

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.8>

УДК: 539.21

ОСОБЕННОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДОГО РАСТВОРА $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$

В.С. Захвалинский ¹, Т.Б. Никуличева ¹, А.В. Маширов ⁴, Б.А. Аронзон ², А.Б. Мехия ²,
А.Б. Давыдов ², Зиармал Мавла Хан ¹, К.С. Сохань ¹, В.Б. Никуличев ³

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
308015, Белгород, ул. Победы, д. 85

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991, Москва, Ленинский проспект, д.53

³ Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова,
308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46

⁴ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр.7

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2026 г.

Аннотация. Модифицированным методом Бриджмена получены монокристаллы твердого раствора $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ ($x + y = 0.4$; $y = 0.04$) полуметалла Дирака Cd_3As_2 . Все экспериментальные образцы $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ имели при комнатной температуре тетрагональную кристаллическую структуру ($\alpha''\text{-Cd}_3\text{As}_2$), пространственную группу $P4_2/nmc$. Измерены осцилляции Шубникова - де Гааза при температуре 4.5 К и 8 К в магнитных полях до 3 Тл. Для исследованных монокристаллов $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$, с помощью отношения Лифшица-Онзагера [1, 2] и определения основных частот из анализа Фурье были определены 3D и 2D параметры. Установлено сохранение величины волнового вектора $k_F = 0.1 \text{ нм}^{-1}$ при отличии циклотронных масс $m_c(0)/m_0$ носителей заряда в разных монокристаллах $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ одного состава ($x + y = 0.4$; $y = 0.04$),

эта особенность демонстрирует сохранение топологических свойств при изменении циклотронной массы $m_c(0)/m_0$.

Ключевые слова: эффект Шубникова - де Гааза, фермионы Дирака, арсенид кадмия, Дираковские/Вейлевские полуметаллы.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 25-42-10022, тема проекта «Спин-поляризованные структуры в системах полупроводник, Дираковский полуметалл- ферромагнетик в качестве новых эффективных компонентов микро-нано- магнито- и оптоэлектроники».

Автор для переписки: Захвалинский Василий Сергеевич,

zakhvalinskii@bsuedu.ru

Введение

Среди Дираковских и Вейлевских топологических полуметаллов (*TDSs* и *TWSs*) полупроводник Cd_3As_2 считается идеальным из-за его химической стабильности на воздухе и сверхвысокой подвижности. Cd_3As_2 рассматривается как перспективный материал для поиска новых топологических фаз [3-6]. Наличие топологических поверхностных состояний в Cd_3As_2 подтверждается экспериментально с помощью фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР) [7-9]. Интерес исследователей привлекают нетривиальные 3D и 2D топологические характеристики электронных состояний [10-12]. Электронные состояния Cd_3As_2 защищены топологией k -пространства, примеси Zn и Mn могут привести к нарушению T - или P -симметрии (симметрии по отношению к обращению времени и инверсии координат, соответственно), к снятию исходного вырождения дираковских точек и перевести систему в состояние вейлевского полуметалла [13]. Существование широких областей тройных и четверных твердых растворов $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$, $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$, $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ [14,15] в настоящее время привлекает к себе значительный интерес в связи с возможностью исследовать эволюцию свойств Cd_3As_2 от дираковского полуметалла до тривиального

полупроводника, это важно как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения потенциальных практических приложений. Исследовательские группы заняты поиском путей практического применения фаз, возникающих под влиянием нарушения кристаллической симметрии и топологических фазовых переходов, вызванных введением магнитных и немагнитных примесей в монокристаллах и тонких пленках Cd_3As_2 . Будущему применению в нанoeлектронике Дираковских 1D и 2D наноразмерных монокристаллов полуметаллов посвящена работа [16]. Возможность практического применения терагерцового излучения рассматривается в [17]. В 2017 году опубликованы результаты испытания прототипа (метал – Cd_3As_2 – метал) ультрабыстрого фотодетектора [18]. Возможности создания сверхбыстродействующей электроники и терагерцовой спинтроники рассмотрены в [19]. Практическое применение дираковских/вейлевских полуметаллов, в том числе Cd_3As_2 , подвергнутых легированию или понижению размерности (пленки, квантовые нити, квантовые точки), приборные гетероструктуры рассматриваются в обзорах [10,20].

Структурные, оптические и электрические свойства исследовались в экспериментальных работах [21,22], где изменение содержания Zn в монокристаллах тройных твердых растворов $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ вызывало фазовые переходы от 3D ДП до тривиального *полупроводника* и обусловило интерес к разработке технологий получения сверхбыстродействующих устройств на основе $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ [23]. Транспортные свойства монокристаллов четверных [24,25] и тройных [26,27] твердых растворов арсенида кадмия $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ были исследованы ранее в этих работах сообщалось о наличии в этих твердых растворах дираковских безмассовых фермионов и линейной дисперсии зависимости приведенной циклотронной массы m_c/m_0 от фермиевского волнового вектора k_F . Аналогичные зависимости наблюдались в других топологических материалах с безмассовыми дираковскими фермионами [28-30]. В настоящей работе представлены результаты исследования магнитотранспортных свойств (осцилляций Шубникова-де Гааза (ШдГ))

монокристалла твердого раствора $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$. Отмечены особенности, возникающие из сравнения наших результатов и результатов ранних исследований монокристаллов твердого раствора $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$.

