

## Особенности пиннинга волны зарядовой плотности в квазидвумерных соединениях

А. В. Фролов<sup>+</sup>, А. П. Орлов<sup>+\*</sup>, А. А. Синченко<sup>+×1)</sup>, П. Монсо<sup>°2)</sup>

<sup>+</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия

<sup>\*</sup>Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, 115487 Москва, Россия

<sup>×</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

<sup>°</sup>Universté Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut NEEL, 38042 Grenoble, France

Поступила в редакцию 23 ноября 2018 г.

После переработки 29 ноября 2018 г.

Принята к публикации 30 ноября 2018 г.

Исследованы эффекты коллективного движения (скольжения) волны зарядовой плотности в квазидвумерном проводнике TbTe<sub>3</sub> в широком интервале температур. Непосредственно после охлаждения до температур ниже температуры пайерлсовского перехода,  $T_{CDW} = 336$  К, пороговое поле инициации скольжения волны зарядовой плотности,  $E_t$ , демонстрирует зависимость от температуры, близкую к линейной. Экспозиция образцов при фиксированной температуре  $T_0 < T_{CDW}$  в течение нескольких часов приводила к существенной модификации эффекта скольжения волны зарядовой плотности. Пороговое поле значительно возрастало, а зависимость  $E_t(T)$  становилась немонотонной, демонстрируя сильный максимум при  $T = T_0$ . Наблюдаемый эффект связывается с формированием при экспозиции упорядоченной структуры (решетки) дефектов волны зарядовой плотности и с изменением режима пиннинга при ее плавлении.

DOI: 10.1134/S0370274X19030123

Коллективное движение (скольжение) волн зарядовой плотности является наиболее интересным свойством низкоразмерных соединений, обнаруживающих данный тип электронного упорядочения. Впервые предсказанное Фрелихом [1] как бездиссипативный электронный транспорт, данное скольжение оказалось возможным только при достижении электрическим полем конечного значения вследствие неидеальности реальных систем. Примеси, дефекты, межцепочечное взаимодействие или соизмеримость с основной решеткой фиксируют (пиннируют) фазу волны зарядовой плотности (ВЗП), и в малых электрических полях проводимость демонстрирует омическое поведение вследствие квазичастичных возбуждений. Чтобы преодолеть энергию пиннинга и инициировать скольжение ВЗП, необходимо приложить электрическое поле, превышающее некоторое характеристическое пороговое электрическое поле,  $E_t$ , определяемое пиннингом [2, 3]. Эффект скольжения ВЗП, проявляющийся в резком возрастании проводимости в полях  $E > E_t$ , ранее наблюдался и хорошо изучен во многих как неорганических,

так и в органических квази-одномерных соединениях [3].

В течение многих лет изучение возможности скольжения ВЗП в квазидвумерных соединениях было безуспешным. Лишь недавно данный эффект удалось наблюдать в квазидвумерных соединениях трителлуридов редкоземельных элементов RTe<sub>3</sub> (R: La, Ce, Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Er, Tm) [4, 5]. Эти слоистые соединения имеют слабую орторомбическую кристаллическую структуру (пространственная группа  $C_{mcm}$ ), и состоят из двойных плоскостей Te, разделенных гофрированными плоскостями RTe. В данной пространственной группе ось  $b$  перпендикулярна плоскостям Te. Все соединения данного семейства демонстрируют переход в состояние с несоизмеримой ВЗП с волновым вектором  $\mathbf{Q}_{CDW1} = (0, 0; \sim \frac{2}{7}c^*)$  при пайерлсовской температуре существенно выше 300 К для легких редкоземельных атомов (La, Ce, Nd). Для тяжелых R-элементов (Dy, Ho, Er, Tm) при низких температурах происходит второй ВЗП переход с волновым вектором  $\mathbf{Q}_{CDW2} = (\sim \frac{2}{7}a^*, 0, 0)$ , перпендикулярным  $\mathbf{Q}_{CDW1}$ . Резкость сверхструктурных максимумов в рентгеновской дифракции указывает на существование дальнего порядка трехмерного упорядочения [6].

<sup>1)</sup>e-mail: aasinch@mail.ru

<sup>2)</sup>P. Monceau.

