

КВАНТОВЫЕ ПОПРАВКИ В ПЛЕНКАХ АРСЕНИДА КАДМИЯ

Т. Б. Никуличева, В. С. Захвалинский, О. Н. Иванов, Е. А. Пилюк, М. Н. Япрынцеv,
В. Ю. Новиков, М. Ю. Саенко, А. В. Борисенко

(Статья представлена членом редакционной коллегии С. В. Блажевичем)

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: nikulicheva@bsu.edu.ru

Аннотация. В данной работе мы представляем результаты исследования магнетотранспорта и квантовых поправок в пленке Cd_3As_2 толщиной 50 нм, напыленной на подложку из титаната стронция. Анализ результатов магнетопроводимости выявил наличие слабой антилокализации, возникающей из-за поверхностных состояний. Слабая антилокализация чувствительна только к перпендикулярной составляющей магнитного поля и хорошо описывается моделью Хиками, Ларкина и Нагаока. Расчетное значение длины фазовой когерентности $L\phi$ изменяется в зависимости от температуры T , демонстрируя наличие 2D-состояний поверхности. При температурах $T \geq 100$ К наблюдается переход от полуметалла Вейля к полуметаллу Дирака.

Ключевые слова: арсенид кадмия, тонкие пленки, квантовые поправки, антилокализация, магнетопроводимость.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00152).

Для цитирования: Никуличева Т. Б., Захвалинский В. С., Иванов О. Н., Пилюк Е. А., Япрынцеv М. Н., Новиков В. Ю., Саенко М. Ю., Борисенко А. В. 2021. Квантовые поправки в пленках арсенида кадмия. Прикладная математика & Физика. 53(1): 46–52. DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-1-46-52.

QUANTUM CORRECTIONS IN CADMIUM ARSENIDE FILMS

T. Nikulicheva, V. Zakhvalinskii, O. Ivanov, E. Pilyuk, M. Yapryntsev,
V. Novikov, M. Saenko, A. Borisenko

(Article submitted by a member of the editorial board S. V. Blazhevich)

Belgorod National Research University,
Belgorod, 308015, Russia

E-mail: nikulicheva@bsu.edu.ru

Received March, 01, 2020

Abstract. In this paper, we present the results of a study of magnetotransport and quantum corrections in a 50 nm thick Cd_3As_2 film deposited on a strontium titanate substrate. An analysis of the results of the magnetic conductivity revealed the presence of a weak antilocalization arising from surface states. Weak antilocalization is sensitive only to the perpendicular component of the magnetic field and is well described by the model of Hikami, Larkin, and Nagaoka. The calculated value of the phase coherence length $L\phi$ varies with temperature T , demonstrating the presence of 2D states of the surface. At temperatures $T \geq 100$ K, a transition is observed from the Weyl semimetal to the Dirac semimetal.

Key words: cadmium arsenide, thin films, quantum corrections, antilocalization, magnetic conductivity.

Acknowledgements: The study is supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-79-00152).

For citation: Nikulicheva T. B., Zakhvalinskii V. S., Ivanov O. N., Pilyuk E. A., Yapryntsev M. N., Novikov V. Yu., Saenko M. Yu., Borisenko A. V. 2021. Quantum corrections in cadmium arsenide films. Applied Mathematics & Physics. 53(1): 46–52 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-1-46-52.

1. Введение. В последнее время все больше внимания уделяется исследованию материалов на основе трехмерных топологических изоляторов, полуметаллов Вейля и тесно связанным с ними полуметаллам Дирака [5, 16, 18, 19]. Трехмерные топологические полуметаллы Дирака – это не только объемный аналог графена, они также демонстрируют нетривиальную топологию в своей электронной структуре, которая имеет сходство с топологическими изоляторами. Полуметаллы Вейля имеют четное число изолированных точек в объемной зоне Бриллюэна (узлы Вейля), в которых соприкасаются валентная зона и зона проводимости, образуя в ее окрестности состояния с линейной дисперсией и фиксированной взаимной ориентацией направлений импульса и спина (спиновая хиральность), кривизну Берри объемного спектра и уникальные поверхностные состояния. Восстановив инверсию, можно настроить

такую систему на фазу полуметалла Дирака, что приведет к двукратному хиральному вырождению электронных состояний (около узлов Дирака) [18, 2].