1. Объекты исследования и методика эксперимента

Синтез монокристаллов твердого раствора $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ был проведен из стехиометрической смеси бинарных соединений Cd_3As_2 , Zn_3As_2 и Mn_3As_2 в вакуумированных и графитизированных кварцевых ампулах. Рост монокристаллов осуществлялся в графитизированной кварцевой ампуле с вакуумным чехлом модифицированным методом Бриджмена. графитизированной ампуле, которую выдерживали при температуре 1000°C в течении 4 часов с последующим медленным охлаждением от точки плавления (760°C) со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{час}$ в температурном градиенте печи. Микроструктура и состав поверхности кристалла на естественном сколе были изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа *JSM-6610LV* (Jeol, Япония) и энергодисперсионного рентгеновского спектрометра *X-MaxN* (Oxford Instruments, Англия) с точностью анализа элементного состава до 0.1 % ат. Распределение элементов по исследуемому участку скола было однородным, а реальный состав соответствовал исходной стехиометрии предварительно синтезированного из бинаров твердого раствора $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$. Порошковая дифрактограмма синтезированного кристалла (Рис. 1) была получена при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре *GBC EMMA*, излучение $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5401 \text{ \AA}$).

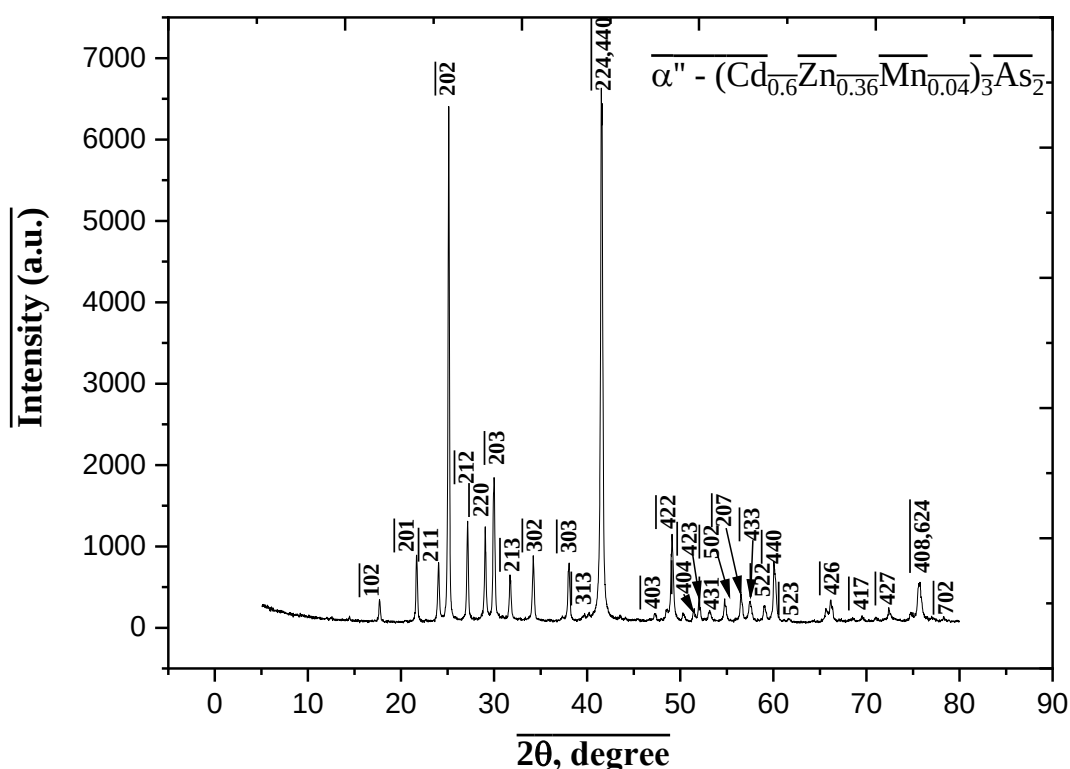


Рис. 1. Порошковая дифрактограмма образца $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ с идентификацией основных дифракционных пиков, α'' ($P4_2/nmc$, п.г. 137) [31,32].

Структура рис. 1 соответствует одной из тетрагональных полиморфных модификаций арсенида кадмия – α'' ($P4_2/nmc$, п.г. 137) [31,32], которая может стабилизироваться при комнатной температуре добавлением примесей или формированием твердых растворов на базе Cd_3As_2 [25,33,34]. Параметры кристаллической решетки исследуемого образца $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$: $a = 8.914 \text{ \AA}$; $c = 12.580 \text{ \AA}$.

