

ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК Cd_3As_2 И ЕГО ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ

Неженцев А.В., Пилюк Е. А., Никуличева Т. Б., Захвалинский В. С., Япрынцеv М. Н.

Статья представлена членом редакционной коллегии А. В. Носковым

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

E-mail: pilyuk@bsu.edu.ru

Аннотация. Исследованы транспортные свойства аморфных пленок Cd_3As_2 и его твердых растворов $(Cd_{1-x-y}Zn_xMn_y)_3As_2$ ($x + y = 0.1; y = 0, 0.02$), полученных магнетронным распылением, в диапазоне температур $10 \div 300$ К. Легирование Zn приводит к смене типа проводимости: от полупроводниковой к металлической. Сопrotивление тонких пленок $(Cd_{0.9}Zn_{0.1})_3As_2$ и $(Cd_{0.9}Zn_{0.08}Mn_{0.02})_3As_2$ уменьшается с понижением температуры. Такое поведение связано с уменьшением подвижности электронов вследствие рассеяния на ионизированных примесях при нагревании.

Ключевые слова: дираковский полуметалл, арсенид кадмия, арсенид цинка, тонкие пленки, подвижность электронов.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук, проект № МК-238.2020.2.

Для цитирования: Неженцев А. В., Пилюк Е. А., Никуличева Т. Б., Захвалинский В. С., Япрынцеv М. Н. 2021. Транспортные свойства тонких пленок Cd_3As_2 и его твердых растворов. Прикладная математика & Физика. 53(3): 243–251. DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-3-243-251.

TRANSPORT PROPERTIES OF THIN FILMS OF Cd_3As_2 AND ITS SOLID SOLUTIONS

Anton Nezhentsev, Evgeniy Pilyuk, Tatiana Nikulicheva, Vasily Zakhvalinskii, Maksim Yapryntsev

Article submitted by a member of the editorial board A. V. Noskov

Belgorod National Research University,

Belgorod, 308015, Russia

E-mail: pilyuk@bsu.edu.ru

Received September, 9, 2021

Abstract. The transport properties of amorphous films of Cd_3As_2 and its solid solutions $(Cd_{1-x-y}Zn_xMn_y)_3As_2$ ($x + y = 0.1; y = 0, 0.02$) obtained by magnetron sputtering in the temperature range $10-300$ K have been studied. Doping with Zn leads to a change in the type conductivity: from semiconductor to metallic. The resistance of $(Cd_{0.9}Zn_{0.1})_3As_2$ and $(Cd_{0.9}Zn_{0.08}Mn_{0.02})_3As_2$ thin films decreases with decreasing temperature. This behavior is associated with a decrease in the electron mobility due to scattering by ionized impurities upon heating.

Key words: Dirac semimetal, cadmium arsenide, zinc arsenide, thin films, electron mobility.

Acknowledgements: The work was supported by the grant of President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists - candidates of sciences, project No. MK-238.2020.2.

For citation: Nezhentsev A. V., Pilyuk E. A., Nikulicheva T. B., Zakhvalinskii V. S., Yapryntsev M. N. 2021. Transport properties of thin films of Cd_3As_2 and its solid solutions. Applied Mathematics & Physics. 53(3): 243–251. (in Russian) DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-3-243-251.

1. Введение. Арсениды кадмия и цинка принадлежат широкому классу полупроводников и полуметаллов группы A^2B^5 , достаточно известной своим огромным потенциалом в создании высокоэффективных солнечных элементов и оптоэлектронных устройств [29, 7]. Интерес к этим соединениям [3, 8, 9] вызван не так давно опубликованными теоретическими и экспериментальными исследованиями [13, 14], которые показали, что Cd_3As_2 принадлежит классу дираковских полуметаллов, особому классу топологических изоляторов, что предоставляет возможность понимать под такими системами альтернативу графена. Так, были обнаружены аномально высокая подвижность носителей заряда [17], большой коэффициент термоэдс [35], квантовый эффект Холла [35], киральная аномалия [16], аномальный эффект Нернста [18] и сильное линейное магнетосопротивление [13]. Cd_3As_2 и Zn_3As_2 кристаллизуются при разных температурах в серии тесно связанных структур, которые можно рассматривать как различные искажения антифлюоритовой структуры [5, 30]. Электрические свойства этих соединений различаются

по нескольким аспектам. Zn_3As_2 – это полупроводник p -типа с низкой подвижностью носителей и прямой шириной запрещенной зоны, равной 1,0 эВ [25]. Ширина запрещенной зоны Cd_3As_2 отрицательна и составляет $-0.3 \div -0.7$ эВ [27]. Подвижность электронов в Cd_3As_2 достигает 9×10^6 $cm^2 V^{-1} s^{-1}$ при 5 К [17], тогда как подвижность дырок для Zn_3As_2 составляет всего 10 $cm^2 V^{-1} s^{-1}$ при комнатной температуре [25]. Cd_3As_2 всегда относится к n -типу из-за вакансий As, а Zn_3As_2 к p -типу, потому что дополнительные вакансии Zn служат акцепторами электронов. Поскольку оба типа носителей происходят из вакансий элементов, в $(Cd_{1-x}Zn_x)_3As_2$ происходит переход от n к p , при этом ширина запрещенной зоны линейно увеличивается с ростом концентрации Zn. Переход от дираковского полуметалла происходит при концентрации цинка около 0.4 [19].