Квантовая интерференция является одним из экзотических эффектов, возникающих при наблюдении магнитных осцилляций в полуметаллах [16, 20], и возникает из-за интерференции электронных волновых пакетов, движущихся в магнитном поле в одном направлении вдоль незамкнутых орбит импульсного пространства, связанных магнетопробойными переходами. Квантовая интерференция выражается в появлении в спектре осцилляций Шубникова-де Гааза частот, для которых отсутствуют разрешенные орбиты, в спектре осцилляций де Гааза-ван Альфена такие частоты отсутствуют. В 3D образцах сечения поверхности Ферми, для которых выполняются все условия наблюдения квантовой интерференции, встречаются крайне редко [14, 23]. Однако, в низкоразмерных структурах исследования электрического переноса обнаруживают при низкой температуре несколько явлений, таких как квантовая интерференция, включая слабую локализацию (*англ.* weak localization, WL) или слабую антилокализацию (*англ.* weak antilocalization, WAL), и универсальные флуктуации проводимости [3, 24, 12]. Явление WAL всегда наблюдается в материалах Дирака, таких как топологические изоляторы и графен [12, 17, 6]. Эффект WAL также наблюдался в 3D полуметалле Дирака Cd_3As_2 [10, 11], 3D полуметалле Вейля TaAs [8] и $\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}$ [9]. Основная цель этой статьи - представить и обсудить результаты наличия слабой антилокализации, возникающей из-за поверхностных состояний при анализе магнетосопротивления тонкой пленки Cd_3As_2 .

2. Материалы и методика эксперимента. Тонкие пленки Cd_3As_2 были получены с использованием высокочастотного магнетронного распыления на вакуумном универсальном poste ВН-2000. В качестве подложки был использован SrTiO_3 <001> толщиной 0.5 мм, который предварительно был очищен сначала ультразвуком, затем с помощью ионного травления в Ar. Температура в процессе напыления оставалась равной 20°C . Мощность, подаваемая на магнетрон, составляла 10 Вт. Мишени, используемые для распыления, были изготовлены из предварительно синтезированных методом Бриджмена монокристаллов небольших размеров (менее 3 мм) Cd_3As_2 . Контроль качества материала мишени и тонких пленок Cd_3As_2 проводился с помощью рентгеновских методов на дифрактометре Rigaku SmartLab и рамановской спектроскопии на LabRam HR Evolution. Полученные нами кристаллы Cd_3As_2 имели тетрагональную решетку с пространственной группой I_{41cd} , $a = 12.6345 \text{ \AA}$, $c = 25.4304 \text{ \AA}$ (рисунок 1), что соответствует α фазе Cd_3As_2 . Пленки Cd_3As_2 характеризовались размытой дифракционной картиной, типичной для аморфных материалов, с широкими максимумами типа «гало».

По результатам спектроскопии комбинационного рассеяния (рисунок 2) можно видеть характерные для пленок и наноструктур Cd_3As_2 [15, 4] пики при 193 и 246 см^{-1} (симметрия $B_{1g} + B_{2g}$), а также пик при 303 см^{-1} (A_{1g}), наличие которого может быть объяснено в рамках трехзонной модели [21]. В отличие от рамановского спектра, полученного для кристаллической мишени Cd_3As_2 , пики в спектрах для пленок имеют большую ширину, что также свидетельствует о меньшей степени кристалличности. Толщина пленок Cd_3As_2 определялась на сколе при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Nova NanoSem 450 и составляла около 50 нм (рисунок 3). По результатам энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии состав всех полученных пленок Cd_3As_2 был стехиометрическим и однородным по поверхности, соотношение $\text{Cd}/\text{As} = 1.5$.

