

$\alpha$  -

$(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$

\*, E. Lahderanta\*\*, A. Lashkul\*\*,

\*\*\*,

\*\*\*\*,

\*

\*

\*

, 85, , 308007, ;

\*\* Department of Mathematics and Physics, Lappeenranta University of Technology,  
PO Box 20, FIN-53852 Lappeenranta, Finland;

\*\*\* Institute of Applied Physics ASM, Academiei St., 5, MD-2028 Kishinev, Moldova;

\*\*\*\*

26, , 194021, .

. Поперечное магнетосопротивление исследовалось на установке импульсного магнитного поля в монокристаллах твёрдых растворов  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$  в магнитных полях до 20 Тл и диапазоне температур  $2.4 \leq T \leq 300$  К. Впервые наблюдались осцилляции Шубникова-де Гааза в  $\alpha$ -фазе твёрдых растворов разбавленного магнитного полупроводника  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ . Наблюдалась аномальная зависимость циклотронной эффективной массы носителей заряда от магнитного поля.

: осцилляции Шубникова-де Гааза, разбавленные магнитные полупроводники, эффективная масса.

1. . Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) или, как их еще называют полумагнитные полупроводники, представляют собой полупроводниковый материал, часть катионов в котором замещена атомами переходного металла или редкоземельного элемента. Присутствие таких атомов, беспорядочно распределенных в матрице полупроводникового кристалла, приводит к следующим взаимодействиям. Во-первых, sp-d (sp-f) обменному взаимодействию между зонными носителями и локализованными магнитными моментами этих атомов. РМП группы  $A^2B^5$  обладают наименьшим катион-катионным расстоянием в кристаллической структуре среди известных РМП (0.29 нм для  $(\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  по сравнению с 0.38 нм среди других РМП). Такие особенности строения приводят к тому, что обменные взаимодействия гораздо сильнее в  $A^2B^5$ , чем в других РМП [1]. В настоящее время интерес исследователей к РМП обусловлен попытками использовать слой РМП в качестве инжектора поляризованных по спине электронов в приборных структурах активно развивающегося нового направления электроники-спинтроники [2].

2. . Монокристаллы твердых растворов РМП  $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$  были получены методом Брижмена по технологии описанной в [3]. По результатам рентгенофазового анализа ранее нами было установлено, что монокристаллы РМП  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$   $0.4 \leq x \leq 0.7, 0 \leq y \leq 0.08$  кристаллизуются в  $\alpha$  фазе. При низких температурах ( $T < T_{ph}$ )  $\alpha$ -фаза переходит в  $\alpha'$  фазу за счёт того, что вакансии

в металлической подрешётке пространственной группы упорядочиваются по дальнему порядку, образуя сверхструктуру [4,5]. В результате исследования эффекта Шубникова-Де Гааза на установке импульсного магнитного поля были получены экспериментальные массивы данных зависимости удельного сопротивления образцов твёрдого раствора  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$   $x=0.36$ ,  $y=0.04$  от магнитного поля. Измерения проводились при температурах  $T=2.4$ ,  $4.2$ ,  $50$ ,  $77.3$ ,  $200$ ,  $300$  К в диапазоне полей от 0 до 20 Тл. Результаты эксперимента приведены на рис. 1 и 2. Осцилляции поперечного магнетосопротивления наблюдались вплоть до 77 К.

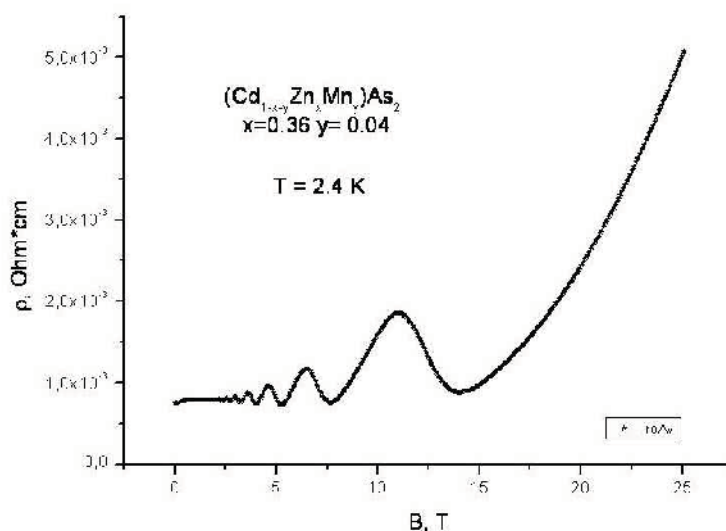


Рис. 1. Осцилляции Шубникова-Де Гааза в монокристалле  $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$  при температуре 2.4 К

