей при формировании элементной базы новой электроники. Наиболее перспективными материалами для этой цели являются композиты на основе дираковского полуметалла Cd_3As_2 и магнитных наногранул $MnAs$ [5, 6].

Настоящая работа посвящена изучению особенностей поведения электрических характеристик композитов $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$ и $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$ под воздействием высоких давлений до 50 ГПа. Образцы представляют собой композиты, состоящие из наноразмерных ферромагнитных гранул $MnAs$, хаотически расположенных в объеме полупроводниковой матрицы Cd_3As_2 . Метод синтеза и результаты аттестации материалов $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$ и $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$ подробно описаны в [6, 7]. Электронно-микроскопическими исследованиями гранулы образца $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$ визуализировать не удалось, возможно, из-за характерного рельефа и малых размеров частиц. Характерные диаметры нанокластеров $MnAs$ в композите $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$ (наблюдается «двугорбое», бимодальное распределение частиц по размерам)

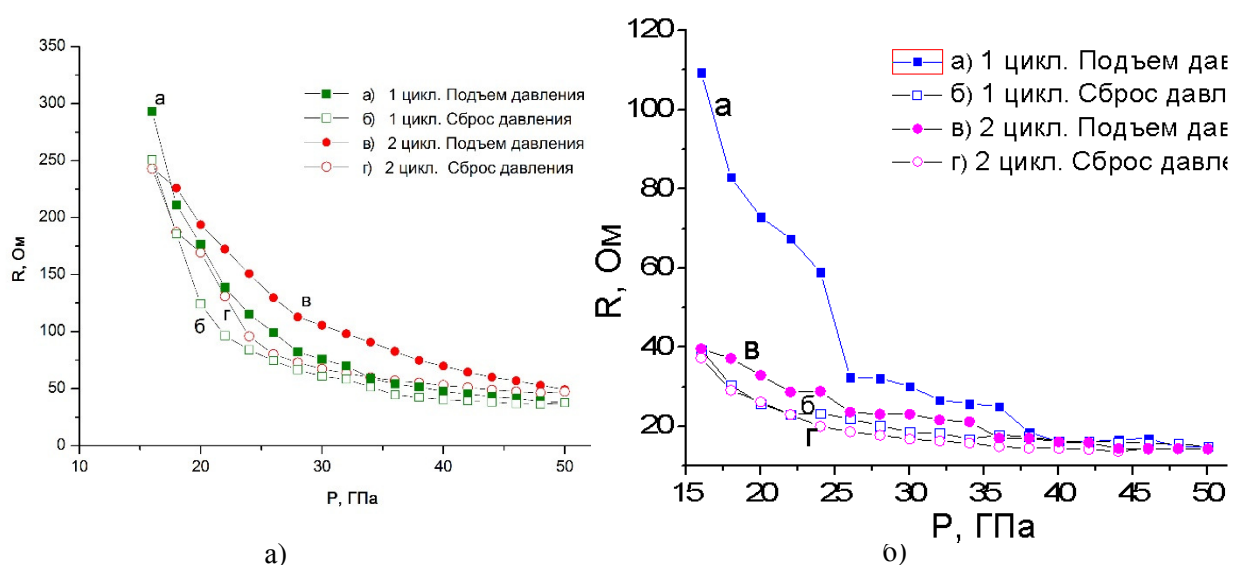


Рис. 1 - Зависимости электрического сопротивления от давления. Образцы: а) $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$, б) $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$ (распределение частиц по размерам) составляют 20–30 нм и 50-90 нм

составляют 20–30 нм и 50-90 нм.

Наиболее вероятно, что частицы с размерами более 50 нанометров, могут находиться не в объеме материала, а в приповерхностных областях, иначе это привело бы к существенному повышению энергий деформации как самой матрицы, так и нанообразований. Исходя из этого, можно ожидать, что объемные физические свойства композита $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$ определяются, в основном, свойствами нанокластеров $MnAs$ с размерами 20-30 нм.

Влияние давления на электрофизические свойства композитов исследовалось в камере высокого давления (КВД) с наковальнями типа «закругленный конус-плоскость» из искусственных поликристаллических алмазов «карбонадо». Принцип создания давлений до 50 ГПа, технические характеристики и градуировка КВД детально описаны в [8-10].