Коллективный электронный транспорт в данных соединениях оказывается возможным только вдоль направления волнового вектора ВЗП. Обнаруживая все характерные признаки скольжения ВЗП, свойства данного транспорта имеют принципиальные отличия от свойств скольжения ВЗП в квазиодномерных соединениях. Прежде всего, это отсутствие предшествующего началу скольжения ВЗП крипа (движения ВЗП, обусловленного преодолением пиннинга из-за термических флуктуаций) [7]; независимый от температуры аномально малый вклад движения ВЗП в общий электронный транспорт, определяемый отношением  $\Delta R/R$  ( $\Delta R$  – относительное изменение сопротивления при скольжении,  $R$  – полное сопротивление), указывающий на очень низкую скорость ее движения в заданном электрическом поле, и линейная зависимость  $E_t(T)$  [5]. Отметим, что в квазиодномерных соединениях температурная зависимость порогового поля демонстрирует принципиально другое поведение: экспоненциальный рост при понижении температуры и расхождение при  $T \rightarrow T_{CDW}$  [8]. Данные результаты указывают на существование принципиального различия в механизмах скольжения, а значит и в механизмах пиннинга, в одномерных и в двумерных соединениях. В настоящей работе сообщается о наблюдении в соединении TbTe<sub>3</sub> еще одного нового эффекта в скольжении ВЗП, аналогичного пик-эффекту в сверхпроводниках [9], никогда не наблюдавшегося в квазиодномерных системах с ВЗП.

Соединение TbTe<sub>3</sub> демонстрирует переход в состояние с ВЗП при температуре существенно выше комнатной  $T_{CDW} = 336$  К [6]. Монокристаллы TbTe<sub>3</sub> выращивались в атмосфере чистого аргона по методике, описанной ранее [4]. Тонкие монокристаллические образцы прямоугольной формы и с толщиной менее 1 мкм были получены путем микромеханического утончения относительно толстых кристаллов, предварительно подклеенных на сапфировой подложке. Качество кристаллов и пространственная ориентация кристаллографических осей контролировалось рентгеновской дифракцией. Методом травления фокусированным ионным пучком из отобранных и утонченных кристаллов были приготовлены мостиковые структуры, ориентированные вдоль направления волнового вектора ВЗП, длиной 250 мкм и шириной 50–100 мкм [10]. Зависимости сопротивления и вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур измерялись четырехконтактным методом.

На рисунке 1 приведены дифференциальные вольт-амперные характеристики одного из мостиков, измеренные с шагом  $\Delta T = 10$  К в диапазоне

температур 180–330 К. Зависимости  $dV/dI(V)$  на рис. 1а соответствуют обычному режиму: образец

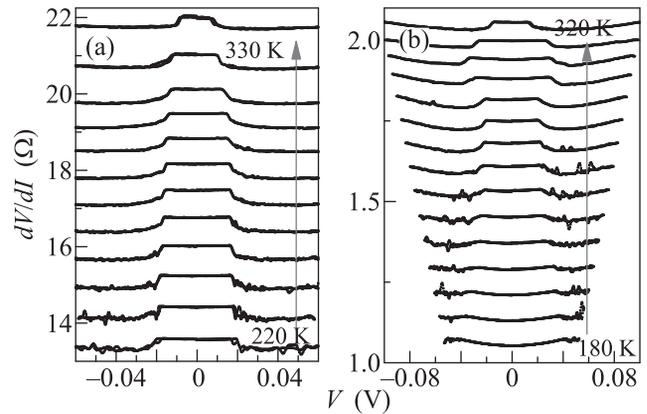


Рис. 1. (Цветной онлайн) Дифференциальные вольт-амперные характеристики,  $dV/dI(V)$ , микро-мостика на основе TbTe<sub>3</sub>, измеренные при различной температуре с шагом  $\Delta T = 10$  К: (а) – после охлаждения образца от  $T = 355$  К; (б) после длительной экспозиции при  $T_0 = 300$  К