Твердые растворы и пленки $(Cd_{1-x-y}Zn_xMn_y)_3As_2$ (CZMA) различаются по своей структуре. Результаты исследований показывают, что они могут обладать аморфной [15, 12], поликристаллической [11, 1, 10] или монокристаллической [21, 23] структурой. Наличие способности контроля ширины запрещенной зоны посредством варьирования концентрацией Zn составляет главный интерес в исследовании твердых растворов CZMA. Такое легирование поднимает инверсию зон в Cd_3As_2 , что приводит к переходу от топологического ДПМ к полупроводнику [16].

Цель данной работы состоит в исследовании влияния легирования Zn и Mn тонких пленок Cd_3As_2 , полученных напылением на непогреваемую кремниевую подложку, на транспортные свойства.

2. Материалы и методика эксперимента. Тонкие пленки Cd_3As_2 и его твердых растворов $(Cd_{1-x-y}Zn_xMn_y)_3As_2$ ($x + y = 0.1$; $y = 0, 0.02$) были получены при помощи вакуумного универсального поста ВН-2000 высокочастотным магнетронным напылением. В качестве мишени для использования в качестве катода был изготовлен поликристаллический диск диаметром 40 мм. Синтез твердых растворов CZMA был произведен из бинаров Cd_3As_2 , Zn_3As_2 и Mn_3As_2 . Соответствующие бинарные соединения были синтезированы прямым сплавлением чистых кадмия, мышьяка, цинка и марганца в вакууме. Кристаллы Cd_3As_2 и CZMA были выращены методом Бриджмена в вертикальной печи. Охлаждение вблизи температуры кристаллизации было не более $2^\circ C/час$ при градиенте температуры $\Delta T \approx 1^\circ C/см$.

Рентгеновские исследования полученных кристаллов Cd_3As_2 и CZMA, полученные при комнатной температуре с помощью дифрактометра Rigaku SmartLab, излучение CuK_α ($\lambda = 1.5406$ А, $U = 50$ кВ, $I = 60$ мА), показали, что кристаллы Cd_3As_2 имели тетрагональную решетку (пространственная группа $I4_1cd$), которая соответствует α -фазе. Составы $(Cd_{1-x-y}Zn_xMn_y)_3As_2$ $x + y = 0.1$; $y = 0, 0.02$ были получены в тетрагональной α'' -фазе с пространственной группой $P4_2/nmc$.

Напыление тонких пленок Cd_3As_2 и CZMA для исследования электрофизических свойств осуществлялось через изготовленную маску на подложку из монокристаллического кремния марки КДБ-2 (100) с термически выращенным диоксидом кремния на поверхности ($T = 20^\circ C$) при давлении аргона в процессе напыления $8 \cdot 10^{-1}$ Па. Расстояние мишень-подложка равнялось 50 мм. Мощность, подаваемая на магнетрон, составляла 10 Вт. Толщина полученных пленок составляла 40 нм. Контактные площадки получали магнетронным напылением индия.

Исследование структуры полученных образцов пленок Cd_3As_2 и его твердых растворов производили методом малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) при $\alpha = 3^\circ$ в диапазоне $2\theta = 10 - 80^\circ$. Типичная дифрактограмма исследуемых пленок показана на рис. 1 и является типичной для аморфных материалов с широкими максимумами типа «гало». Таким образом, полученные пленки следует рассматривать как «рентгеноаморфный» материал.

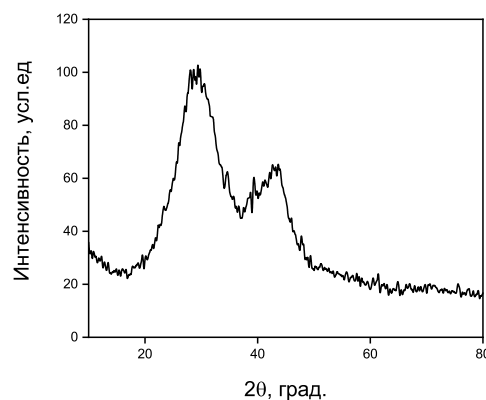


Рис. 1. Типичная дифрактограмма исследуемых пленок

Fig. 1. Typical diffraction pattern of the studied films

Химические структуры полученных пленок Cd_3As_2 и CZMA были исследованы при комнатной температуре с помощью спектрометра комбинационного рассеяния LabRam HR Evolution ($\lambda = 532$ нм, мощностью 50 мВт, спектральное разрешение 0.5 cm^{-1}). Спектры рамановского рассеяния полученных

пленок Cd_3As_2 , $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1})_3\text{As}_2$, $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.08}\text{Mn}_{0.02})_3\text{As}_2$ показаны на рис. 2. По результатам спектроскопии комбинационного рассеяния (КРС) в Cd_3As_2 можно видеть два ярко выраженных пика при 195 и 247 см^{-1} и слабый пик при 301 см^{-1} . Известно, что в интервале от 100 до 400 см^{-1} спектр комбинационного рассеяния при 77 К для монокристаллов $\alpha\text{-Cd}_3\text{As}_2$ имеет основные пики при 192 , 247 см^{-1} (симметрия $B_{1g} + B_{2g}$) и 300 см^{-1} (A_{1g}) [31]. Пик на 39 см^{-1} соответствует симметрии B_{2g} , 60 , $99\text{ см}^{-1} - E_g$, 122 и $140\text{ см}^{-1} - A_{1g}$. Частота, для которой наблюдается пик при 301 см^{-1} , соответствует зазору между валентной зоной и нижней зоной проводимости [32].