Из неориентированного монокристалла $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ был вырезан образец в форме параллелепипеда. Грани образца были отполированы. Измерения электрических и транспортных свойств проводились по стандартной шестизондовой схеме крепления контактов. Электрические контакты измерительных зондов на образце созданы методом пайки. Сопротивление, эффект Холла и осцилляции поперечного магнетосопротивления образца исследовались по классической 6-зондовой схеме с помощью управляемого

источника тока CS580 и синхронных детекторов SR830 (Stanford Research Systems, США) на переменном токе (от 100 мкА до 1 мА с функцией “*True RMS*”) низкой частоты (от 7 до 300 Гц). Исследования были проведены в диапазоне температур от 4.5 до 10 К и в магнитных полях от 0 до 3 Тл. Конкретные параметры (величина и частота измерительного тока) подбирались исходя из шумовых параметров измерений и отсутствия перегрева образца. Отметим, что перегрев образца измерительным током в данной системе получить было достаточно сложно, так как сопротивление исследуемых образцов было низким (~ 2 Ом при температуре $T = 4.5$ К), а тепловой контакт образца с термостатом был очень хорошим (образец находился в 4-He).

2. Результаты эксперимента и обсуждение

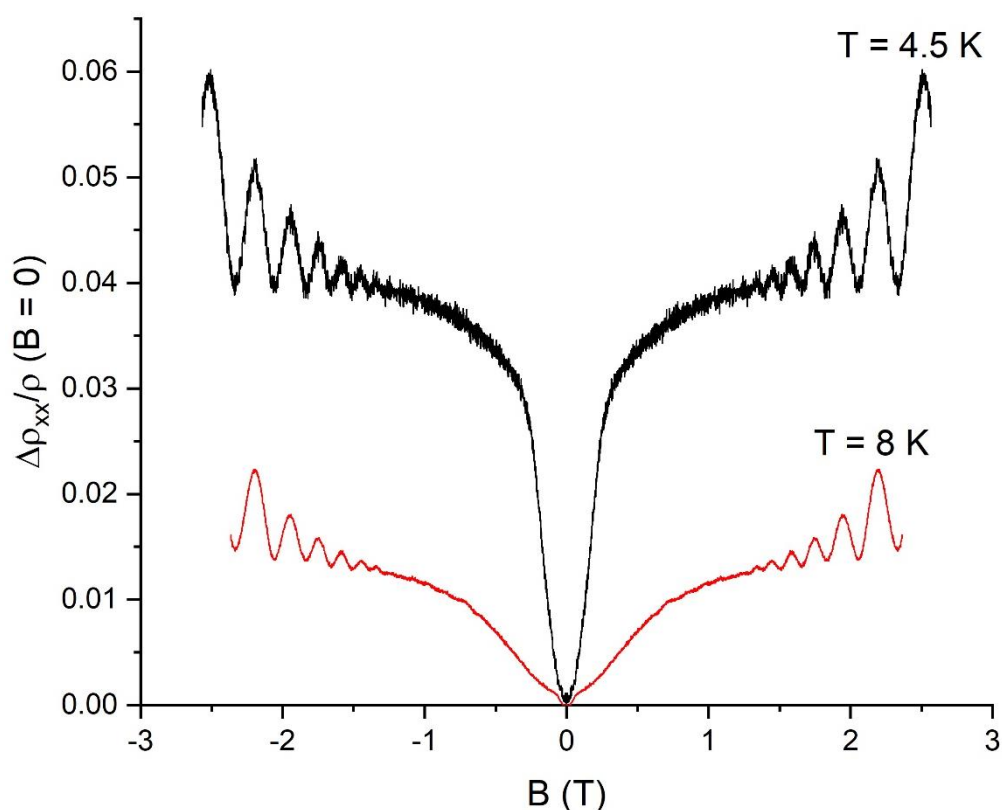


Рис. 2. ШДГ осцилляции монокристалла $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ при температурах $T = 4.5$ К и $T = 8$ К.

Результаты экспериментального наблюдения эффекта Шубникова-де Гааза (ШДГ) приведены на рис. 2.

В результате обработки результатов измерений были оценены: циклотронная масса $m_c(0)/m_0 = 0.028$, концентрация носителей $n_{\text{ШдГ}} = 1.37 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, подвижность носителей заряда, μ_{2D} , период ШдГ осцилляций, $P_{\text{ШдГ}} = 0.055 \text{ Тл}^{-1}$, и параметр $\alpha/m_0 \cdot 10^3 = 11 \text{ Тл}^{-1}$ (α величина в линейном законе (1)), температура Дингла $T_D = 12.7 \text{ К}$ (которая характеризует уширение уровней Ландау в результате рассеяния электронов дефектами решетки). Нами была обнаружена аномальная зависимость циклотронной массы от магнитного поля, которая подчиняется линейному закону:

$$m_c(B) = m_c(0) + \alpha B. \quad (1)$$

Аномальная зависимость циклотронной массы от магнитного поля для монокристалла $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ приведена на рисунке 3. Обычно в полупроводниках зависимость циклотронной массы $m_c(0)/m_0$ от магнитного поля не наблюдается.