нагревался до температуры, превышающей  $T_{CDW}$ , а именно, до  $T = 355$  К, после чего охлаждался до низких температур, и измерения ВАХ проводились при повышении температуры. Кривые на рис. 1b также измерялись при повышении температуры, но образец предварительно выдерживался в пайрлсовском состоянии при  $T_0 = 300$  К в течение 20 ч. Как видно, зависимости на рис. 1а находятся в согласии с известными результатами [5]: пороговое поле монотонно возрастает с понижением  $T$ , показывая линейную зависимость при  $T < 300$  К. Картина качественно меняется после экспозиции образца при  $T_0 = 300$  К. Пороговое поле существенно возрастает во всем диапазоне температур, исключая узкую область вблизи  $T_{CDW} = 336$  К. Зависимость  $E_t(T)$  становится немонотонной с сильным максимумом при  $T = T_0$ . Соответствующие температурные зависимости порогового напряжения,  $V_t(T)$ , приведены на рис. 2.

На рисунке 3 показаны температурные зависимости электросопротивления,  $R$ , для обоих режимов. Значения сопротивления получены из ВАХ, приведенных на рис. 1, при нулевом напряжении смещения. Видно, что экспозиция образца не изменяет его сопротивление в пределах погрешности эксперимента.

Характер изменения пороговых характеристик иллюстрирует рис. 4, на котором приведены дифференциальные ВАХ при  $T = 300$  К для обоих режимов. Из рисунка 4 видно, что, наряду с возрастанием

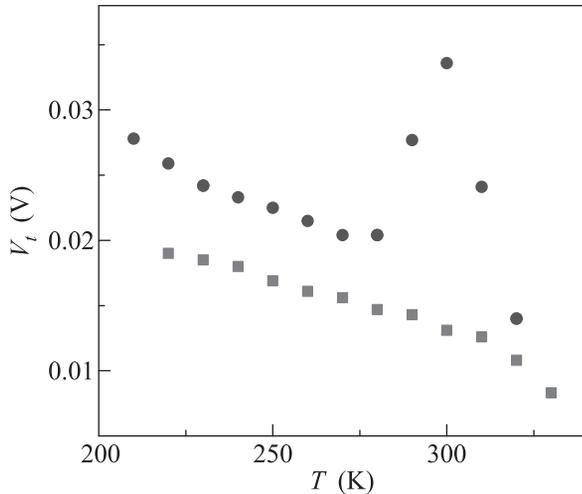


Рис. 2. (Цветной онлайн) Зависимости порогового напряжения инициации скольжения ВЗП для режимов, показанных на рис. 1а (красные квадраты) и рис. 1б (синие кружки)

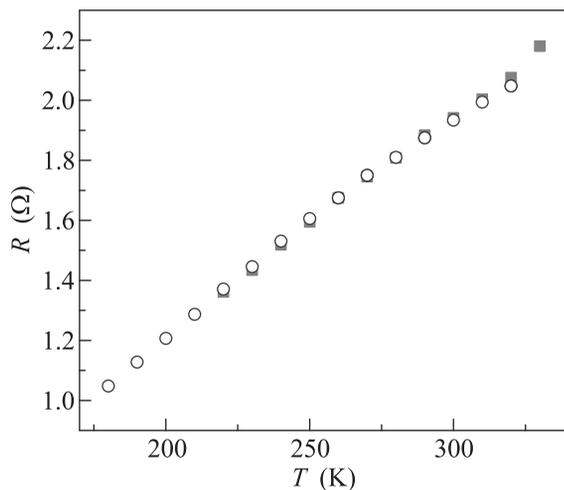


Рис. 3. (Цветной онлайн) Температурные зависимости электросопротивления для режимов, показанных на рис. 1а (красные квадраты) и рис. 1б (синие кружки)

более чем в три раза величины порогового поля, для экспонированного образца изменение сопротивления при достижении порога, определяющее вклад скольжения ВЗП в электронный транспорт, более чем в два раза меньше по сравнению с обычным режимом. Вклад коллективного движения ВЗП в общий транспортный ток определяется числом сконденсированных в это состояние носителей и скоростью движения ВЗП. В нашем случае число сконденсированных в ВЗП носителей, определяемое только температурой, одинаково для обоих режимов. Следовательно, скорость скольжения ВЗП, определяемая эффектами трения, для экспонированных образцов оказыва-

