

УДК 538.915

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В АНТИФЕРРОМАГНЕТИКЕ $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

© 2022 г. А. Л. Хорошилов<sup>1,\*</sup>, А. В. Богач<sup>1</sup>, С. В. Демишев<sup>1</sup>, К. М. Красиков<sup>1</sup>, В. Н. Краснорусский<sup>1</sup>, С. Е. Половец<sup>2</sup>, В. Б. Филипов<sup>2</sup>, Н. Е. Случанко<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН И.А. Щербаковым 28.12.2021 г.

Поступило 28.12.2021 г.

После доработки 28.12.2021 г.

Принято к публикации 17.03.2022 г.

Выполнены детальные измерения эффекта Холла при гелиевых температурах 2.1–4.2 К в магнитоупорядоченных фазах антиферромагнетика (АФ)  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$  в магнитном поле до 80 кЭ на монокристаллах с ориентацией нормалей  $\mathbf{n} \parallel [001]$  и  $\mathbf{n} \parallel [110]$ . На основе проведенного анализа угловых зависимостей холловского сопротивления найдены новые фазовые переходы в АФ-состоянии, а также обнаружены аномалии, связанные с эффектами взаимодействия динамических зарядовых страйпов с внешним магнитным полем.

*Ключевые слова:* додекаборид, антиферромагнетик, пространственная неоднородность, фазовая диаграмма, магнетосопротивление, эффект Холла, анизотропия

DOI: 10.31857/S2686740022030099

В последние десятилетия большой интерес вызывают исследования сильно-коррелированных электронных систем (СКЭС) с металлической проводимостью и электронным фазовым расщеплением атомного масштаба, перспективных для практических применений и построения современных теоретических моделей [1–14]. Среди различных типов пространственных неоднородностей особое место занимают динамические зарядовые страйпы, для которых характерны высокочастотные (~240 ГГц [4]) колебания электронной плотности зонных носителей заряда. Зарядовые страйпы за счет сильного взаимодействия с внешним магнитным полем модифицируют сверхпроводящие [15] и магнитные фазовые диаграммы СКЭС (см., например, [4, 16]). В случае антиферромагнитных (АФ) металлов  $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{V}_{12}$  с зарядовыми страйпами вдоль направлений  $\langle 110 \rangle$  в ГЦК-решетке, авторами [4, 16] были получены многокомпонентные магнитные фазовые диаграммы и показано, что в этих редкоземельных (РЗ) додекаборидах формирование филаментарной структуры проводящих каналов приводит к

понижению симметрии и образованию угловых Н–ф магнитных фазовых диаграмм в виде мальтийского креста и сильной анизотропии рассеяния носителей в парамагнитном состоянии. Кроме того, недавно [17] было обнаружено, что в парамагнитном состоянии  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$  возникает существенная анизотропия эффекта Холла, вызванная резким ростом в полях выше 40 кЭ положительной аномальной ангармонической компоненты.

Для определения положения фазовых границ на магнитных фазовых диаграммах СКЭС  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$  и выяснения механизма формирования анизотропии рассеяния носителей заряда представляет интерес выполнить исследования эффекта Холла в АФ-состоянии (температура Нееля  $T_N \approx 5.7$  К [16]) и провести сравнительный анализ аномалий на угловых зависимостях диагональной (магнетосопротивление) и недиагональной (холловское сопротивление) компонент тензора сопротивления. В работе представлены результаты измерений эффекта Холла в АФ состоянии  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$  и на основе анализа получены аргументы в пользу существования дополнительных фазовых границ на угловых Н–ф магнитных фазовых диаграммах  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$ .

