



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-95-99>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.21

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$

БОДНАРЬ И.В., ЧАН БИНЬ ТХАН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 12 июня 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Методом Бриджмена (вертикальный вариант) выращены монокристаллы твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ во всем интервале концентраций. Определен состав и структура выращенных монокристаллов. Проведены исследования магнитных свойств указанных монокристаллов в интервале температур 2–300 К и магнитных полях до 10 Тл. Показано, что исследуемые монокристаллы являются парамагнетиками во всем исследованном интервале, удельный магнитный момент монотонно возрастает с увеличением температуры.

Ключевые слова: метод Бриджмена, твердые растворы, монокристаллы, удельный магнитный момент, парамагнетика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Боднар И.В., Чан Бинь Тхан. Магнитные свойства монокристаллов твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 95-99.

MAGNETIC PROPERTIES OF SINGLE CRYSTALS $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ SOLID SOLUTIONS

BODNAR I.V., CHAN BIN TKHAN

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 12 June 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. Single crystals of solid solutions $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ have been grown with the Bridgeman method in the whole range of temperatures. The crystals structure and composition were determined. The study of the given single crystals in the temperature range 2–300 K and magnetic fields to 10 T was carried out. It is set that the given crystals are paramagnetic in the whole studied range. The specific magnetic moment increases with the temperature.

Keywords: Bridgman method, solid solutions, single crystals, specific magnetic moment, paramagnets.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Bodnar I.V., Chan Bin Tkhan. Magnetic properties of single crystals $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ solid solutions. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 95-99.

Введение

Тройное соединение MnIn_2S_4 относится к классу магнитных полупроводников, AgIn_5S_8 – к дефектным полупроводникам с концентрацией вакансий в катионной подрешетке ~ 25 %. Указанные соединения кристаллизуются в кубической структуре шпинели и являются перспективными материалами для создания на их основе различных приборов микро- и нанoeлектроники [1–12]. Ранее авторами были исследованы физико-химические, оптические и теплофизические свойства твердых растворов на основе тройных соединений MnIn_2S_4 и AgIn_5S_8 [13–15]. В настоящей работе впервые представлены результаты исследования магнитных твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$.

Методика эксперимента

Монокристаллы соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов на их основе выращивали методом Бриджмена из предварительно синтезированных двухтемпературным методом поликристаллических слитков. Методики синтеза и выращивания монокристаллов указанных материалов представлены в работах [13–15]. Исследования удельного магнитного момента были выполнены с помощью универсальной высокополевой измерительной системы (Liquid Helium Free High Field Measurement System by Cryogenic Ltd, London, UK) в интервале температур 4–300 К и в полях 1 и 10 Тл. Указанные измерения проводились на монокристаллических образцах, вырезанных из полученных слитков со средними размерами $2 \times 3 \times 5$ мм. Были выполнены измерения в зависимости от температуры в разных полях в режиме отогрева после охлаждения без поля (ZFC) и в поле (FC). Измерения удельного магнитного момента в режиме полевого охлаждения (FC) проводили в прямом и обратном направлении изменения температуры.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты магнитных измерений монокристаллов тройного соединения MnIn_2S_4 .