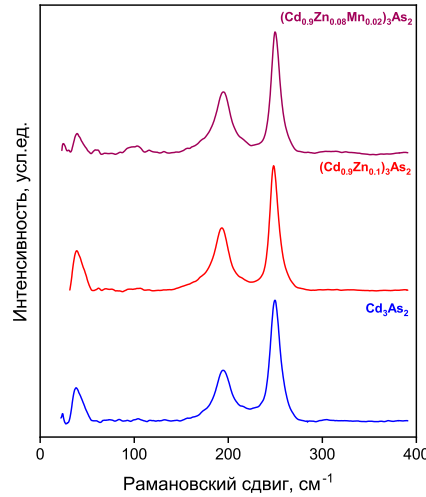


Рис. 2. Рамановский спектр пленок Cd_3As_2 , $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1})_3\text{As}_2$, $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.08}\text{Mn}_{0.02})_3\text{As}_2$
 Fig. 2. Raman spectrum of Cd_3As_2 , $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1})_3\text{As}_2$, $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.08}\text{Mn}_{0.02})_3\text{As}_2$ films

Для измерения удельного сопротивления и исследования эффекта Холла тонких пленок CZMA была использована установка на базе криостата замкнутого цикла Janis CCS-350S. Диапазон температур составлял $10\text{-}300\text{ К}$ и магнитных полях до 1 Тл . Была использована шестизондовая схема. Индиевые контакты были изготовлены магнетронным распылением.

3. Результаты и обсуждение. Как видно из рис. 3, удельное сопротивление ρ пленки Cd_3As_2 имеет «полупроводниковый» характер и увеличивается с понижением температуры от $5.58 \times 10^{-2}\text{ Ом}\cdot\text{см}$ при комнатной температуре до $6.64 \times 10^{-2}\text{ Ом}\cdot\text{см}$ при 10 К . Перенос заряда в аморфной пленке Cd_3As_2 осуществляется посредством механизма прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка моттовского типа [33]. Проводимость пленок твердых растворов $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1})_3\text{As}_2$, $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.08}\text{Mn}_{0.02})_3\text{As}_2$ носит металлический характер, их сопротивление при изменении температуры от 10 до 30 К растет от 2.02×10^{-4} до $2.46 \times 10^{-4}\text{ Ом}\cdot\text{см}$ и от 2.64×10^{-4} до $3.36 \times 10^{-4}\text{ Ом}\cdot\text{см}$, соответственно.

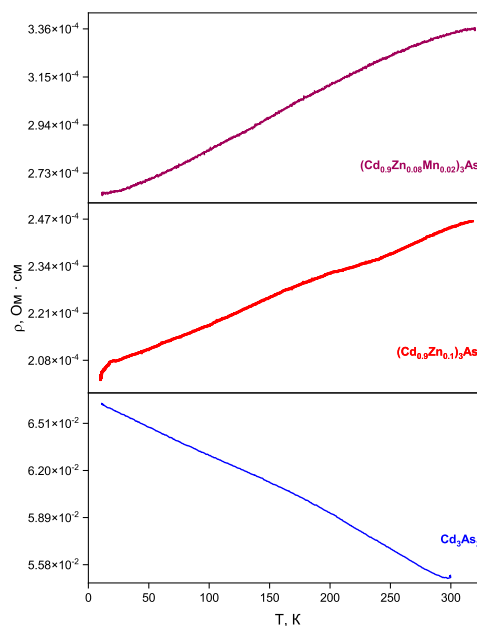


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления пленок Cd_3As_2 , $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1})_3\text{As}_2$, $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.08}\text{Mn}_{0.02})_3\text{As}_2$

Fig. 3. Temperature dependence of the resistivity of Cd_3As_2 , $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1})_3\text{As}_2$, $(\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.08}\text{Mn}_{0.02})_3\text{As}_2$ films

Таблица 1. Состав, удельное сопротивление (ρ), постоянная Холла (R_H), концентрация носителей заряда (n), подвижность носителей заряда (μ).
 Table 1. Composition, resistivity (ρ), Hall constant (R_H), concentration of the charge carriers (n), mobility of the charge carriers (μ).

Состав	ρ , Ом · см	R_H , см ³ · Кл ⁻¹	n , см ⁻³	μ , см ² · В · см ⁻¹
$(Cd_{0.9}Zn_{0.08}Mn_{0.02})_3As_2$	2.64×10^{-4}	-4.01×10^{-8}	1.55×10^{20}	37.62
$(Cd_{0.9}Zn_{0.1})_3As_2$	2.03×10^{-4}	-1.36×10^{-7}	4.59×10^{19}	666.15
Cd_3As_2	6.64×10^{-2}	-9.03×10^{-9}	6.91×10^{20}	170.51

Полученные результаты измерений позволили вычислить постоянную Холла R_H , используя которую можно определить концентрацию носителей заряда n $R_H = \frac{1}{ne}$.