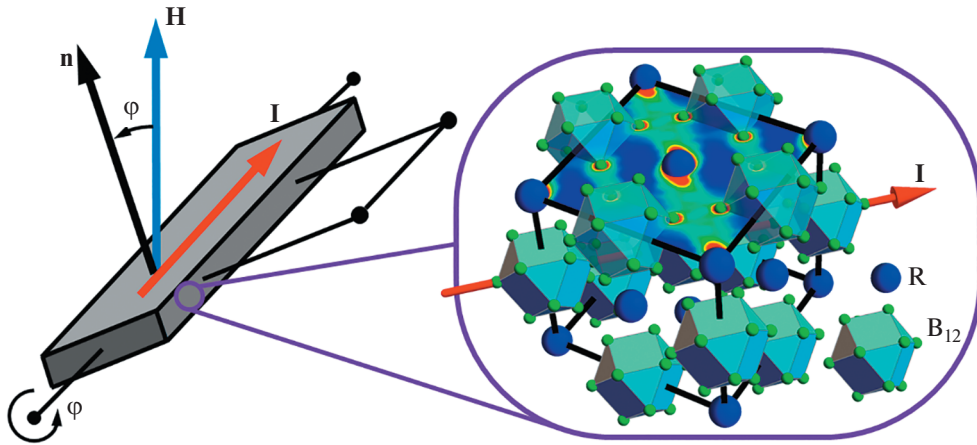
### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследовались монокристаллические образцы  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$ , выра-

<sup>1</sup>Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Национальная академия наук Украины, Киев, Украина

\*E-mail: poligon-51@yandex.ru



**Рис. 1.** Схема вращения образца при измерениях эффекта Холла и схема формирования динамических зарядовых страйпов в ГЦК решетке редкоземельных додекаборидов  $Rb_{12}$ . Приведено распределение электронной плотности в страйповой фазе для плоскости (001) из работы [20].