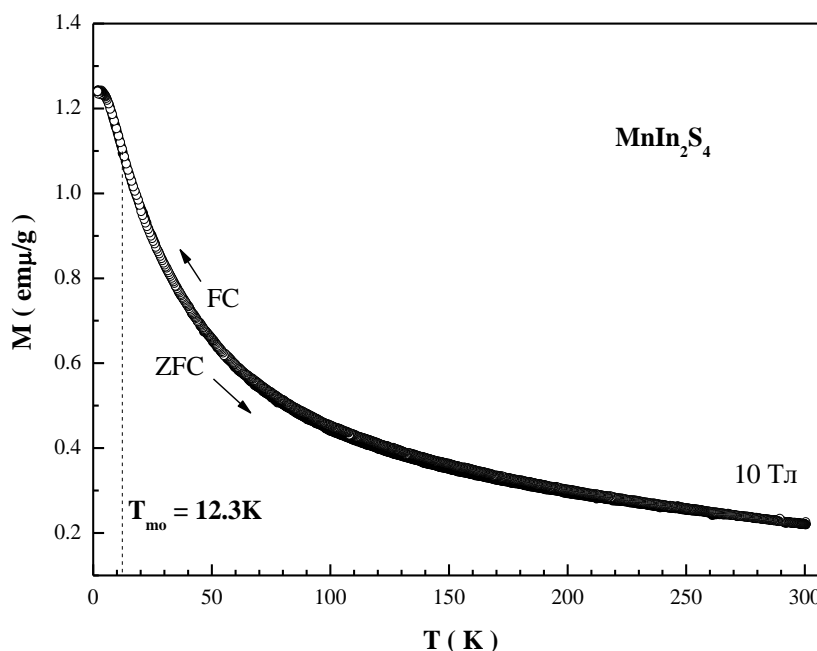


Рис. 1. Температурная зависимость ZFC (черные символы) и FC (светлые символы) удельного магнитного момента в поле 10 Тл для MnIn_2S_4

Fig. 1. Temperature dependence of ZFC (black symbols) and FC (light symbols) of the specific magnetic moment in a field of 10 T for MnIn_2S_4

Видно, что удельный магнитный момент кристаллов монотонно возрастает с уменьшением температуры. Во внешнем магнитном поле 10 Тл температура магнитного упорядочения $T_{\text{упор.}}$ составляет $\sim 12,3$ К. Установлено отсутствие различий при измерении ФС-кривых в прямом и обратном направлении изменения температуры, что наблюдается при магнитных переходах II рода. Ниже 4 К магнитный момент достигает насыщения.

Для выяснения природы низкотемпературного магнитного фазового состояния были выполнены измерения полевых зависимостей удельного магнитного момента (рис. 2). Видно, что вплоть до температуры 2 К полевые зависимости почти линейны, что характерно для парамагнитного состояния. При температуре 2 К атомный магнитный момент (σ) во внешнем магнитном поле 10 Тл составляет от $0,91 \mu_B/\text{f.u.}$. Даже в таком поле атомный магнитный момент не достигает максимально возможной для катиона Mn^{2+} величины в случае 100 % спиновой поляризации и составляет $\sim 5 \mu_B$. В низкотемпературной области (< 12 К) наблюдается ненулевое значение спонтанного атомного магнитного момента, что свойственно наличию ферромагнитных корреляций ближнего порядка. Такое поведение не соответствует однородному антиферромагнитному состоянию. При 2 К спонтанный атомный магнитный момент (σ_s) равен $\sim 0,11 \mu_B/\text{f.u.}$