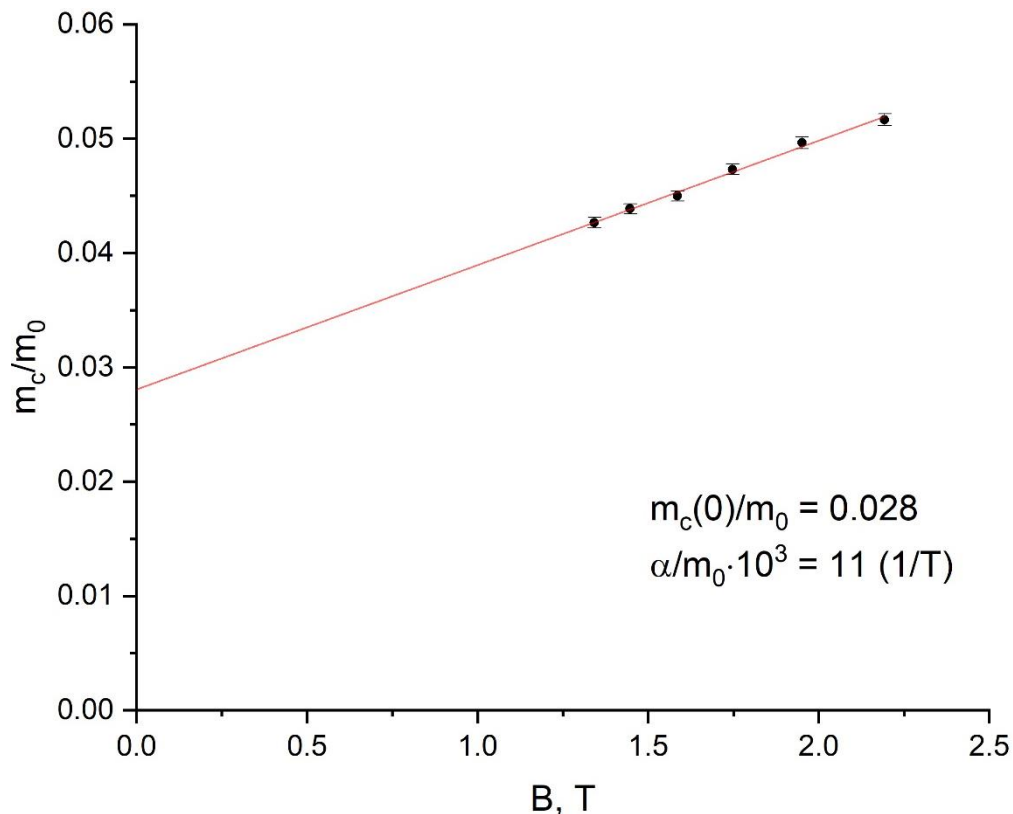


Рис. 3. Аномальная зависимость циклотронной массы от магнитного поля для монокристалла $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$.

Аномальная зависимость циклотронной массы $m_c(0)/m_0$ от магнитного поля ранее уже наблюдалось в твердых растворах $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$,

где экстраполированная в нулевое магнитное поле $B = 0$ Тл. величина $m_c(0)/m_0 = 0.0409$ [1,2] в отличии от величины $m_c(0)/m_0 = 0.028$ полученной в этой работе. Кроме того аномальная зависимость циклотронной массы $m_c(0)/m_0$ от магнитного поля ранее наблюдалась и в монокристаллах других составов твердых растворов $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_{1-y})_3\text{As}_2$ [35,36,27], в работе [37] наблюдалась аномальная зависимость величины $m_c(0)/m_0$ от магнитного поля при изменении величины гидростатического давления от 0 до 14 кбар. Концентрация носителей n_{2D} в 2D-поверхностном слое может быть рассчитана по осцилляциям ШдГ с помощью отношения Лифшица-Онзагера [1, 2]:

$$\left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{eB}{h} = N_0(\epsilon), \quad (2)$$

которое связывает $N_0(\epsilon)$ – интегральную плотность состояний в нулевом поле при энергии Ферми ϵ , с вырождением eB/h уровня Ландау, где $B > 0$ – модуль магнитного поля, и индексом Ландау n , который является целым числом.

Из анализа Фурье были выбраны основные частоты: 28.4 Тл и 32.4 Тл при температурах 4.5 К и 8 К, соответственно. Частота Фурье непосредственно связана с площадью поперечного сечения поверхности Ферми: $n_{2D} = 2eB_F/h$, где e – элементарный заряд электрона, h – постоянная Планка, B_F – частота ШдГ осцилляций. Результаты определения параметров показаны в таблице 1.

Таблица 1. 2D-параметры монокристалла $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$.

$T, \text{ K}$	$n_{2D} \cdot 10^{12}, \text{ см}^{-2}$	$d_{2D}, \text{ нм}$	$\mu_{2D} \cdot 10^4, \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$
4.5	1.37	10.0	0.73
8	1.56	11.4	0.67

Анализ осцилляций ШдГ с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) для образца монокристалла $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ представлен на рисунке 4.