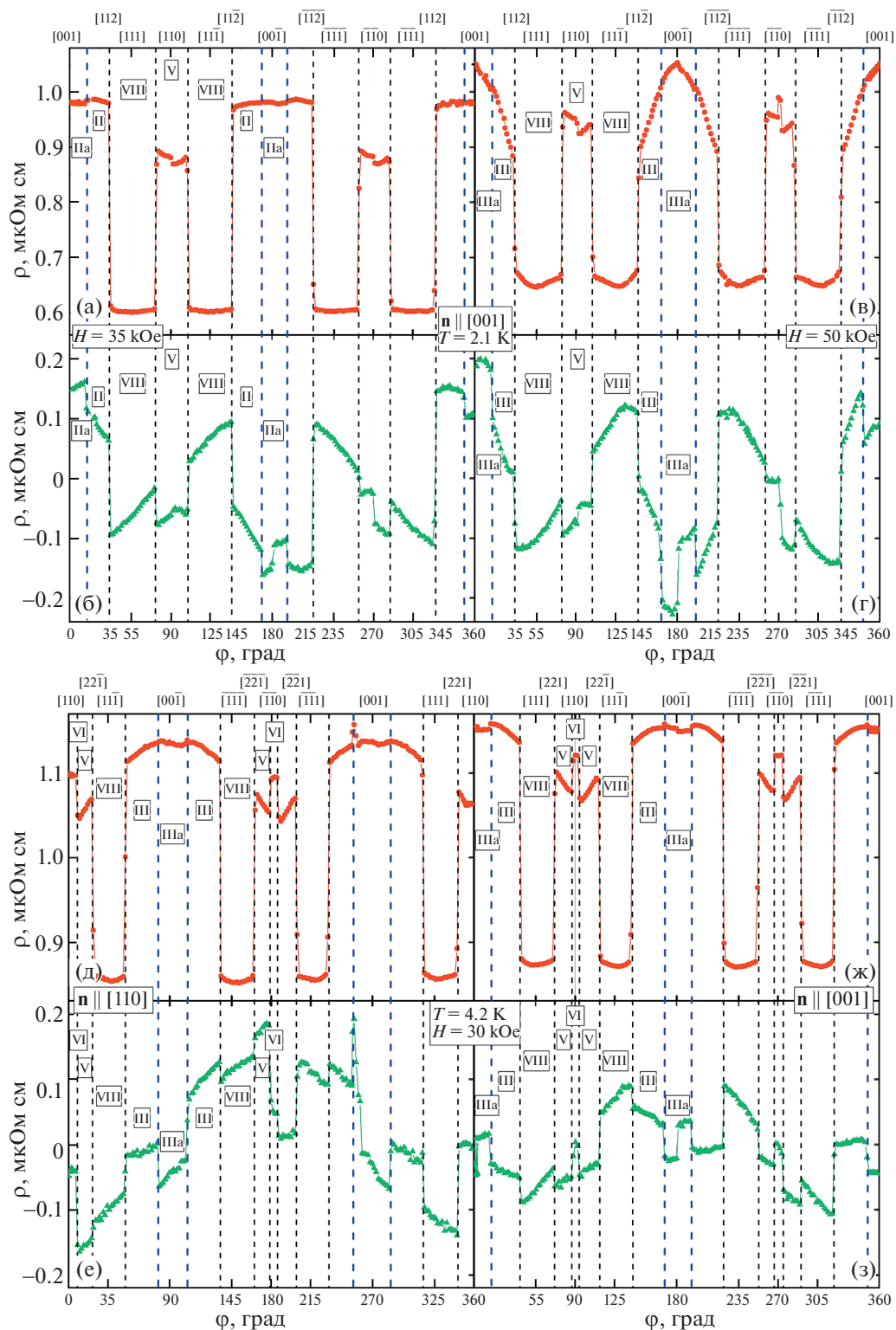
щенные в ИПМ НАН Украины методом бестигельного вертикального индукционного зонного плавления в инертной атмосфере аргона [18]. Измерения поперечного магнетосопротивления и эффекта Холла проводились в ИОФ РАН стандартным пятиконтактным методом с коммутацией постоянного тока через образец. В работе использовалась измерительная ячейка с образцом, обеспечивающая вращение относительно оси измерительного тока  $I \parallel [\bar{1}10]$  с пошаговой фиксацией положения образца во внешнем перпендикулярном магнитном поле  $H$  напряженностью до 80 кЭ. Измерения проводились при температурах 2.1–4.2 К на монокристаллических образцах  $Ho_{0.8}Lu_{0.2}B_{12}$  с двумя различными направлениями нормали к поверхности образца  $n \parallel [001]$  и  $n \parallel [110]$ , вращение вектора  $H$  на угол  $\varphi = \angle n, H$  в диапазоне  $\varphi = 0-360^\circ$  осуществлялось в плоскости  $(\bar{1}10)$  (см. схему на рис. 1).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