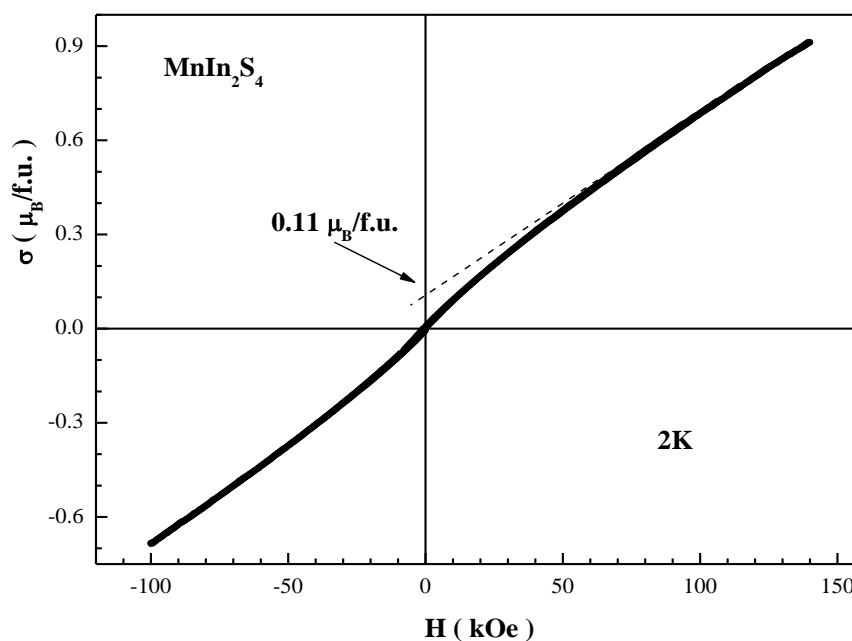


Рис. 2. Полевая зависимость атомного магнитного момента при $T = 2$ К
Fig. 2. Field dependence of the atomic magnetic moment when $T = 2$ К

Аналогичные измерения были проведены и для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ (рис. 3). Результаты измерений показали, что исследуемые кристаллы твердых растворов являются парамагнетиками во всем исследованном интервале температур. Из рис. 3 видно, что температурные зависимости удельного магнитного момента в полях 1 и 10 Тл для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ как для ZFC, так и для FC кривых уменьшаются с понижением температуры. При измерении FC-кривых в прямом и обратном направлении изменения температуры, какие-либо различия отсутствуют, что наблюдается при магнитных переходах II рода.

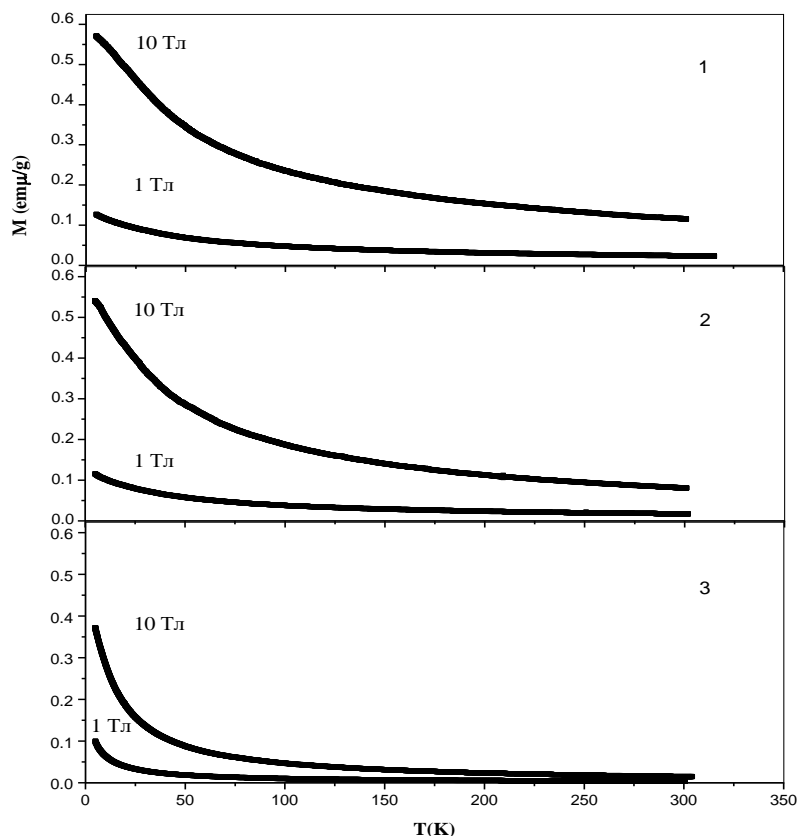


Рис. 3. Температурная зависимость удельного магнитного момента в полях 1 и 10 Тл монокристаллов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$: 1 – $\text{Mn}_{0.9}\text{Ag}_{0.1}\text{In}_2\text{S}_4$; 2 – $\text{Mn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{In}_2\text{S}_4$; 3 – $\text{Mn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{In}_2\text{S}_4$

Fig. 3. Temperature dependence of the specific magnetic moment in the fields of 1 and 10 T of single crystals $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$: 1 – $\text{Mn}_{0.9}\text{Ag}_{0.1}\text{In}_2\text{S}_4$; 2 – $\text{Mn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{In}_2\text{S}_4$; 3 – $\text{Mn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{In}_2\text{S}_4$