Для Cd_3As_2 концентрация электронов составила 6.91×10^{20} см⁻³ и растет во всем температурном диапазоне от 10 до 300 К, что соответствует примесной проводимости. Для пленок $(Cd_{0.9}Zn_{0.1})_3As_2$ концентрация носителей заряда уменьшается от 5.21×10^{19} см⁻³ при комнатной температуре до 4.37×10^{19} см⁻³ при ~ 100 К и затем практически не меняется. Участок 100-300 К соответствует возникновению собственной проводимости полупроводника. В образцах пленок состава $(Cd_{0.9}Zn_{0.08}Mn_{0.02})_3As_2$ концентрация электронов почти не зависела от температуры, значение которой составило 1.55×10^{20} см⁻³.

Холловская подвижность электронов μ_H определялась как: $\mu_H = \frac{R_H}{\rho}$.

Температурные зависимости подвижности носителей заряда тонких пленок Cd_3As_2 , $(Cd_{0.9}Zn_{0.1})_3As_2$, $(Cd_{0.9}Zn_{0.08}Mn_{0.02})_3As_2$ приведены на рис. 4. Для Cd_3As_2 и $(Cd_{0.9}Zn_{0.08}Mn_{0.02})_3As_2$ во всем температурном диапазоне подвижность растет с понижением температуры, максимальные значения при 10 К равны 170 см² В⁻¹ с⁻¹ и 666 см² В⁻¹ с⁻¹, соответственно. В пленке $(Cd_{0.9}Zn_{0.1})_3As_2$ рост подвижности наблюдается от 300 К до ~ 100 К, а затем незначительно падает.

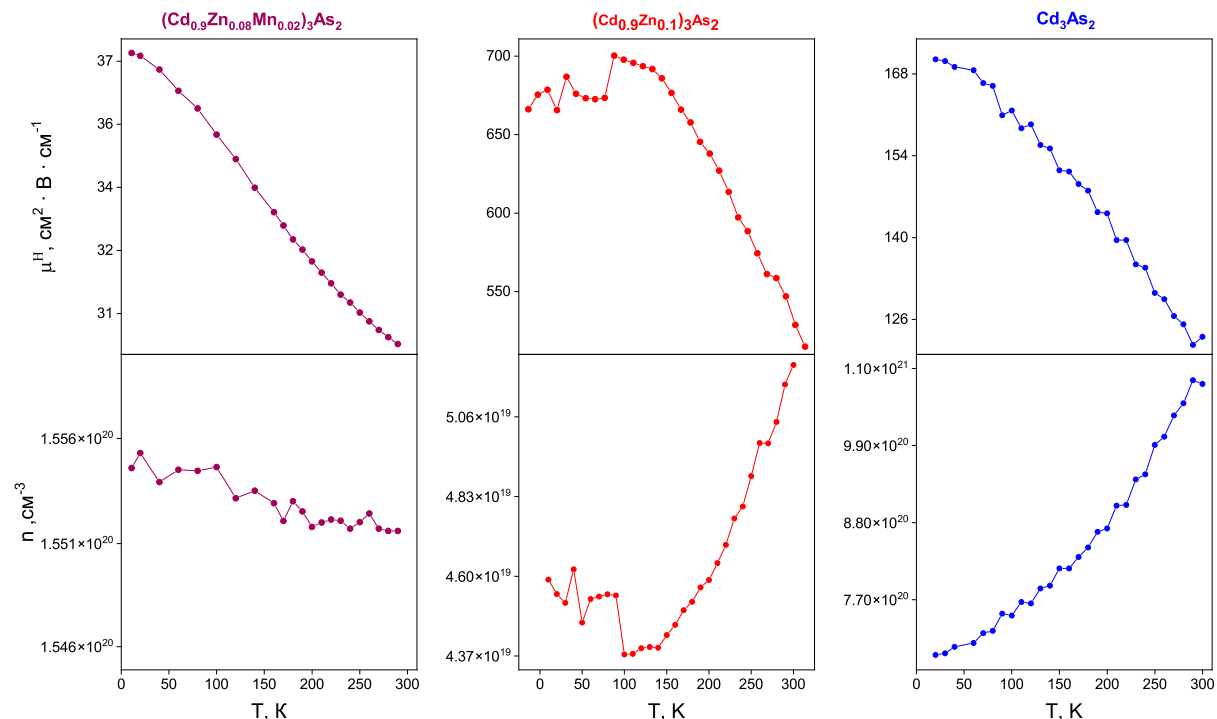


Рис. 4. Подвижность (сверху) и концентрация (снизу) носителей заряда в тонких пленках Cd_3As_2 , $(Cd_{0.9}Zn_{0.1})_3As_2$, $(Cd_{0.9}Zn_{0.08}Mn_{0.02})_3As_2$

Fig. 4. Mobility (top) and concentration (bottom) of the charge carriers in Cd_3As_2 , $(Cd_{0.9}Zn_{0.1})_3As_2$, $(Cd_{0.9}Zn_{0.08}Mn_{0.02})_3As_2$ thin films