Для оценки роли релаксационных эффектов, обусловленных пластической деформацией, при некоторой фиксированной нагрузке анализировалось поведение зависимости (R) от времени воздействия нагрузки (t). Для каждого значения давления из исследуемого диапазона (при приложении новой нагрузки) проводилась оценка величины относительного изменения электросопротивления $\frac{\Delta R}{R}$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(t_{rel}) - R(t_0)}{R(t_0)}, \quad (1)$$

где t_0 – момент времени начала приложения новой нагрузки к образцу; t_{rel} – время, в течение которого устанавливается постоянное значение электросопротивления.

На рисунке 1 показаны барические зависимости электросопротивления исследуемых образцов при возрастании и снижении давления.

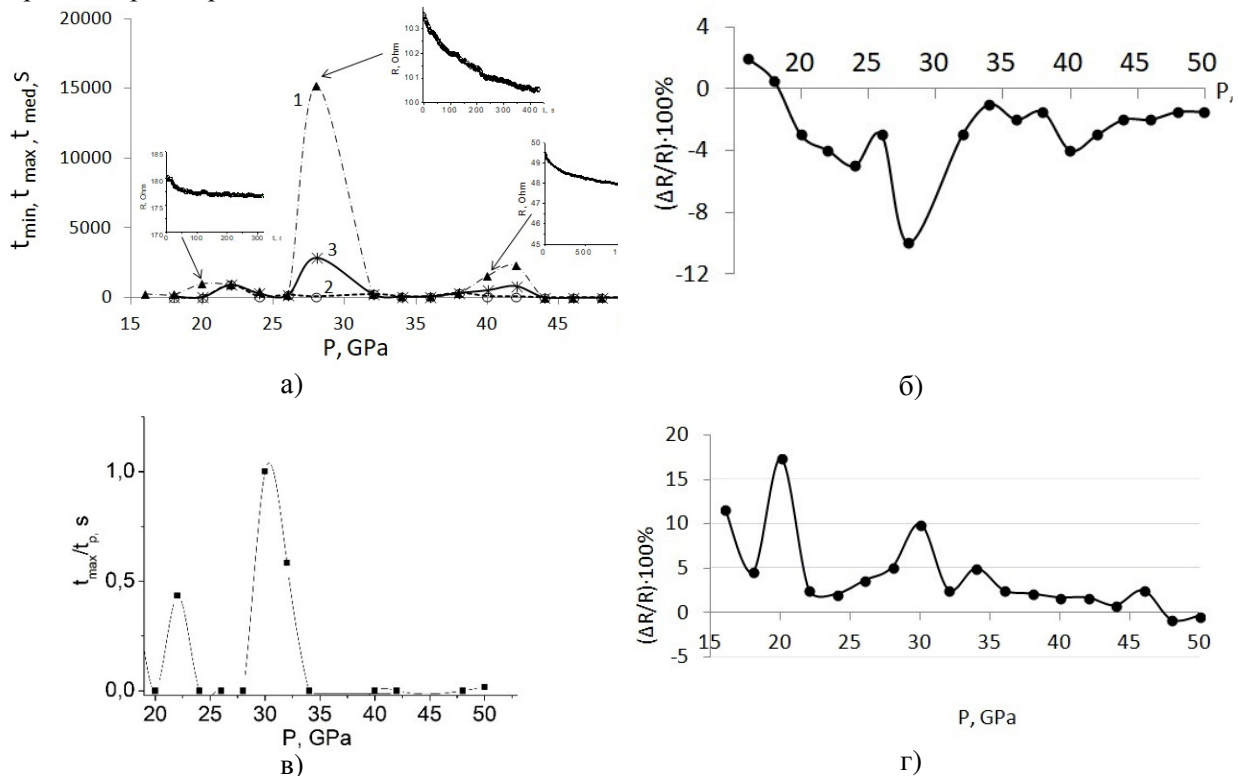


Рис. 2 - Барические зависимости времени релаксации электросопротивления t_{max} (1), t_{min} (2) и t_{med} (2) (а), а также относительного значения электросопротивления (б) для композита $Cd_{50.3}Mn_{8.2}As_{41.5}$; барические зависимости относительной величины времени релаксации электросопротивления t_{max}/t_p (здесь t_p – максимальное значение времени релаксации, наблюдаемое при давлении 31 GPa) (в), и относительного значения электросопротивления (г) для композита $Cd_{48.6}Mn_{11.4}As_{40}$