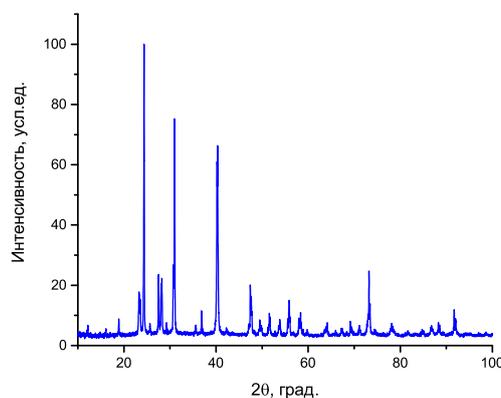


Рис. 1. Дифрактограмма кристаллов Cd_3As_2
Fig. 1. Diffraction pattern of Cd_3As_2 crystals

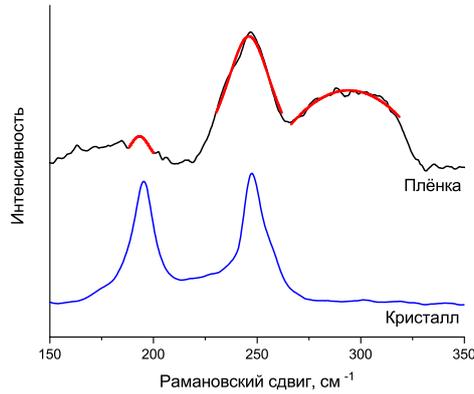


Рис. 2. Рамановский спектр пленки Cd_3As_2 и материала мишени
Fig. 2. Raman spectrum of Cd_3As_2 film and target material

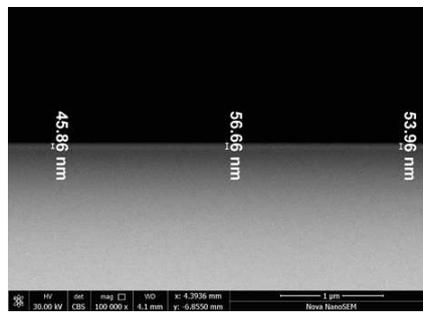


Рис. 3. Поперечное СЭМ-изображение пленки Cd_3As_2 на подложке SrTiO_3
Fig. 3. Cross-sectional SEM image of Cd_3As_2 film on a SrTiO_3 substrate

Измерения электрофизических свойств пленок Cd_3As_2 проводили по стандартной шеститочечной схеме на установке Mini Cryogen Free Systems в диапазоне температур 3–300 К и полях до 5 Тл. Контактные площадки получали магнетронным напылением индия. Крепление медных проводов осуществлялось механически с помощью индия.

3. Результаты и обсуждение. Пленка может рассматриваться как 2D-система, если ее толщина l меньше, чем длина свободного пробега электрона $l_e = \frac{\hbar\sqrt{2\pi n_e\mu}}{e}$, где \hbar – постоянная Планка, n_e – холловская концентрация носителей заряда, μ – подвижность носителей. Для наблюдения эффектов квантовой интерференции соответствующей шкалой длины является длина фазовой когерентности L_ϕ . Условие $L_\phi \approx l$, которое наблюдается в пленке Cd_3As_2 в диапазоне температур от 3 К до 80 К (на основе анализа, приведенного ниже и на рисунке 4), может указывать на WL, электрон-электронное взаимодействие и на поведение, характерное для полуметалла Вейля [13]. С увеличением температуры, в диапазоне от 100 К до 180 К, $L_\phi < l$, т.е. Cd_3As_2 начинает вести себя как дираковский полуметалл.