Заключение

На монокристаллах тройного соединения MnIn_2S_4 и твердых растворах $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ в интервале температур 4–300 К и полях до 10 Тл измерены магнитные свойства. Измерения проводились на монокристаллических образцах со средними размерами $2 \times 3 \times 5$ мм. Установлено, что исследуемые монокристаллы являются парамагнетиками во всем исследованном интервале температур. Показано, что при измерении ФС-кривых в прямом и обратном направлении изменения температуры, какие-либо различия отсутствуют, что наблюдается при магнитных переходах II рода.

Список литературы

1. Magnetic and Crystallographic Studies of MIn_2S_4 (M = Mn, Fe, Co and Ni) / T. Kanomata [et al.] // J. Phys. Soc. Jpn. 1973. Vol. 34, № 2. P. 554–555.
2. Electric-field control of ferromagnetism / H. Ohno [et al.] // Nature. 2000. Vol. 408, № 6815. P. 944–950.
3. Метфессель З., Маттиас Д. Магнитные полупроводники М., Мир, 1972. 405 с.
4. Нифтиев Н.Н. Термостимулированные токи в монокристаллах MnIn_2S_4 // ФТП. Т. 36, № 7. С. 836–837.
5. Боднарь И.В., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. Фоточувствительные структуры на основе монокристаллов MnIn_2S_4 // ФТП. 2009. Т. 43, № 11. С. 1549–1552.
6. Нифтиев Н.Н., Тагиев О.Б. Вольт-амперные характеристики монокристаллов MnIn_2S_4 и MnGa_2S_4 // ФТП. 2004. Т. 38, № 2. С. 164–165.
7. Обнаружение твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}$ и создание фоточувствительных структур на их основе / И.В. Боднарь [и др.] // ФТП. 2010. Т. 44, № 1. С. 48–52.
8. Electric-field control of ferromagnetism / H. Ohno [et al.] // Nature. 2000. Vol. 408, № 6815. P. 944–950.
9. Lattice constants of vacancy-defects type silver and copper sulfide spinel compounds by Bridgman

- technique / O. Yoko [et al.] // Sci. Eng. Rev. Doshisha Univ. 1993. Vol. 34, № 2. P. 135–142.
10. Физические свойства монокристаллов $Cu_xAg_{1-x}In_5S_8$ и поверхностно-барьерных структур на их основе / И.В. Боднар [и др.] // ФТП. 1998. Т. 32, № 9. С. 1043–1046.
 11. Получение и исследование гетеропереходов $AgIn_5S_8 / (InSe, GaSe)$ / И.В. Боднар [и др.] // ФТП. 1999. Т. 33, № 7. С. 805–809.
 12. Боднар И. В., Тхан Ч. Б. Монокристаллы $Mn_{0.1}Ag_{0.9}In_{4.7}S_{7.6}$: кристаллическая структура, ширина запрещенной зоны и тепловое расширение // ФТП. 2017. Т. 51, № 8. С. 1071–1074.
 13. Боднар И. В., Тхан Ч. Б. Кристаллическая структура и ширина запрещенной зоны твердых растворов $(MnIn_2S_4)_{1-x}(AgIn_5S_8)_x$ // ФТП. 2018. Т. 52, № 8. С. 958–962.
 14. Боднар, И. В., Тхан Ч. Б. Исследование системы $MnIn_2S_4-AgIn_5S_8$ // Доклады БГУИР. 2018. № 1. С. 57–64.
 15. Боднар И. В., Тхан Ч. Б. Тепловое расширение твердых растворов $(MnIn_2S_4)_{1-x}(AgIn_5S_8)_x$ // Доклады БГУИР. 2019. № 1 (119). С. 32–37.