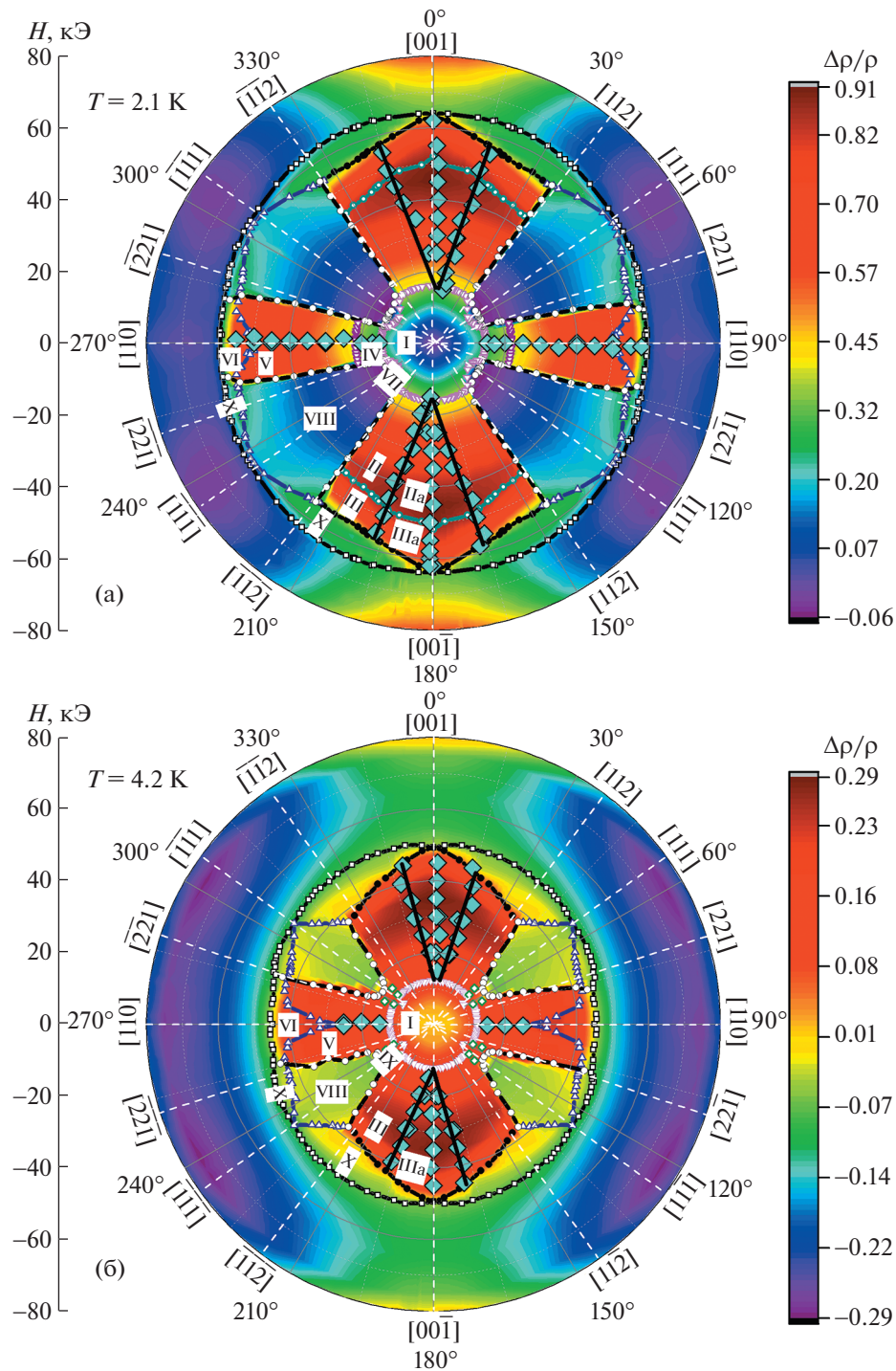
На рис. 2 представлено сравнение измеренных угловых кривых удельного  $\rho(\varphi)$  и холловского  $\rho_H(\varphi)$  сопротивления в полях 35 и 50 кЭ для нормали  $n \parallel [001]$  при  $T = 2.1$  К и для нормалей  $n \parallel [001]$  и  $n \parallel [110]$  в поле 30 кЭ при  $T = 4.2$  К. Следует подчеркнуть, что все приведенные в работе угловые зависимости холловского сопротивления  $\rho_H(\varphi)$  были скорректированы путем вычитания вклада от магнетосопротивления (см., например, [19]), возникающего за счет не эквипотенциального расположения холловских контактов на образце. Для всех исследованных образцов вклад магнетосопротивления не превышал 2% от величины регистрируемого холловского сигнала. Положение фазовых границ (см. нумерацию фаз римскими цифрами на рис. 3 и на  $H$ – $T$  магнитных фазовых диаграммах в [16]) зависит от направления (угол  $\varphi$ )