Для металлов и вырожденных полупроводников зависимость $\rho(T)$ будет определяться температурной зависимостью подвижности носителей, поскольку n не зависит от T для этих твердых тел. Температурную зависимость подвижности можно оценить, рассматривая влияние температуры на ионизованные примеси и рассеяние фононов и комбинируя эти механизмы с использованием правила Маттиссена [20]. Рассеяние фононов сильно увеличивается с увеличением температуры T из-за увеличения числа

фононов, что приводит к зависимости подвижности полярных фононов $\mu \sim T^{-3/2}$. Температурную зависимость подвижности электронов, обусловленную рассеянием акустических фононов, можно записать как

$$\mu_l = \frac{4e}{3\sqrt{\pi}} \frac{\tau_{0l}}{m^{*5/2}k^{1/2}} T^{-3/2},$$

где $\tau_{0l} = 9\pi\hbar^4 v^2 M / 4\sqrt{2} a^3 k C^2$, a – параметр решетки, e – заряд электрона, C – емкость, v^2 – скорость звука, M – масса ядра, k – постоянная Больцмана, m^* – эффективная масса носителя заряда.

Для рассеяния на ионизированных примесях увеличение температуры увеличивает среднюю скорость носителей и, следовательно, увеличивает подвижность носителей для заданной концентрации ионизированных примесей. После достижения температуры, при которой ионизация примесей завершена, можно показать, что подвижность носителей при рассеянии на ионизированных примесях возрастает с увеличением температуры T примерно как $\mu \sim T^{3/2}$:

$$\mu_i = \frac{8\sqrt{2}\epsilon_r^2 k^{3/2} T^{3/2}}{\pi^{3/2} Z^2 e^3 N_i m^{*1/2} \ln[1 + (3\epsilon_r k T / Z e^2 N_i^{1/3})^2]},$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды, N_i – концентрация ионов примеси.

При низких температурах подвижность в основном определяется рассеянием на ионизованных примесях, а при высоких температурах – рассеянием на фононах, приводящим к пиковой кривой. Ссылаясь на предыдущие обсуждения зависимости общей подвижности от концентрации носителей, становится ясно, что максимальная подвижность будет зависеть от уровня легирования, а положение пика смещается в сторону более высоких температур с увеличением легирования.

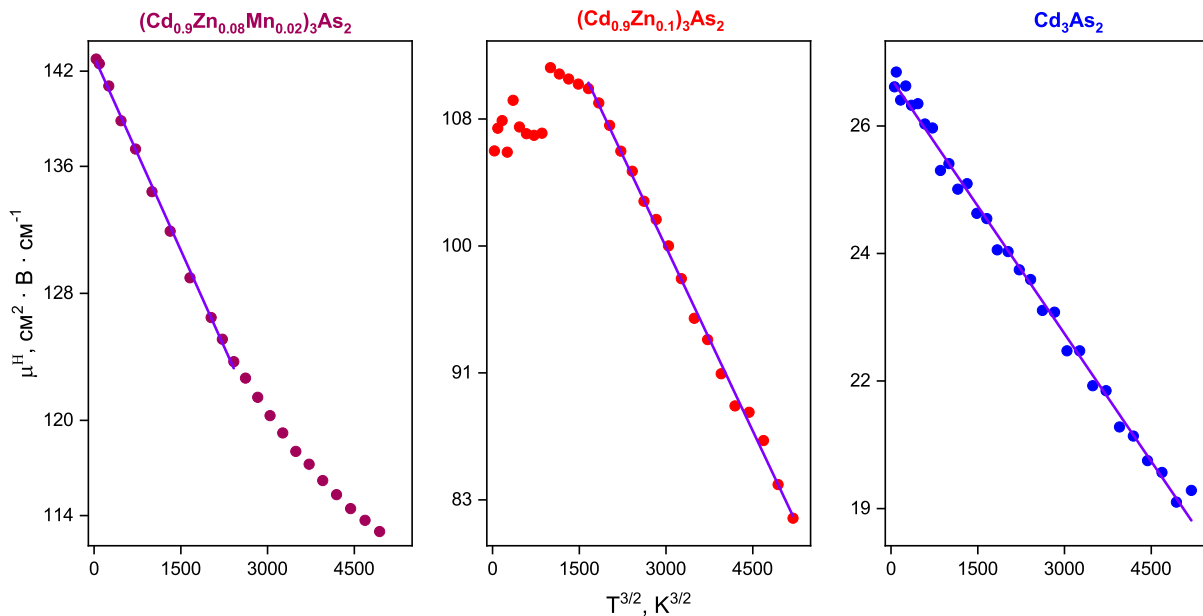


Рис. 5. Температурная зависимость μ от $T^{3/2}$ тонких пленок

Fig. 5. Dependence of μ on $T^{3/2}$ for thin films

Из построенного графика зависимости $\mu(T^{3/2})$, изображенного на рис. 5, было обнаружено, что на участке подвижность носителей заряда изменяется согласно закону $\mu \sim T^{3/2}$. Это означает, что рассеяние носителей заряда на ионах примеси ответственно за такое поведение зависимости. Электроны могут рассеиваться на ионизированных примесях из-за электростатического притяжения между электронами, движущимися в решетке, и примесью. В этом случае подвижность электронов увеличивается с ростом температуры. Такое температурное поведение холловской подвижности носителей заряда связано с увеличением кинетической энергии электронов при нагревании, что как раз сокращает время взаимодействия между электронами проводимости и ионизированными примесями [22].