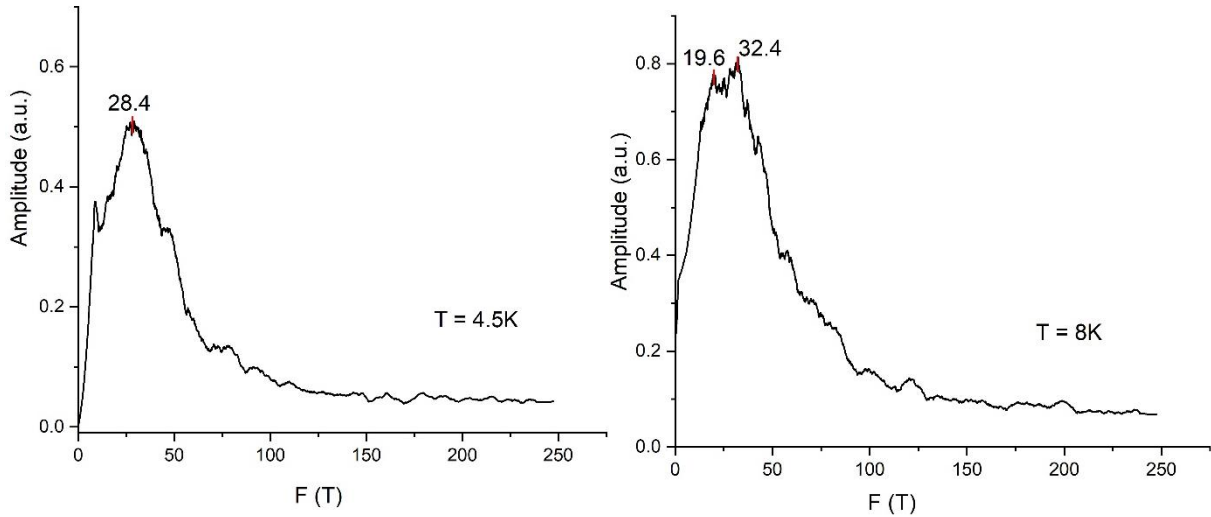


Рис. 4. Анализ осцилляций ШдГ с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) для образца монокристалла $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ при температурах $T = 4.5 \text{ K}$ и $T = 8 \text{ K}$.

Из анализа Фурье были выбраны основные частоты: $B_F = 28.4 \text{ Тл}$ и $B_F = 32.4 \text{ Тл}$, $B_F = 19.6 \text{ Тл}$ при температурах 4.5 K и 8 K , соответственно и построены линейные зависимости числа Ландау N от $B_F/B_{\max}$ (где $B_{\max}$ – это максимумы в ШдГ осцилляциях) (рис. 5). Известно, что в случае линейной дисперсии вблизи вырожденной точки Дирака в топологических материалах волновая функция электрона на циклотронной орбите приобретает фазу Берри, а в эффекте ШдГ когда имеет место полуклассическое описание магнитных осцилляций сопротивление осциллирует как $\Delta\rho \sim \cos[2\pi (H_F/H + 1/2 + \beta)]$, где $2\pi\beta$ – фаза Берри, а фазовый сдвиг β для фермионов Дирака равен 0.5 [38], но наблюдались отклонения, такие как $\beta \approx 0.45$ и 0.7 в топологических изоляторах $\text{Bi}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Se}_3$ [39].

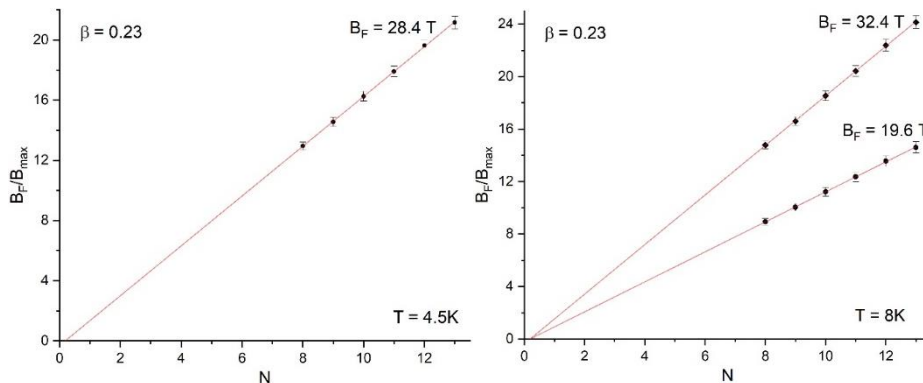


Рис. 5. Линейные зависимости числа Ландау N от $B_F/B_{\max}$ (где $B_{\max}$ – это максимумы в ШдГ осцилляциях), полученная из быстрого преобразования Фурье.

В соответствии с [40], рост концентрации марганца приводит к изменению транспортных свойств разбавленного магнитного полупроводника $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ ($x + y = 0.4$). Результаты исследования осцилляций ШдГ в образцах с $y = 0.04$ показали наличие фазового сдвига β фазы Берри ($\beta = 0.23$). Таким образом, образцы $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ демонстрируют аномальную зависимость циклотронной массы носителей заряда от магнитного поля ($\alpha/m_0 = 11 \text{ Тл}^{-1}$) и находятся в хорошем соответствии с теоретической линейной зависимостью, описывающей безмассовые дираковские фермионы (зависимость приведенной циклотронной массы $m_c(0)/m_0$ от волнового вектора Ферми k_F). Такой вид линейной зависимости наблюдался, например для Дираковских фермионов в графене [41,42]. Таким образом, нами показано наличие топологических свойств в разбавленном магнитном полупроводнике $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$. Особенностью топологических свойств твердого раствора $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ является сохранение величины волнового вектора Ферми $k_F = 0.1$ для различных значений циклотронной массы носителей заряда $m_c(0)/m_0 = 0.0409$ [24,40] и $m_c(0)/m_0 = 0.028$ полученное в нашей работе.