В 2D системах с приложенным перпендикулярным магнитным полем B_\perp Хиками, Ларкин и Нагаока впервые описали наличие спин-орбитальной связи для зависящей от температуры поправки WAL к проводимости [7]. Формула поправки может быть записана как:

$$\Delta\sigma_\perp(B) \approx \alpha \frac{-e^2}{2\pi^2\hbar} \left[\Psi(0.5 + B_\phi/B) - \ln(B_\phi/B) \right] + cB^2, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma_\perp(B) = \sigma(B) - \sigma(0)$ – магнетопроводимость, $\sigma = \frac{L}{W \cdot R_{xx}(B)}$ – электропроводность, L и W – длина и ширина образца, соответственно, $R_{xx}(B)$ – сопротивление в магнитном поле $B \perp E$, $\Psi(x)$ – дигамма функция, $B_\phi = \frac{\hbar}{4eL_\phi^2}$ – характеристическое поле, L_ϕ – длина фазовой когерентности. Теоретическое значение параметра α должно составлять -0.5 и -1 для WAL и WL, соответственно.

На рисунке 4 показана магнетопроводимость пленки Cd_3As_2 при различных температурах.

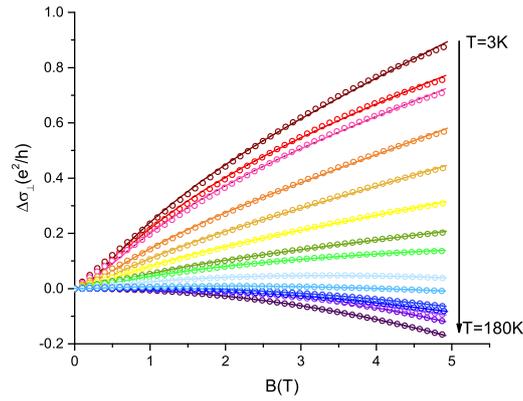


Рис. 4. Магнитопроводимость образца Cd_3As_2 (кружки) в зависимости от магнитного поля в $B \perp E$ при температуре от 3 до 180 К и теоретические данные (сплошные кривые), рассчитанные из (1)
 Fig. 4. The magnetoconductivity of sample Cd_3As_2 (hole circle) vs magnetic field in $B \perp E$ at temperature from 3 K to 180 K along with fitting (solid curves) to the Equation 1

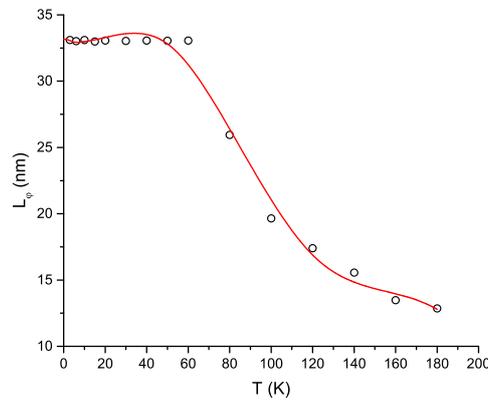


Рис. 5. Зависимость длины фазовой когерентности (кружки) от температуры
 Fig. 5. The dephasing length (hole circle) vs temperature

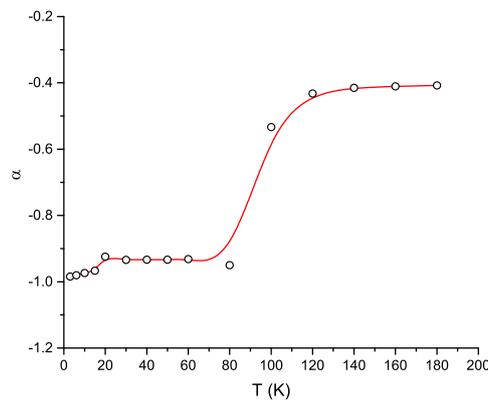


Рис. 6. Зависимость параметра α (кружки) от температуры
 Fig. 6. The parameter α (hole circle) vs temperature