References

1. Magnetic and Crystallographic Studies of MIn_2S_4 (M = Mn, Fe, Co and Ni) / T. Kanomata [et al.] // J. Phys. Soc. Jpn. 1973. Vol. 34, № 2. P. 554–555.
2. Electric-field control of ferromagnetism / H. Ohno [et al.] // Nature. 2000. Vol. 408, № 6815. P. 944–950.
3. Metfessel' Z., Mattias D. Magnitnye poluprovodniki M., Mir, 1972. 405 s. (in Russ.)
4. Niftiev N.N. Termostimulirovannyye toki v monokristallah $MnIn_2S_4$ // FTP. Т. 36, № 7. С. 836–837. (in Russ.)
5. Bodnar' I.V., Rud' V.Ju., Rud' Ju.V. Fotochuvstvitel'nyye struktury na osnove monokristallov $MnIn_2S_4$ // FTP. 2009. Т. 43, № 11. С. 1549–1552. (in Russ.)
6. Niftiev N.N., Tagiev O.B. Vol't-ampernyye karakteristiki monokristallov $MnIn_2S_4$ i $MnGa_2S_4$ // FTP. 2004. Т. 38, № 2. С. 164–165. (in Russ.)
7. Obnaruzhenie tverdyh rastvorov $(In_2S_3)_x(MnIn_2S_4)_{1-x}$ i sozdanie fotochuvstvitel'nyh struktur na ih osnove / I.V. Bodnar' [i dr.] // FTP. 2010. Т. 44, № 1. С. 48–52. (in Russ.)
8. Electric-field control of ferromagnetism / H. Ohno [et al.] // Nature. 2000. Vol. 408, № 6815. P. 944–950.
9. Lattice constants of vacancy defects type silver and copper sulfide spinel compounds by Bridgman technique / O. Yoko [et al.] // Sci. Eng. Rev. Doshisha Univ. 1993. Vol. 34, № 2. P. 135–142.
10. Fizicheskie svoystva monokristallov $Cu_xAg_{1-x}In_5S_8$ i poverhnostno-bar'ernyyh struktur na ih osnove / I.V. Bodnar' [i dr.] // FTP. 1998. Т. 32, № 9. С. 1043–1046. (in Russ.)
11. Poluchenie i issledovanie geteroperehodov $AgIn_5S_8 / (InSe, GaSe)$ / I.V. Bodnar' [i dr.] // FTP. 1999. Т. 33, № 7. С. 805–809. (in Russ.)
12. Bodnar' I.V., Than Ch.B. Monokristally $Mn_{0.1}Ag_{0.9}In_{4.7}S_{7.6}$: kristallicheskaya struktura, shirina zapreshhennoy zony i teplovoe rasshirenie // FTP. 2017. Т. 51, № 8. С. 1071–1074. (in Russ.)
13. Bodnar' I. V., Than Ch. B. Kristallicheskaya struktura i shirina zapreshhennoy zony tverdyh rastvorov $(MnIn_2S_4)_{1-x}(AgIn_5S_8)_x$ // FTP. 2018. Т. 52, № 8. С. 958–962. (in Russ.)
14. Bodnar' I.V., Than Ch.B. Issledovanie sistemy $MnIn_2S_4-AgIn_5S_8$ // Doklady BGUIR. 2018. № 1. С. 57–64. (in Russ.)
15. Bodnar' I.V., Than Ch.B. Teplovoe rasshirenie tverdyh rastvorov $(MnIn_2S_4)_{1-x}(AgIn_5S_8)_x$ // Doklady BGUIR. 2019. № 1 (119). С. 32–37. (in Russ.)

Информация об авторах

Боднар И.В., д.х.н., профессор, профессор кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Чан Бинь Тхан, аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-20-76;
e-mail: chemzav@bsuir.by
Боднар Иван Васильевич

Information about the authors

Bodnar I.V., D. Sci, professor, professor of Computer Information Systems Design Department of Belarussian state university of informatics and radioelectronics.

Tran Binh Than, PG student of Information Security Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-20-76;
e-mail chemzav@bsuir.by
Bodnar' Ivan Vasil'evich