и напряженности  $H$  внешнего магнитного поля; на рис. 2 эти границы показаны схематически черными пунктирными линиями. Легко видеть, что основные особенности на кривых  $\rho(\varphi)$  (рис. 2а, 2в и рис. 2д, 2ж) воспроизводятся также на кривых  $\rho_H(\varphi)$  (рис. 2б, 2г и рис. 2е, 2з). Так, положению радиальных фазовых границ вдоль  $\langle 112 \rangle$  (см. обозначения в верхней части рис. 2) отвечают как резкие аномалии на кривых  $\rho(\varphi)$ , так и особенности в виде ступенек на зависимостях  $\rho_H(\varphi)$  (рис. 2). Указанные радиальные границы отделяют область максимальных значений магнетосопротивления в широкой окрестности направления  $\langle 001 \rangle$  (см. рис. 3) и отвечают переходам между фазами II–III и VIII, которые наблюдаются в широком диапазоне магнитных полей (см. также [16]). Аналогично, положение сингулярностей на кривых  $\rho(\varphi)$  вблизи  $H \parallel \langle 221 \rangle$  совпадает с положением схожих с ними особенностей на холловских кривых  $\rho_H(\varphi)$  (см. рис. 2). Указанные аномалии наблюдаются на границах сектора, отвечающего окрестности направления  $\langle 110 \rangle$  (переходы между фазами V и VIII, см. рис. 3), вдоль которого в РЗ додекаборидах формируются динамические зарядовые страйпы [4, 16, 17, 19].

На рис. 2д–2з для сравнения приведены кривые  $\rho(\varphi)$  и  $\rho_H(\varphi)$  в фиксированном поле 30 кЭ при  $T = 4.2$  К для двух различных нормалей  $n \parallel [001]$  и  $n \parallel [110]$  в плоскости  $(\bar{1}10)$  (см. схему на рис. 1). Как видно из рис. 2д–2з, угловые положения фазовых границ вблизи углов, отвечающих наиболее сильным изменениям сопротивления (рис. 2д, 2ж), заметно отклоняются от направлений  $\langle 112 \rangle$  и  $\langle 221 \rangle$  (рис. 3б). Отметим также, что при  $T = 4.2$  К в узком интервале углов вблизи направлений  $\langle 110 \rangle$  на угловых зависимостях удельного сопротивления формируется дополнительная особенность в виде симметричного прямоугольного пика малой амплитуды, склоны которого соответствуют пе-



**Рис. 2.** Угловые зависимости удельного  $\rho(\phi)$  и холловского  $R_H(\phi)$  сопротивления в полях 35 кЭ (а, б) и 50 кЭ (в, г) при температуре 2.1 К для нормали  $n \parallel [001]$ , и в поле 30 кЭ при температуре 4.2 К для нормалей  $n \parallel [110]$  (д, е) и  $n \parallel [001]$  (ж, з). Синими пунктирными линиями обозначено положение новых фазовых границ, обнаруженных в холловских экспериментах. Римскими цифрами обозначены различные магнитоупорядоченные фазы.



**Рис. 3.** Угловые  $H$ - $\phi$ -магнитные фазовые диаграммы при температурах 2.1 К (а) и 4.2 К (б) в плоскости  $(\bar{1}10)$ . Римскими цифрами приведена нумерация магнитоупорядоченных фаз, которая соответствует  $H$ - $T$ -магнитным фазовым диаграммам, построенным в [16]. Найденные в работе новые фазовые переходы и аномалии эффекта Холла отмечены голубыми ромбами, толстыми черными сплошными линиями показаны новые фазовые границы.

реходам в фазу VI (рис. 2д, 2ж). При этом на кривых холловского сопротивления  $\rho_H(\phi)$  в этой области также наблюдаются резкие аномалии в виде несимметричной двухступенчатой особенности (рис. 2е), либо узкого пика (рис. 2з).

Очевидно, синхронное появление сингулярностей на кривых удельного сопротивления  $\rho(H_0, \phi_0)$  и холловского сопротивления  $\rho_H(H_0, \phi_0)$  (рис. 2) свидетельствует о наличии резких фазовых границ на  $H$ - $T$ - и  $H$ - $\phi$ -диаграммах  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{B}_{12}$ .