На рисунке 5 показана температурная зависимость длины фазовой когерентности L_ϕ . В диапазоне температур от 3 К до 80 К длина фазовой когерентности оставалась практически неизменной и составляла $L_\phi \approx 35$ нм. Полученные результаты позволяют предположить, что в диапазоне температур от 3 К до 80 К должен быть WL, а в диапазоне от 100 К до 180 К – WAL, соответственно. Параметр α отражает количество независимых каналов проводимости в пленке. Однако, для безмассовых дираковских фермионов в

трехмерных топологических изоляторах WAL ($\alpha = -0.5$) всегда существует для каждого значения спин-орбитального рассеяния [1]. На рисунке 6 показана температурная зависимость параметра α . В работе [22] отмечается, что в пленках Cd_3As_2 могут сосуществовать друг с другом несколько независимых каналов проводимости с разной силой спин-орбитального рассеяния, что приводит к $\alpha < -0.5$.

4. Заключение. Мы исследовали магнетопроводимость тонких пленок Cd_3As_2 . Обнаружено, что в тонких пленках механизмы спин-орбитального рассеяния играют важную роль в определении того, испытывает ли система слабую локализацию (WL) или слабую антилокализацию (WAL), что сильно влияет на зависимость квантовых поправок (длина фазовой когерентности L_ϕ , параметр α) от температуры, которые рассчитываются в рамках модели Хиками, Ларкина и Нагаока. Обнаружено, что в диапазоне температур до 80 К наблюдается эффект слабой локализации, а в диапазоне от 100 К до 180 К – слабой антилокализации.

Список литературы

1. Adroguer P., Liu W. E., Culcer D., Hankiewicz E. M. 2015. Conductivity corrections for topological insulators with spin-orbit impurities: Hikami-Larkin-Nagaoka formula revisited. *Phys. Rev. B*, 92: 241402.
2. Armitage N.P., Mele E.J., Vishwanath A. 2018. Weyl and Dirac semimetals in three-dimensional solids. *Rev. Mod. Phys.*, 90: 015001.
3. Beenakker C. W. J. van Houten H. 1988. Boundary scattering and weak localization of electrons in a magnetic field. *Phys. Rev. B*, 38: 3232.
4. Cheng P., Zhang C., et al. 2016. Thickness-dependent quantum. Thickness-dependent quantum oscillations in Cd_3As_2 thin films. *New J. Phys.*, 18: 083003.
5. Hasan M. Z., Kane C. L. 2010. Colloquium: Topological insulators. *Rev. Mod. Phys.*, 82(4) : 3045–3067.
6. He H.-T. et al. 2011. Impurity Effect on Weak Antilocalization in the Topological Insulator Bi_2Te_3 . *Phys. Rev. Letts.*, 106: 166805.
7. Hikami S., Larkin A. I., Nagaoka Y. 1980. Spin-Orbit Interaction and Magnetoresistance in the Two Dimensional Random System. *Prog. Theor. Phys.*, 63: 707.
8. Huang X. et al. 2015. Observation of the Chiral-Anomaly-Induced Negative Magnetoresistance in 3D Weyl Semimetal TaAs. *Phys. Rev. X*, 5: 031023.
9. Kim H.-J. et al. 2013. Dirac versus Weyl Fermions in Topological Insulators: Adler-Bell-Jackiw Anomaly in Transport Phenomena. *Phys. Rev. Letts.*, 111: 246603.
10. Li H. et al. 2016. Negative Magnetoresistance in Dirac Semimetal Cd_3As_2 . *Nat. Commun.*, 7: 10301.
11. Liu Y. et al. 2015. Gate-tunable quantum oscillations in ambipolar Cd_3As_2 thin films. *NPG Asia Mater.*, 7: e221.
12. Lu H.-Z., Shen S.-Q. 2011. Weak localization of bulk channels in topological insulator thin films. *Phys. Rev. B*, 84: 125138.
13. Lu H.-Z., Shen S.-Q. 2014. Finite-Temperature Conductivity and Magnetoconductivity of Topological Insulators. *Phys. Rev. Letts.*, 112: 146601.
14. Potter A. C., Kimchi I., Vishwanath A. 2014. Quantum oscillations from surface Fermi arcs in Weyl and Dirac semimetals. *Nat. Commun.*, 5: 5161.
15. Suslov A. V., Davydov A. B., et al. 2019. Observation of subkelvin superconductivity in Cd_3As_2 thin films. *Phys. Rev. B*, 99: 094512.
16. Qi X.-L., Zhang S.-C. 2011. Topological insulators and superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, 83(4) : 1057–1110.
17. Wang H. et al. 2014. Crossover between weak antilocalization and weak localization of bulk states in ultrathin Bi_2Se_3 films. *Sci. Rep.*, 4: 5817.
18. Wang S. et al. 2017. Quantum transport in Dirac and Weyl semimetals: a review. *Advances in Physics: X*, 2(3): 518--544.
19. Wang Z. et al. 2012. Dirac semimetal and topological phase transitions in A_3Bi ($\text{A} = \text{Na}, \text{K}, \text{Rb}$). *Physical Review B*, 85(19).