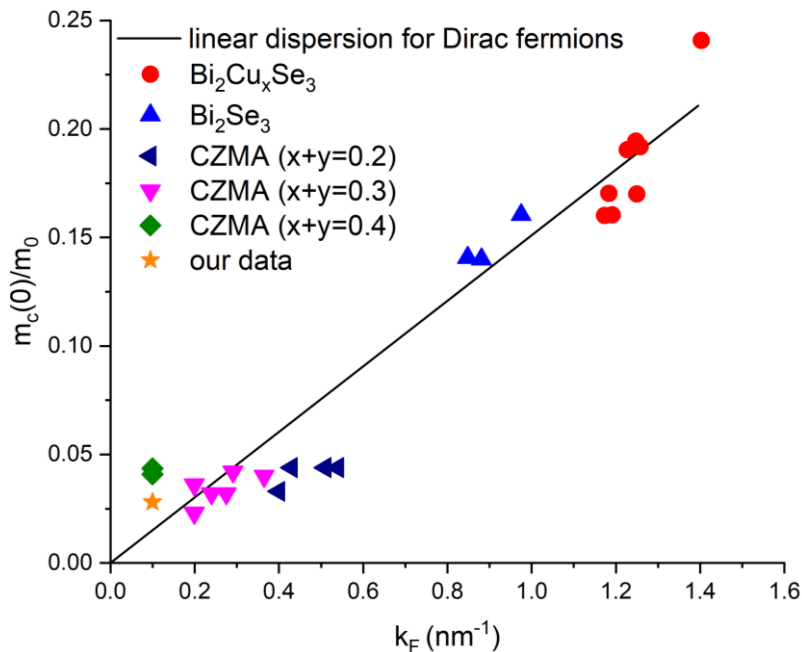


Рис. 6. Зависимость приведенной циклотронной массы $m_c(0)/m_0$, полученной из экспериментов на монокристаллах $\text{Bi}_2\text{Cu}_x\text{Se}_3$ [28,29,43], Bi_2Se_3 [23, 28], CZMA ($x+y = 0.2$) [25], CZMA ($x+y = 0.3$) [22], CZMA ($x+y = 0.4$) [24] и $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ (наши данные) от фермиевского волнового вектора k_F .

Заключение

Модифицированным методом Бриджмена получены монокристаллы твердого раствора $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ ($x + y = 0.4$; $y = 0.04$) полуметалла Дирака Cd_3As_2 . Все экспериментальные образцы $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ имели при комнатной температуре тетрагональную кристаллическую структуру ($\alpha''\text{-Cd}_3\text{As}_2$), пространственную группу $P4_2/nmc$. Из экспериментальных зависимостей ШдГ осцилляций рассчитаны 3D и 2D параметры монокристаллов $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$: период осцилляций $P_{\text{ШдГ}} = 0.055 \text{ Тл}^{-1}$, концентрация носителей $n_{\text{ШдГ}} = 1.37 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, циклотронная масса $m_c(0)/m_0 = 0.028$, параметр $\alpha/m_0 \cdot 10^3 = 11 \text{ Тл}^{-1}$ (из линейного закона $m_c(B) = m_c(0) + \alpha B$), температура Дингла $T_D = 12.7 \text{ К}$, волновой вектор $k_F = 0.1 \text{ нм}^{-1}$, длина волны де Бройля $\lambda_{\text{дБ}} = 6.6 \text{ нм}$, скорость на поверхности Ферми $v_F = 4.9 \cdot 10^6 \text{ м/с}$, длина свободного пробега $l_F = 89.1 \text{ нм}$, время релаксации $\tau = 1.8 \cdot 10^{-15} \text{ с}$, фазовый сдвиг $\beta = 0.23$. Наблюдалась аномальная зависимость циклотронной массы носителей заряда от магнитного поля ($\alpha/m_0 = 11 \text{ Тл}^{-1}$). Зависимость приведенной циклотронной массы $m_c(0)/m_0$ от фермиевского волнового вектора k_F находится в хорошем соответствии с теоретической линейной зависимостью, описывающей безмассовые дираковские фермионы (рис. 5) и подтверждает наличие в полученном на основе полуметалла Дирака Cd_3As_2 монокристалле твердого раствора $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ топологических свойств. Величина волнового вектора $k_F = 0.1 \text{ нм}^{-1}$ одинакова при отличии циклотронных масс $m_c(0)/m_0$ носителей заряда в разных монокристаллах $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ одного состава ($x + y = 0.4$; $y = 0.04$), эта особенность демонстрирует сохранение топологических свойств при изменении циклотронной массы $m_c(0)/m_0$.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 25-42-10022, тема проекта «Спин-поляризованные структуры в системах полупроводник, Дираковский

полуметалл- ферромагнетик в качестве новых эффективных компонентов микро-нано- магнито- и оптоэлектроники».