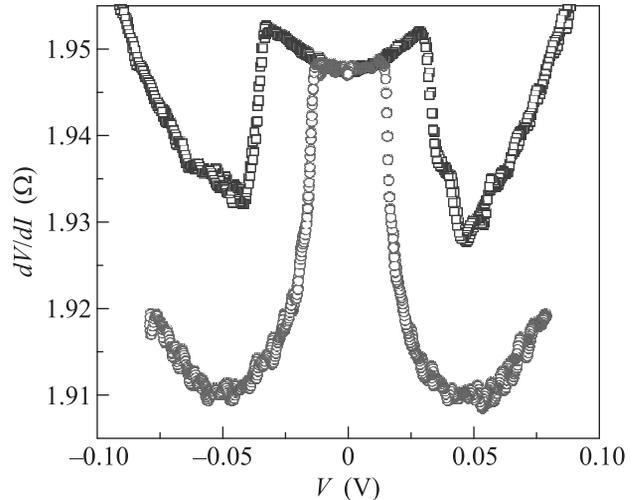


Рис. 4. (Цветной онлайн) Зависимости  $dV/dI(V)$ , микро-мостика на основе  $TbTe_3$  при температуре  $T = 300$  К для экспонированного  $T_0 = 300$  К (синие квадраты) и равновесного (красные кружки) образцов

ется существенно ниже по сравнению с обычным режимом.

Нагрев образца до температуры выше  $T_{CDW}$ , приводит к восстановлению прежних величин порогового поля. В этом случае характеристики, показанные на рис. 1а полностью воспроизводятся. Также воспроизводятся и характеристики на рис. 1б, если снова выдержать образец при фиксированной  $T_0$  в пайерлсовском состоянии в течении 20 ч. Отметим, что экспозиция образцов в течении большего времени не приводила к изменению его характеристик.

В настоящей работе приведены данные для значений температуры  $T_0 = 300$  К. Качественно аналогичный эффект наблюдался нами и для  $T_0 < 300$  К. При этом амплитуда максимума на зависимости  $E_t(T)$  монотонно уменьшается с понижением температуры  $T_0$ . Выяснение характера температурной и временной эволюции эффекта является предметом дальнейших исследований.

Таким образом, если пороговые характеристики образца измеряются непосредственно после перехода в состояние с ВЗП, пороговое поле демонстрирует известную линейную зависимость от температуры, назовем ее равновесной. Экспозиция образцов при фиксированной температуре  $T_0$  в пайерлсовском состоянии в течении 20 ч приводит к существенному возрастанию  $E_t$  при  $T < T_0$ , к появлению сильного максимума порогового поля при  $T = T_0$  и к стремлению  $E_t$  к равновесному значению при  $T > T_0$ .

Основным фактором, определяющим величину и поведение порогового поля ВЗП, является пиннинг

на дефектах. Соответственно, причиной наблюдаемого эффекта, наиболее вероятно, является изменение характера пиннинга со временем, которое в ходе изотермической экспозиции образца может быть обусловлено только перестройкой дефектной структуры. В случае существования температурной зависимости волнового вектора ВЗП можно было бы предположить реализацию “подстройки” дефектов структуры под ВЗП при экспозиции. Интуитивно, результатом такой подстройки будет усиление пиннинга именно при  $T = T_0$ , а при отклонении от данной температуры как в сторону увеличения, так и уменьшения  $T$ , в силу изменения волнового вектора ВЗП, ослабление пиннинга, что проявлялось бы на зависимости  $E(T)$  в появлении максимума при  $T = T_0$ . В данном сценарии дефекты, которые могут быть подверженными такой перестройке должны быть достаточно подвижными, но таких подвижных дефектов в соединениях  $R\text{Te}_3$  пока не наблюдалось. Кроме того, для того, чтобы взаимодействовать с ВЗП, данные дефекты должны быть заряжены. Но соединения класса  $R\text{Te}_3$  являются хорошими металлами, даже в пайерлсовском состоянии, с концентрацией носителей  $\sim 10^{23} \text{ см}^{-3}$ , и заряженные примеси, если таковые и есть, всегда экранированы. Наконец тот факт, что сопротивление образца не изменяется после экспонирования, указывает на то, что дефектами, ответственными за наблюдаемый эффект, являются дефекты именно подсистемы ВЗП, а не дефекты структуры соединения.