Установлено, что зависимости электросопротивления от времени $R(t)$ при каждой новой приложенной нагрузке хорошо аппроксимируются двойной или одиночной (при $t_1=t_2$) экспонентой:

$$R(t) = A_1 e^{-t/t_1} + A_2 e^{-t/t_2} \quad (2)$$

Меньшее время $t_{min} = \min\{t_1, t_2\}$ соответствует релаксационным процессам, связанным с изменением концентрации носителей и ширины запрещенной зоны вследствие изменения расстояний между атомами и энергии носителей. Большее время $t_{max} = \max\{t_1, t_2\}$ характеризует процессы, обусловленные релаксацией кристаллической решетки. Кроме того, в том случае, если наиболее адекватной является аппроксимация (2), проведена также аппроксимация одиночной экспонентой

$$R(t) = A e^{-t/t_{med}}, \quad (3)$$

где время t_{med} – так называемое «среднее» время (в общем случае совпадающее с t_1 и t_2 в (2), если $t_1=t_2$ и отличное от t_1 и t_2 , если они не равны). Проведенная оценка среднего времени t_{med} по формуле (3) дает возможность определить преимущественные процессы в материале: если оно близко к t_{min} , преобладают процессы, связанные с изменением параметров носителей, если t_{med} близко к t_{max} , преобладают процессы, связанные с релаксацией кристаллической решетки (в условиях воздействия приложенной нагрузки).

Барические зависимости времени релаксации электросопротивления t_{min} и t_{max} , а также относительного изменения электросопротивления для исследуемых материалов при увеличении давления представлены на рисунке 2. Время t_{rel} из формулы (1), в течение которого устанавливается постоянное значение электросопротивления после приложения новой

фиксированной нагрузки, больше или близко к времени t_{med} , оцениваемому из аппроксимации $R(t)$ одиночной экспонентой (3). Величины $t_{\text{max}} = \max\{t_1, t_2\}$, $t_{\text{min}} = \min\{t_1, t_2\}$ оценены (для каждого увеличивающегося фиксированного значения давления) из аппроксимации зависимостей электросопротивления от времени (времени выдержки под новым приложенным давлением) по формуле (2).

В [11] обсуждается наличие барического фазового перехода в композите в окрестности 33 ГПа, вероятнее всего, связанного с особенностями поведения характеристик электронной подсистемы матрицы композита Cd_3As_2 [12].

Список использованных источников:

1. *Liu Z.K., Zhou B., Zhang Y., Wang Z.J., Weng H.M., Prabhakaran D., Mo S.K., Shen Z.X., Fang Z., Dai X., Hussain Z., and Chen Y.L.*, Science 2014, V.343, 864.
2. *Young S.M., Zaheer S., Teo J.C.Y., Kane C.L., Mele E.J., and Rappe A.M.*, Phys. Rev. Lett. 2012, V.108, 140405.
3. *Xu S.-Y., Liu C., Kushwaha S.K. et al. (Collaboration)*, Science 2015, V.347, 294.
4. *Sklyadneva I. Yu., Rusinov I. P., Heid R., Bohnen K.-P., Echenique P. M., and Chulkov E. V.*, Sci. Rep. 2016, V. 6, 24137.
5. *Crassee I., Sankar R., Lee L. et al.* Phys. Rev. Materials. 2018, V. 2. P. 92-105
6. *Риль А.И., Кочура А.В., Маренкин С.Ф и др.* Известия Юго-Западного государственного университета. 2017, -Т. 7, №2 (23), С. 120
7. *Маренкин С. Ф., Трухан В. М., Федорченко И. В., Труханов С.В., Шёлковая Т.В.* Журнал Неорганической Химии, 2014, Т. 59, № 4, С. 511.
8. *Vereshchagin L.F., Yakovlev E.N., Vinogradov B.V., Stepanov G.N., Bibaev K.Kh., Alaeva T.I., Sakun V.P.* High Temperatur.–High Press. 1974, V. 6, 499.
9. *Babushkin A.N., Pilipenko G.I., Gavrilov F.F.* J. Phys.: Condens. Matter. 1993, V. 5, 8659.
10. *Babushkin A.N.* High Press. Res. 1992, V. 6, 349.
11. *Melnikova N.V., Tebenkov A.V., Sukhanova G.V et. al.* Solid State Physics, 2018, V. 60, №3. P. 499
12. *Lanpo He, Yating Jia, Sijia Zhang, Xiaochen Hong, Changqing Jin, Shiyan Li.* Quantum Materials 2016, **1**, 16014.