Литература

1. Landau L.D., Lifshitz E.M. Statistical physics: volume 5. – Elsevier, 2013. – Т. 5.
2. Onsager L. Interpretation of the de Haas-van Alphen effect // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1952. – Т. 43. – №. 344. – С. 1006-1008. <https://doi.org/10.1080/14786440908521019>
3. Borisenko S. et al. Experimental realization of a three-dimensional Dirac semimetal // Physical review letters. – 2014. – Т. 113. – №. 2. – С. 027603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.027603>
4. Wang Z. et al. Three dimensional Dirac semimetal and quantum transports in Cd_3As_2 // 2013 Phys. Rev. B. 88. 125427, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.125427>
5. Liu Z.K. et al. Discovery of a three-dimensional topological Dirac semimetal, Na_3Bi // Science. – 2014. – Т. 343. – №. 6173. – С. 864-867. <https://doi.org/10.1126/science.1245085>
6. Xu G. et al. Chern semimetal and the quantized anomalous Hall effect in HgCr_2Se_4 // Physical review letters. – 2011. – Т. 107. – №. 18. – С. 186806. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.186806>
7. Liang T. et al. Ultrahigh mobility and giant magnetoresistance in the Dirac semimetal Cd_3As_2 // Nature materials. – 2015. – Т. 14. – №. 3. – С. 280-284. <https://doi.org/10.1038/nmat4143>
8. Singh A. et al. Ultrahigh Carrier Mobility in Cd_3As_2 Nanowires // physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters. – 2023. – Т. 17. – №. 2. – С. 2200365. <https://doi.org/10.1002/pssr.202200365>
9. Rice A.D. et al. High mobility Cd_3As_2 (112) on GaAs (001) substrates grown via molecular beam epitaxy // ACS Applied Electronic Materials. – 2022. – Т. 4. – №. 2. – С. 729-734. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.1c01126>

10. Armitage N.P., Mele E.J., Vishwanath A. Weyl and Dirac semimetals in three-dimensional solids // *Reviews of Modern Physics*. – 2018. – Т. 90. – №. 1. – C. 015001. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.015001>
11. Yan B., Felser C. Topological materials: Weyl semimetals // *Annual Review of Condensed Matter Physics*. – 2017. – Т. 8. – C. 337-354. <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031016-025458>
12. Wang S. et al. Quantum transport in Dirac and Weyl semimetals: a review // *Advances in Physics: X*. – 2017. – Т. 2. – №. 3. – C. 518-544. <https://doi.org/10.1080/23746149.2017.1327329>
13. Wang Z. et al. Three dimensional Dirac semimetal and quantum transports in Cd₃As₂ // *Phys. Rev. B*, 88 (12), 125427 (2013). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.125427>
14. Lu H. et al. Topological phase transition in single crystals of (Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ // *Scientific reports*. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – C. 3148. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03559-2>
15. Arushanov E. et al. 3D Dirac semimetal Cd₃As₂-based solid solutions growth and characterization // *AIP Advances*. – 2025. – Т. 15. – №. 1. <https://doi.org/10.1063/5.0235231>
16. Zhang K. et al. Controllable synthesis and magnetotransport properties of Cd₃As₂ Dirac semimetal nanostructures // *RSC advances*. – 2017. – Т. 7. – №. 29. – C. 17689-17696. <https://doi.org/10.1039/c7ra02847d>
17. Lu W. et al. Ultrafast photothermoelectric effect in Dirac semimetallic Cd₃As₂ revealed by terahertz emission // *Nature Communications*. – 2022. – Т. 13. – №. 1. – C. 1623. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29168-w>
18. Wang Q. et al. Ultrafast broadband photodetectors based on three-dimensional Dirac semimetal Cd₃As₂ // *Nano letters*. – 2017. – Т. 17. – №. 2. – C. 834-841. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b04084>
19. Walowski J., Münzenberg M. Perspective: Ultrafast magnetism and THz spintronics // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – Т. 120. – №. 14. <https://doi.org/10.1063/1.4958846>