20. Wang Z. et al. 2013. Three-dimensional Dirac semimetal and quantum transport in Cd_3As_2 . *Phys. Rev. B*, 88: 125427.
21. Weszka J., Renucci M., Zwick A. 1986. Some aspects of raman scattering in Cd_3As_2 single crystals. *physica status solidi (b)*, 133.(1): 57–64.
22. Zhao B., et al. 2016. Weak antilocalization in Cd_3As_2 thin films. *Scientific Reports*, 6: 1.
23. Zhao Y. et al. 2015. Anisotropic Fermi Surface and Quantum Limit Transport in High Mobility Three-Dimensional Dirac Semimetal Cd_3As_2 . *Phys. Rev. X*, 5: 031037.
24. Zyuzin A. A., Hook M. D., Burkov A. A. 2011. Parallel magnetic field driven quantum phase transition in a thin topological insulator film. *Phys. Rev. B*, 83: 245428.

References

1. Adroguer P., Liu W. E., Culcer D., Hankiewicz E. M. 2015. Conductivity corrections for topological insulators with spin-orbit impurities: Hikami-Larkin-Nagaoka formula revisited. *Phys. Rev. B*, 92 : 241402.
2. Armitage N. P., Mele E. J., Vishwanath A. 2018. Weyl and Dirac semimetals in three-dimensional solids. *Rev. Mod. Phys.*, 90: 015001.
3. Beenakker C. W. J. van Houten H. 1988. Boundary scattering and weak localization of electrons in a magnetic field. *Phys. Rev. B*, 38: 3232.
4. Cheng P., Zhang C., et al. 2016. Thickness-dependent quantum. Thickness-dependent quantum oscillations in Cd_3As_2 thin films. *New J. Phys.*, 18: 083003.
5. Hasan M. Z., Kane C. L. 2010. Colloquium: Topological insulators. *Rev. Mod. Phys.*, 82(4) : 3045–3067.
6. He H.-T. et al. 2011. Impurity Effect on Weak Antilocalization in the Topological Insulator Bi_2Te_3 . *Phys. Rev. Letts.*, 106: 166805.
7. Hikami S., Larkin A. I., Nagaoka Y. 1980. Spin-Orbit Interaction and Magnetoresistance in the Two Dimensional Random System. *Prog. Theor. Phys.*, 63: 707.
8. Huang X. et al. 2015. Observation of the Chiral-Anomaly-Induced Negative Magnetoresistance in 3D Weyl Semimetal TaAs. *Phys. Rev. X*, 5: 031023 .
9. Kim H.-J. et al. 2013. Dirac versus Weyl Fermions in Topological Insulators: Adler-Bell-Jackiw Anomaly in Transport Phenomena. *Phys. Rev. Letts.*, 111: 246603.
10. Li H. et al. 2016. Negative Magnetoresistance in Dirac Semimetal Cd_3As_2 . *Nat. Commun.*, 7 : 10301.
11. Liu Y. et al. 2015. Gate-tunable quantum oscillations in ambipolar Cd_3As_2 thin films. *NPG Asia Mater.*, 7: e221.
12. Lu H.-Z., Shen S.-Q. 2011. Weak localization of bulk channels in topological insulator thin films. *Phys. Rev. B*, 84: 125138.
13. Lu H.-Z., Shen S.-Q. 2014. Finite-Temperature Conductivity and Magnetoconductivity of Topological Insulators. *Phys. Rev. Letts.*, 112: 146601.
14. Potter A. C., Kimchi I., Vishwanat, A. 2014. Quantum oscillations from surface Fermi arcs in Weyl and Dirac semimetals. *Nat. Commun.*, 5: 5161.
15. Suslov A. V., Davydov A. B., et al. 2019. Observation of subkelvin superconductivity in Cd_3As_2 thin films. *Phys. Rev. B*, 99: 094512.