Обращает на себя внимание почти полная аналогия наблюдаемой температурной зависимости порогового поля экспонированных образцов с известной в сверхпроводимости зависимостью критического тока от магнитного поля или от температуры в магнитном поле, впервые обнаруженной в работе [9] и получившей название пик-эффекта. Критический ток в сверхпроводнике второго рода может значительно возрастать с ростом температуры или магнитного поля в узком диапазоне ниже верхнего критического магнитного поля  $B_{c2}(T)$ . Пик-эффект наблюдался как в традиционных [11–13], так и высокотемпературных сверхпроводниках [14, 15]. Объяснение данного эффекта основано на представлении о плавлении вихревой решетки Абрикосова, и связанным с этим изменением режима пиннинга от слабого коллективного к сильному индивидуальному [16, 17]. И пороговое поле в ВЗП, и критический ток в сверхпроводниках определяются пиннингом. Основываясь на аналогии с пик-эффектом в сверхпроводниках, можно ожидать реализацию аналогичного механизма и в двумерных ВЗП. В таком представлении наблюдае-

мый резкий максимум  $E_t(T)$  будет результатом плавления решетки дефектов ВЗП. Какова природа таких дефектов, в настоящий момент не ясно. Такими дефектами, возможно, являются дислокации ВЗП. В ходе длительной экспозиции они могут эволюционировать и, возможно, упорядочиваются, образуя своего рода решетку. Данный сценарий подразумевает наличие определенного взаимодействия между такими дефектами, характер которого, как и тип самих дефектов предстоит определить в ходе дальнейших исследований.

Авторы благодарны П.Д. Григорьеву и П. Кемери (P. Quemerais) за полезное обсуждение экспериментальных результатов и В.А. Шахуну за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант # 18-02-00295).

1. H. Fröhlich, Proc. Roy. Soc. A **223**, 296 (1954).
2. G. Gruner, *Density Waves in Solids*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1994).
3. P. Monceau, *Advances in Physics* **61**, 325 (2012).
4. A. A. Sinchenko, P. Lejay, and P. Monceau, *Phys. Rev. B* **85**, 241104(R) (2012).
5. A. A. Sinchenko, P. Lejay, O. Leynaud, and P. Monceau, *Solid State Commun.* **188**, 67 (2014).
6. N. Ru, C.L. Condrion, G.Y. Margulis, K.Y. Shin, J. Laverock, S.B. Dugdale, M.F. Toney, and I.R. Fisher, *Phys. Rev. B* **77**, 035114 (2008).
7. D. Le Bolloc'h, A. A. Sinchenko, V.L.R. Jacques, L. Ortega, J.E. Lorenzo, G. Chahine, P. Lejay, and P. Monceau, *Phys. Rev. B* **93**, 165124 (2016).
8. K. Maki, *Phys. Rev. B* **33**, 2852 (1986).
9. M. A. R. LeBlanc and W. A. Little, in *Proceedings of the VII International Conference on Low Temperature Physics*, University of Toronto Press, Toronto (1960), p. 198.
10. А.В. Фролов, А.П. Орлов, П.Д. Григорьев, В.Н. Зверев, А.А. Синченко, Р. Монсо, *Письма в ЖЭТФ* **107**, 507 (2018).
11. T. G. Berlincourt, R. R. Hake, and D. H. Leslie, *Phys. Rev. Lett.* **6**, 671 (1961).
12. P. H. Kes and C. C. Tsuei, *Phys. Rev. B* **28**, 5126 (1983).
13. A. C. Marley, M. J. Higgins, and S. Bhattacharya, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3029 (1995).
14. X. S. Ling and J. I. Budnick, in *Magnetic Susceptibility of Superconductors and Other Spin Systems*, ed. by R. A. Hein, T. L. Francavilla, and D. H. Liebenberg, Plenum Press, N.Y. (1991), p. 377.
15. W. K. Kwok, J. A. Fendrich, C. J. van der Beek, and G. W. Crabtree, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2614 (1994).
16. A. I. Larkin and Yu. N. Ovchinnikov, *J. Low Temp. Phys.* **34**, 409 (1979).
17. A. I. Larkin, M. C. Marchetti, and V. M. Vinokur, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2992 (1995).