Из рис. 5 видно, что значения концентрации носителей заряда в зависимости от температуры ниже $T \approx 100$ К незначительно изменяются, а затем следует стремительное увеличение n с ростом температуры, что свидетельствует о наличии собственной проводимости на этом участке, так как при увеличении температуры кинетическая энергия частиц увеличивается, разрушаются связи и возникают свободные электроны, которые перемещаются в противоположном направлении электрического поля.

4. Заключение. Таким образом, были получены тонкие пленки составов Cd_3As_2 , $(Cd_{0.9}Zn_{0.1})_3As_2$, $(Cd_{0.9}Zn_{0.08}Mn_{0.02})_3As_2$ магнетронным распылением. Измерены удельное сопротивление и эффект Холла

в диапазоне температур 10–300 К. Определены концентрация и подвижность носителей заряда. Установлено, что основным механизмом рассеяния носителей заряда является рассеяние на ионизированных примесях.

Список литературы

1. Жалилов Н.С., Саньгин В.П., Квердаков А.М. 1990. Получение и свойства тонких пленок Cd_3As_2 и Zn_3P_2 . Изв. АН СССР. Неорганич. материалы, 26(9): 1975–1976.
2. Шалимова К. В. 2010. Физика полупроводников. СПб. Издательство "Лань". 400 с.
3. Amarnath R., Bhargavi K. S., Kubakaddi S. S. 2020. Thermoelectric transport properties in 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 . Journal of Physics Condensed Matter, 32(22): 22570412.
4. Armitage N.P., Mele E.J., Vishwanath A. 2018. Weyl and Dirac Semimetals in Three-Dimensional Solids. Rev. Mod. Phys., 90: 015001.
5. Arushanov E. K. 1992. PbV_2 compounds and alloys. Progress in crystal growth and characterization of materials, 25(3): 131–201.
6. Borisenko S., Gibson Q., Evtushinsky D. et al. 2014. Experimental Realization of a Three-Dimensional Dirac Semimetal. Phys. Rev. Lett., 113(2): 027603.
7. Burgess, T. et al. 2015. Zn_3As_2 nanowires and nanoplatelets: highly efficient infrared emission and photodetection by an earth abundant material. Nano Lett., 15: 378–385.
8. Chorsi H. T. et al. 2020. Widely Tunable Optical and Thermal Properties of Dirac Semimetal Cd_3As_2 . Advanced Optical Materials, 8(8): 120302 6.
9. Crassee I. et al. 2018. 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 : A review of material properties. Physical Review Materials, 2(12): 120302 15.
10. Din M., Gould R.D. 2006. Van der Pauw Resistivity Measurements on Evaporated Thin Films Of Cadmium Arsenide, Cd_3As_2 . Appl. Surf. Sci., 252(15): 5508–5501.
11. Dubowski J.J., Norman P., Sewell P.B., et al. 1987. Cadmium Arsenide Films Prepared by Pulsed Laser Evaporation: Electrical Properties and lattice parameters. Thin Solid Films, 147(1): 51–54.
12. Dubowski J.J., Williams D.F. 1984. Pulsed Laser Evaporation of Cd_3As_2 . Appl. Phys. Lett., 44(3): 339.
13. Feng J., Pang Y., Wu D. et al. 2015. Large Linear Magnetoresistance in Dirac Semimetal Cd_3As_2 with Fermi Surfaces Close to the Dirac Points. Phys. Rev. B., 92. 081306.
14. He L.P., Hong X.C., Dong J.K. et al. 2014. Quantum Transport Evidence for the Three-Dimensional Dirac Semimetal Phase in Cd_3As_2 . Phys. Rev. Lett., 113: 246402.
15. Jarzabek B., Wieszka J., Cisowski J. 2004. Distribution of Electronic States in Amorphous Cd_3As_2 Thin Films on the Basis of Optical Measurements. J. Non-Cryst. Solids. V., 333(2): 206–211.
16. Li C. Z. et al. 2015. Giant negative magnetoresistance induced by the chiral anomaly in individual Cd_3As_2 nanowires. Nature communications, 6(1): 1–7.
17. Liang T. et al. 2015. Ultrahigh mobility and giant magnetoresistance in the Dirac semimetal Cd_3As_2 . Nature materials, 14(3) : 280–284.
18. Liang T. et al. 2017. Anomalous Nernst effect in the dirac semimetal Cd_3As_2 . Physical review letters, 118(13): 136601 5.
19. Lu H. et al. Topological phase transition in single crystals of $(Cd_{1-x-y}Zn_xMn_y)_3As_2$. 2017. Scientific reports. 7. (1): 1–10.
20. Marius G. 2016. The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics and Applications.
21. Nishihaya S., Uchida M., Nakazawa Y. et al. 2018. Negative Magnetoresistance Suppressed through a Topological Phase Transition in $(Cd_{1-x-y}Zn_xMn_y)_3As_2$ Thin Films. Phys. Rev. B., 97.(24): 245103.
22. Ivanov O.N., Yaprincev M.N. et al. 2016. Low-temperature Minimum in the Electrical Resistivity of the $Bi_{1.9}Lu_{0.1}Te_3$. J. NANO- ELECTRON. PHYS., 8, 4(1): 04036.