При этом, наряду с отмеченными выше синхронными аномалиями  $\rho$  и  $\rho_H$  заметной амплитуды, которые отвечают ориентационным фазовым переходам [16], угловые кривые холловского сопротивления позволяют зарегистрировать и новые, дополнительные фазовые границы. Действительно, вместе с едва заметными особенностями на кривых удельного сопротивления  $\rho(\varphi)$  вблизи направлений  $\langle 001 \rangle \pm 15^\circ$  при температуре 2.1 К в поле 35 кЭ (рис. 2а) на зависимостях холловского сопротивления  $\rho_H(\varphi)$  регистрируются заметные “ступеньки” (рис. 2б), положение которых, по видимому, отвечает границам новой фазы IIa (см. рис. 3а). Аналогично, дополнительная фазовая граница наблюдается и при  $T = 4.2$  К в поле 30 кЭ в тех же направлениях магнитного поля  $\mathbf{H} \parallel \langle 001 \rangle \pm 15^\circ$  (рис. 3б). Положения соответствующих особенностей  $\rho_H(\varphi)$  обозначены синими пунктирными линиями на рис. 2. С ростом поля отвечающая фазе IIa (см. также IIIa на рис. 3а и 3б) область на  $\mathbf{H}$ – $\varphi$ -диаграмме расширяется (граница показана голубыми ромбами и линиями на рис. 3). С учетом экспериментальной погрешности в позиционировании образца по углу, найденные нами дополнительные фазовые границы представляют собой близкие к радиальным отрезки, которые в малых полях начинаются от границы с фазой I и заканчиваются при переходе в фазу X (рис. 3).

Отдельно следует отметить особенности на кривых  $\rho_H(\varphi)$ , которые наблюдаются в непосредственной близости от  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 001 \rangle$  (см., например, рис. 2б, г, з), совпадающих, соответственно, с направлениями магнитного поля вдоль и перпендикулярно динамическим зарядовым страйпам в кристалле  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$ . Поскольку похожее поведение холловского сопротивления наблюдалось ранее [19] в реперном диамагнитном соединении  $\text{LuV}_{12}$ , представляется естественным и в АФ металле  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$  связать указанные аномалии вблизи  $\mathbf{H} \parallel \langle 110 \rangle$  и  $\mathbf{H} \parallel \langle 001 \rangle$  с особенностями взаимодействия страйпов с внешним магнитным полем. Однако отсутствие теоретических моделей для описания неравновесных АФ металлов с электронным фазовым расслоением и филаментарной структурой проводящих каналов в настоящее время не позволяет выполнить более детальный анализ свойств СКЭС, исследуемой в настоящей работе.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в антиферромагнитном металле  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$  с электронным фазовым расслоением на основе проведенного сравнительного анализа угловых зависимостей удельного  $\rho(\varphi)$  и холловского  $\rho_H(\varphi)$  сопротивления обнаружены новые магнитоупорядоченные фазы и аномалии резистивных характеристик, возникающие вблизи направлений поля вдоль ( $\mathbf{H} \parallel \langle 110 \rangle$ ) и поперек