16. Qi X.-L., Zhang S.-C. 2011. Topological insulators and superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, 83(4): 1057–1110.
17. Wang H. et al. 2014. Crossover between weak antilocalization and weak localization of bulk states in ultrathin Bi_2Se_3 films. *Sci. Rep.*, 4: 5817.
18. Wang S. et al. 2017. Quantum transport in Dirac and Weyl semimetals: a review. *Advances in Physics: X*, 2(3): 518–544.
19. Wang Z. et al. 2012. Dirac semimetal and topological phase transitions in A_3Bi ($\text{A} = \text{Na}, \text{K}, \text{Rb}$). *Physical Review B*, 85(19).

20. Wang Z. et al. 2013. Three-dimensional Dirac semimetal and quantum transport in Cd_3As_2 . Phys. Rev. B, 88: 125427.
21. Weszka J., Renucci M., Zwick A. 1986. Some aspects of raman scattering in Cd_3As_2 single crystals. physica status solidi (b), 133.(1): 57–64.
22. Zhao B., et al. 2016. Weak antilocalization in Cd_3As_2 thin films. Scientific Reports, 6: 1.
23. Zhao Y. et al. 2015. Anisotropic Fermi Surface and Quantum Limit Transport in High Mobility Three-Dimensional Dirac Semimetal Cd_3As_2 . Phys. Rev. X, 5: 031037.
24. Zyuzin A. A., Hook M. D., Burkov A. A. 2011. Parallel magnetic field driven quantum phase transition in a thin topological insulator film. Phys. Rev. B, 83: 245428.

Получена 01.03.2021

Никulichева Татьяна Борисовна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и компьютерного моделирования института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета

 <http://orcid.org/0000-0001-6661-3959>

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: nikulicheva@bsu.edu.ru

Захвалинский Василий Сергеевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета

 <http://orcid.org/0000-0001-7055-8243>

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: zakhvalinskii@bsu.edu.ru

Иванов Олег Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: ivanov.oleg@bsu.edu.ru

Пилюк Евгений Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета

 <http://orcid.org/0000-0003-4979-5724>

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: pilyuk@bsu.edu.ru

Япрынцева Максим Николаевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ»

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: yaprintsev@bsu.edu.ru

Новиков Всеслав Юрьевич – кандидат технических наук, инженер Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ»

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: novikov_v@bsu.edu.ru

Саенко Михаил Юрьевич – аспирант первого года обучения кафедры материаловедения и нанотехнологий института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: saenkomik@gmail.com

Борисенко Александр Васильевич – аспирант первого года обучения кафедры теоретической и экспериментальной физики института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

E-mail: 1491654@bsu.edu.ru