23. Pawlikowski J.M., Sieranski K., Szatkowski J. 1975. A New Method of Obtaining Crystalline Cd_3As_2 Films on Non-Crystalline Substrates. *Thin Solid Films.*, 30(1): 99-102.
24. Stackelberg M. V., Paulu R. 1935. Untersuchungen an den Phosphiden und Arseniden des Zinks und Cadmiums. Das Zn_3P_2 -Gitter, *Zeitschrift far Physikalische Chemie*, 28B(1): 427-460.
25. Turner W. J., Fischler, A. S. Reese, W. E. 1961. Physical properties of several 2–5 semiconductors. *Phys. Rev.*, 121: 759–767.
26. Uchida M. et al. 2017. Quantum Hall states observed in thin films of Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Nature communications*, 8(1): 1-7.
27. Wagner, R. J., Palik, E. D. Swiggard, E. M. 1971. Interband magnetoabsorption in $\text{Cd}_x\text{Zn}_{3-x}\text{As}_2$ and $\text{Cd}_3\text{As}_x\text{P}_{2-x}$. *J. Phys. Chem. Solids, Suppl.*, 1: 471.
28. Wang Q. et al. 2017. Ultrafast broadband photodetectors based on three-dimensional Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Nano letters.*, 17(2): 834-841
29. Wang Z., Weng H., Wu Q. et al. 2013. Three-Dimensional Dirac Semimetal and Quantum Transport in Cd_3As_2 . *Phys. Rev.*, 88: 125427.
30. Wegłowski, S. Lukaszewicz, K. 1968. Phase transition of Cd_3As_2 and Zn_3As_2 . *Bull. Acad. Polon. Sci. Ser. Sci. Chim.*, 16: 177–182.
31. Weszka J. 1999. Model of lattice dynamics of Cd_3As_2 single crystals. *Physica Status Solidi (b).*, 211(2): 605-619.
32. 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.
33. Zakhvalinskii V. S. et al. 2020. Hopping Conductivity Mechanism in Cd_3As_2 Films Prepared by Magnetron Sputtering. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 12(3):03029-1-03029.
34. Zhang K., Pan H., Zhang M. et al. 2017. Controllable synthesis and magnetotransport properties of Cd_3As_2 Dirac semimetal nanostructures. *RSC Adv.*, 7 : 17689–17696
35. Zhou T. et al. 2016. Enhanced thermoelectric properties of the Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Inorganic Chemistry Frontiers*, 3(12) : 1637–1643.

References

1. Zhalilov N. S., Sanygin V. P., Kverdakov A.M. 1990. Preparation and properties of thin films Cd_3As_2 and Zn_3P_2 . *Izv. of the USSR Academy of Sciences. Neorgan. materials*, 26(9): 1975-1976.
2. Shalimova K. V. 2010. *Physics of semiconductors*. St. Petersburg. Publishing house "Lan". 400 p.
3. Amarnath R., Bhargavi K. S., Kubakaddi S. S. 2020. Thermoelectric transport properties in 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Journal of Physics Condensed Matter*, 32(22): 22570412.
4. Armitage N.P., Mele E.J., Vishwanath A. 2018. Weyl and Dirac Semimetals in Three-Dimensional Solids. *Rev. Mod. Phys.*, 90: 015001.
5. Arushanov E. K. 1992. II_3V_2 compounds and alloys. *Progress in crystal growth and characterization of materials*, 25(3): 131-201.
6. Borisenko S., Gibson Q., Evtushinsky D. et al. 2014. Experimental Realization of a Three-Dimensional Dirac Semimetal. *Phys. Rev. Lett.*, 113(2): 027603.
7. Burgess, T. et al. 2015. Zn_3As_2 nanowires and nanoplatelets: highly efficient infrared emission and photodetection by an earth abundant material. *Nano Lett.*, 15: 378–385.
8. Chorsi H. T. et al. 2020. Widely Tunable Optical and Thermal Properties of Dirac Semimetal Cd_3As_2 . *Advanced Optical Materials*, 8(8): 120302 6.
9. Crassee I. et al. 2018. 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 : A review of material properties. *Physical Review Materials*, 2(12): 120302 15.
10. Din M., Gould R.D. 2006. Van der Pauw Resistivity Measurements on Evaporated Thin Films Of Cadmium Arsenide, Cd_3As_2 . *Appl. Surf. Sci.*, 252(15): 5508–5501.