20. Gao H. et al. Topological semimetals from first principles // Annual Review of Materials Research. – 2019. – Т. 49. – №. 1. – С. 153-183.
<https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070218-010049>
21. Brooks C., Lany S. Heterostructural alloy phase diagram for $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ // Physical Review Materials. – 2024. – Т. 8. – №. 6. – С. L061201.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.8.L061201>
22. Zakhvalinskii V. et al. Two-Dimensional Surface Topological Nanolayers and Dirac Fermions in Single Crystals of the Diluted Magnetic Semiconductor $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ ($x+y = 0.3$) // Crystals. – 2020. – Т. 10. – №. 11. – С. 988. <https://doi.org/10.3390/cryst10110988>
23. Lahoud E. et al. Evolution of the Fermi surface of a doped topological insulator with carrier concentration // Physical Review B–Condensed Matter and Materials Physics. – 2013. – Т. 88. – №. 19. – С. 195107.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.195107>
24. Zakhvalinskii V.S. et al. Transport evidence of mass-less Dirac fermions in $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ ($x+y = 0.4$) // Materials Research Express. – 2020. – Т. 7. – №. 1.- P. 015918. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab688b>
25. Zakhvalinskii V.S. et al. Linear dispersion of Dirac fermions in $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$, $x+y = 0.2$, $y = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08$ solid solutions // Physica Scripta. – 2021. – Т. 96. – №. 12. – С. 125856.
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac3873>
26. Захвалинский В.С., Борисенко А.В., Маширов А.В., Кочура А.В., Соболев В.В. Топологические свойства монокристаллов твердого раствора $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$, $x = 0.093$ // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 4.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.14>
27. Захвалинский В.С., Борисенко А.В., Маширов А.В., Кочура А.В., Япрынцеv М.Н. Линейная дисперсия дираковских фермионов в монокристаллах твердого раствора $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ при $x = 0.29$, $y = 0.01$ // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.15>

28. Lawson B.J. et al. Quantum oscillations in $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ in high magnetic fields // Physical Review B. – 2014. – Т. 90. – №. 19. – С. 195141. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.195141>
29. Lawson B.J., Hor Y.S., Li L. Quantum oscillations in the topological superconductor candidate $\text{Cu}_{0.25}\text{Bi}_2\text{Se}_3$ // Physical review letters. – 2012. – Т. 109. – №. 22. – С. 226406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.226406>
30. Petrushevsky M. et al. Probing the surface states in Bi_2Se_3 using the Shubnikov-de Haas effect // Physical Review B – Condensed Matter and Materials Physics. – 2012. – Т. 86. – №. 4. – С. 045131. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.045131>
31. Arushanov E.K. Crystal growth and characterization of II_3V_2 compounds // Progress in crystal growth and characterization. – 1980. – Т. 3. – №. 2-3. – С. 211-255. [https://doi.org/10.1016/0146-3535\(80\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0146-3535(80)90020-9)
32. Pietraszko A., Łukaszewicz K. Thermal expansion and phase transitions of Cd_3As_2 and Zn_3As_2 // physica status solidi (a). – 1973. – Т. 18. – №. 2. – С. 723-730. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210180234>
33. Риль А.И. и др. Фазовые равновесия в тройной системе CdAs_2 - Cd_3As_2 - MnAs // Журнал неорганической химии. – 2017. – Т. 62. – №. 7. – С. 977-987. <https://doi.org/10.7868/S0044457X17070200>
34. Marenkin S.F. et al. Formation of the α'' -phase and study of the solubility of Mn in Cd_3As_2 // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Т. 892. – С. 162082. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162082>
35. Laiho R. et al. Shubnikov - de Haas effect in thermally annealed $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1997. – Т. 58. – №. 5. – С. 717-724. [https://doi.org/10.1016/S0022-3697\(96\)00194-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3697(96)00194-1)
36. Zakhvalinskii V.S. et al. Anomalous cyclotron mass dependence on the magnetic field and Berry's phase in $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ solid solutions // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2017. – Т. 29. – №. 45. – С. 455701. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa8bdb>

37. Laiho R. et al. Shubnikov-de Haas Effect in $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ under Pressure // *physica status solidi (b)*. – 1996. – Т. 198. – №. 1. – С. 135-141. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221980119>
38. Zhang Y. et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene // *nature*. – 2005. – Т. 438. – №. 7065. – С. 201-204. <https://doi.org/10.1038/nature04235>
39. Vedeneev S.I. et al. Quantum oscillations in strong magnetic fields, berry phase, and superconductivity in three-dimensional topological $\text{Bi}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Se}_3$ insulators // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2015. – Т. 121. – №. 1. – С. 65-75. <https://doi.org/10.1134/S1063776115060217>
40. Zakhvalinskii V.S. et al. Anomalous cyclotron mass dependence on the magnetic field and Berry's phase in $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ solid solutions // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2017. – Т. 29. – №. 45. – С. 455701. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa8bdb>
41. Zhang Y. et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene // *nature*. – 2005. – Т. 438. – №. 7065. – С. 201-204. <https://doi.org/10.1038/nature04235>
42. Novoselov K.S. et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene // *nature*. – 2005. – Т. 438. – №. 7065. – С. 197-200. <https://doi.org/10.1038/nature04233>
43. Lahoud E. et al. Evolution of the Fermi surface of a doped topological insulator with carrier concentration // *Physical Review B – Condensed Matter and Materials Physics*. – 2013. – Т. 88. – №. 19. – С. 195107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.195107>

Для цитирования:

Захвалинский В.С., Никуличева Т.Б., Маширов А.В., Аронзон Б.А., Мехия А.Б., Давыдов А.Б., Зиармал Мавла Хан, Сохань К.С., Никуличев В.Б. Особенности топологических свойств монокристаллов твердого раствора $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$ // *Журнал радиоэлектроники*. – 2026. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.8>