( $\mathbf{H} \parallel \langle 001 \rangle$ ) динамических зарядовых страйпов. На примере  $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{V}_{12}$  продемонстрировано, что в ряде случаев именно эффект Холла оказывается наиболее чувствительным методом определения фазовых границ на магнитной фазовой диаграмме.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В.В. Глушкову за полезные дискуссии.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00243).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dagotto E.* Complexity in Strongly Correlated Electronic Systems // Science. 2005. V. 309. I. 5732. P. 257. <https://doi.org/10.1126/science.1107559>
2. *Flachbart K., Alekseev P., Grechnev G., Shitsevalova N., Siemensemeyer K., Sluchanko N., Zogal O.* Rare earth dodecaborides–magnetism, superconductivity and other properties. Chapter 2 in Rare Earths: Research and Applications (ed. Delfrey K.N.). N.Y.: Nova Science Publishers, 2008. P. 79–125. ISBN: 9781604562187.
3. *Mori T.* Higher borides. Chapter 238 in Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths (ed. Gschneidner K.A., Bünzli J.-C.G., Pecharsky V.K.). V. 38. Amsterdam: Elsevier, 2008. P. 105–173. ISBN: 9780444521439.
4. *Sluchanko N.E.* Magnetism, quantum criticality, and metal–insulator transitions in  $\text{RB}_{12}$ , Chapter 4 in Rare-Earth Borides / Ed. D.S. Inosov. Singapore: Jenny Stanford Publishing, 2021. P. 331–442. ISBN: 9781003146483.
5. *Gabani S., Flachbart K., Siemensemeyer K., Mori T.* Magnetism and superconductivity of rare earth borides // Journal of Alloys and Compounds. 2020. V. 821. P. 153201. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153201>
6. *Loudon J.C., Mathur N.D., Midgley P.A.* Charge-ordered ferromagnetic phase in  $\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$  // Nature. 2002. V. 420. I. 6917. P. 797–800. <https://doi.org/10.1038/nature01299>
7. *Salamon M.B., Jaime M.* The physics of manganites: Structure and transport // Reviews of Modern Physics. 2001. V. 73. I. 3. P. 583–628. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.73.583>
8. *Tranquada J.M., Woo H., Perring T.G., Goka H., Gu G.D., Xu G., Yamada K.* Quantum magnetic excitations from stripes in copper oxide superconductors // Nature. 2001. V. 429. I. 6991. P. 534–538. <https://doi.org/10.1038/nature02574>
9. *Si Q., Yu R., Abrahams E.* High-temperature superconductivity in iron pnictides and chalcogenides // Nature Rev. Mater. 2016. V. 1. P. 16017. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.17>
10. *Fernandes R.M., Chubukov A.V., Schmalian J.* What drives nematic order in iron-based superconductors? //