11. Dubowski J.J., Norman P., Sewell P.B., et al. 1987. Cadmium Arsenide Films Prepared by Pulsed Laser Evaporation: Electrical Properties and lattice parameters. *Thin Solid Films*, 147(1): 51-54.
12. Dubowski J.J., Williams D.F. 1984. Pulsed Laser Evaporation of Cd_3As_2 . *Appl. Phys. Lett.*, 44(3): 339.
13. Feng J., Pang Y., Wu D. et al. 2015. Large Linear Magnetoresistance in Dirac Semimetal Cd_3As_2 with Fermi Surfaces Close to the Dirac Points. *Phys. Rev. B.*, 92. 081306.
14. He L.P., Hong X.C., Dong J.K. et al. 2014. Quantum Transport Evidence for the Three-Dimensional Dirac Semimetal Phase in Cd_3As_2 . *Phys. Rev. Lett.*, 113: 246402.
15. Jarzabek B., Weszka J., Cisowski J. 2004. Distribution of Electronic States in Amorphous Cd_3As_2 Thin Films on the Basis of Optical Measurements. *J. Non-Cryst. Solids. V.*, 333(2): 206–211.
16. Li C. Z. et al. 2015. Giant negative magnetoresistance induced by the chiral anomaly in individual Cd_3As_2 nanowires. *Nature communications*, 6(1): 1–7.
17. Liang T. et al. 2015. Ultrahigh mobility and giant magnetoresistance in the Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Nature materials*, 14(3) : 280–284.
18. Liang T. et al. 2017. Anomalous Nernst effect in the dirac semimetal Cd_3As_2 . *Physical review letters*, 118(13): 136601 5.
19. Lu H. et al. Topological phase transition in single crystals of $(Cd_{1-x-y}Zn_xMn_y)_3As_2$. 2017. *Scientific reports*. 7. (1): 1-10.
20. Marius G. 2016. *The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics and Applications*.
21. Nishihaya S., Uchida M., Nakazawa Y. et al. 2018. Negative Magnetoresistance Suppressed through a Topological Phase Transition in $(Cd_{1-x-y}Zn_xMn_y)_3As_2$ Thin Films. *Phys. Rev. B.*, 97.(24): 245103.
22. Ivanov O.N., Yaprntsev M.N. et al. 2016. Low-temperature Minimum in the Electrical Resistivity of the $Bi_{1.9}Lu_{0.1}Te_3$. *J. NANO- ELECTRON. PHYS.*, 8, 4(1): 04036.
23. Pawlikowski J.M., Sieranski K., Szatkowski J. 1975. A New Method of Obtaining Crystalline Cd_3As_2 Films on Non-Crystalline Substrates. *Thin Solid Films.*, 30(1): 99-102.
24. Stackelberg M. V., Paulu R. 1935. Untersuchungen an den Phosphiden und Arseniden des Zinks und Cadmiums. Das Zn_3P_2 -Gitter, *Zeitschrift far Physikalische Chemie*, 28B(1): 427-460.
25. Turner W. J., Fischler, A. S. Reese, W. E. 1961. Physical properties of several 2–5 semiconductors. *Phys. Rev.*, 121: 759–767.
26. Uchida M. et al. 2017. Quantum Hall states observed in thin films of Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Nature communications*, 8(1): 1-7.
27. Wagner, R. J., Palik, E. D. Swiggard, E. M. 1971. Interband magnetoabsorption in $Cd_xZn_{3-x}As_2$ and $Cd_3As_xP_{2-x}$. *J. Phys. Chem. Solids, Suppl.*, 1: 471.
28. Wang Q. et al. 2017. Ultrafast broadband photodetectors based on three-dimensional Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Nano letters.*, 17(2): 834-841
29. Wang Z., Weng H., Wu Q. et al. 2013. Three-Dimensional Dirac Semimetal and Quantum Transport in Cd_3As_2 . *Phys. Rev.*, 88: 125427.
30. Weglowski, S. Lukaszewicz, K. 1968. Phase transition of Cd_3As_2 and Zn_3As_2 . *Bull. Acad. Polon. Sci. Ser. Sci. Chim.*, 16: 177–182.
31. Weszka J. 1999. Model of lattice dynamics of Cd_3As_2 single crystals. *Physica Status Solidi (b).*, 211(2): 605-619.
32. 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.
33. Zakhvalinskii V. S. et al. 2020. Hopping Conductivity Mechanism in Cd_3As_2 Films Prepared by Magnetron Sputtering. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 12(3):03029-1-03029.
34. Zhang K., Pan H., Zhang M. et al. 2017. Controllable synthesis and magnetotransport properties of Cd_3As_2 Dirac semimetal nanostructures. *RSC Adv.*, 7 : 17689–17696

35. Zhou T. et al. 2016. Enhanced thermoelectric properties of the Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Inorganic Chemistry Frontiers*, 3(12) : 1637–1643.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Получена 09.09.2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Неженцев Антон Васильевич – студент четвертого 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: 1318586@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

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

E-mail: pilyuk@bsu.edu.ru

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

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

E-mail: nikulicheva@bsu.edu.ru

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

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

E-mail: zakhvalinskii@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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton V. Nezhentsev – fourth year student of the Department of Theoretical and Experimental Physics of the Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Evgeny A. Pilyuk – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics of the Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Tatiana B. Nikulicheva – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Modeling, Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Vasily S. Zakhvalinsky – Doctor of Sciences Phys. Math., Professor, Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics of the Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Maxim N. Yapryntsev – PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Center for Shared Use « Technologies and Materials, National Research University « BelSU », Belgorod, Russia