- Nature. Phys. 2014. V. 10. P. 97–104.  
<https://doi.org/10.1038/nphys2877>
11. Lee J.J., Schmitt F.T., Moore R.G., Johnston S., Cui Y.-T., Li W., Yi M., Liu Z.K., Hashimoto M., Zhang Y., Lu D.H., Devereaux T.P., Lee D.-H., Shen Z.-X. Interfacial mode coupling as the origin of the enhancement of T(c) in FeSe films on SrTiO<sub>3</sub> // Nature. 2014. V. 13. I. 515. P. 7526.  
<https://doi.org/10.1038/nature13894>
  12. Jian-Feng Ge, Zhi-Long Liu, Canhua Liu, Chun-Lei Gao, Dong Qian, Qi-Kun Xue, Ying Liu, Jin-Feng Jia. Superconductivity above 100 K in single-layer FeSe films on doped SrTiO<sub>3</sub> // Nat. Mat. 2015. V. 14. P. 285.  
<https://doi.org/10.1038/nmat4153>
  13. Qisi Wang, Yao Shen, Bingying Pan, Yiqing Hao, Mingwei Ma, Fang Zhou, Steffens P., Schmalzl K., Forrest T.R., Abdel-Hafiez M., Xiaojia Chen, Chareev D.A., Vasiliev A.N., Bourges P., Sidis Y., Huibo Cao, Jun Zhao. Strong interplay between stripe spin fluctuations, nematicity and superconductivity in FeSe // Nat. Mat. 2001. V. 15. P. 159.  
<https://doi.org/10.1038/nmat4492>
  14. Sachdev S., Keimer B. Quantum criticality // Phys. Today. 2011. V. 64. P. 29.  
<https://doi.org/10.1063/1.3554314>
  15. Azarevich A., Bogach A., Glushkov V., Demishev S., Khoroshilov A., Krasikov K., Voronov V., Shitsevalova N., Filipov V., Gabáni S., Flachbart K., Kuznetsov A., Gavrilkin S., Mitsen K., Blundell S.J., Sluchanko N.E. Inhomogeneous superconductivity in Lu<sub>x</sub>Zr<sub>1-x</sub>B<sub>12</sub> dodecaborides with dynamic charge stripes // Phys. Rev. B. 2021. V. 103. P. 104515.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.104515>
  16. Khoroshilov A.L., Krasnorussky V.N., Krasikov K.M., Bogach A.V., Glushkov V.V., Demishev S.V., Samarin N.A., Voronov V.V., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Gabáni S., Flachbart K., Siemensmeyer K., Gavrilkin S.Yu., Sluchanko N.E. Maltese cross anisotropy in Ho<sub>0.8</sub>Lu<sub>0.2</sub>B<sub>12</sub> antiferromagnetic metal with dynamic charge stripes // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 174430.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.174430>
  17. Khoroshilov A.L., Azarevich A.N., Bogach A.V., Glushkov V.V., Demishev S.V., Krasnorussky V.N., Krasikov K.M., Kuznetsov A.V., Shitsevalova N. Yu., Filipov V. B., Sluchanko N.E. Anisotropy of the Hall Effect in the Paramagnetic Phase of Ho<sub>0.8</sub>Lu<sub>0.2</sub>B<sub>12</sub> Cage Glass // JETP Letters. 2021. V. 113. P. 526–531.  
<https://doi.org/10.1134/S0021364021080051>
  18. Werheit H., Filipov V., Shirai K., Dekura H., Shitsevalova N., Schwarz U. and Armbrüster M. Raman scattering and isotopic phonon effects in dodecaborides // J. Phys.: Cond. Matter. 2011. V. 23. P. 065403.  
<https://doi.org/10.1088/0953-8984/23/6/065403>
  19. Sluchanko N., Azarevich A., Bogach A., Demishev S., Krasikov K., Voronov V., Filipov V., Shitsevalova N., Glushkov V. Hall effect and symmetry breaking in the non-magnetic metal LuB<sub>12</sub> with dynamic charge stripes // Phys. Rev. B. 2021. V. 103. P. 035117.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.035117>
  20. Bolotina N.B., Dudka A.P., Khrykina O.N., Glushkov V.V., Azarevich A.N., Krasnorussky V.N., Gabani S., Shitsevalova N.Yu., Dukhnenko A.V., Filipov V.B., Sluchanko N.E. On the role of isotopic composition in crystal structure, thermal and charge-transport characteristics of dodecaborides Lu<sup>N</sup>B<sub>12</sub> with the Jahn-Teller instability // J. of Physics and Chemistry of Solids. 2019. V. 129. P. 434–441.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpics.2019.01.026>

## DETECTION OF PHASE TRANSITIONS IN Ho<sub>0.8</sub>Lu<sub>0.2</sub>B<sub>12</sub> ANTIFERROMAGNET DURING THE HALL EFFECT MEASUREMENTS

**A. L. Khoroshilov<sup>a</sup>, A. V. Bogach<sup>a</sup>, S. V. Demishev<sup>a</sup>, K. M. Krasikov<sup>a</sup>,  
 V. N. Krasnorussky<sup>a</sup>, S. E. Polovec<sup>b</sup>, V. B. Filipov<sup>b</sup>, and N. E. Sluchanko<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Institute for Problems of Materials Science, NASU, Kyiv, Ukraine

Presented by Academician of the RAS I.A. Shcherbakov

Detailed measurements of the Hall effect were carried out at helium temperatures of 2.1–4.2 K in magnetically ordered phases of the antiferromagnet (AF) Ho<sub>0.8</sub>Lu<sub>0.2</sub>B<sub>12</sub> in a magnetic field up to 80 kOe on single crystals with the orientation of the normal **n** || [001] and **n** || [110]. Based on the analysis of the angular dependences of the Hall resistance, new phase transitions in the AF state are found, and anomalies associated with the effects of the interaction of dynamic charge stripes with an external magnetic field are found.

**Keywords:** dodecaboride, antiferromagnet, spatial inhomogeneity, phase diagram, magnetoresistance, Hall effect, anisotropy