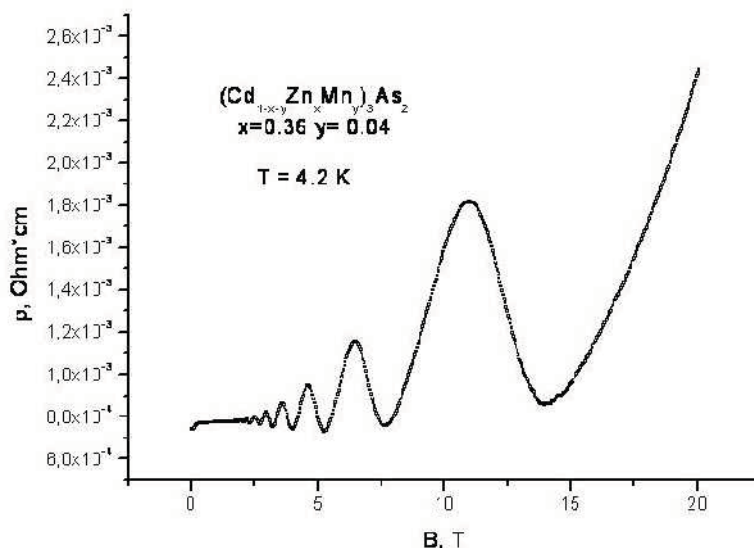


Рис. 2. Осцилляции Шубникова-Де Гааза в монокристалле  $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$  при температуре 4.2 К

3. . Общая теория квантовых осцилляционных эффектов была развита И.М. Лифшицем с сотрудниками [6,7,8]. Для расчёта циклотронной массы нами был применён метод «Двух температур». Подробно метод расчёта циклотронной массы изложен в работах [9,10]. В наших исследованиях мы впервые наблюдаем осцилляции Шубникова-де Гааза в  $\alpha$  фазе РМП  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ . Было установлено сильное возрастание циклотронной эффективной массы  $m_c$  с ростом внешнего магнитного поля. Результаты расчётов циклотронной эффективной массы  $m_c$  приведены на рис. 3.

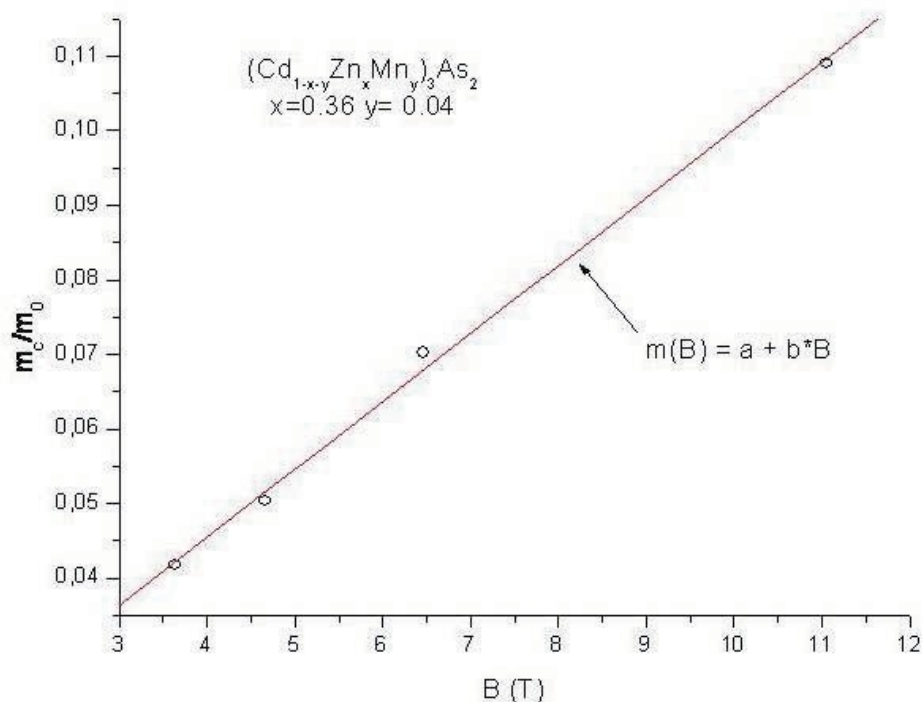


Рис. 3. Магнитополевая зависимость циклотронной массы в монокристалле РМП  $(\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.36}\text{Mn}_{0.04})_3\text{As}_2$

Ранее сильная зависимость эффективной массы от магнитного поля наблюдалась в  $\alpha$  фазе РМП  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$  составов ( $x+y=0.3$ ) со структурой соответствующей пространственной группе  $I4_1cde$ . Кроме структуры этот материал отличался меньшей шириной запрещённой зоны и зависимость циклотронной массы от магнитного поля наблюдалась только при больших концентрациях Mn в монокристаллах [10,11]. Эффект сильной зависимости циклотронной массы от магнитного поля является новым и уникальным для полупроводников. Эта зависимость может быть объяснена беспорядком и спин поляризационными эффектами в хвостах плотности локализованных состояний [12].

4. . В настоящей работе приведены результаты исследования поперечного магнетосопротивления твёрдых растворов РМП ( $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ ). Впервые наблюдались осцилляции Шубникова-де Гааза в  $\alpha$ -фазе твёрдых растворов разбавленного магнитного полупроводника  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$ . По результатам эксперимента методом двух температур были рассчитаны циклотронные массы носителей заряда. Наблюдалась аномальная зависимость циклотронной эффективной массы носителей заряда от магнитного поля. Этот эффект является новым и уникальным для полупроводников.

Настоящая работа была поддержана целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» ГК-№П895.

1. Furdyna J.K. J. Diluted Magnetic Semiconductors // in: Semicond. and Semimet., Vol. 25. – Academic Press. - Boston, 1988. – P.127.
2. Zutic I. et.al. Spintronics: Fundamentals and applications // Rev. of Modern Phys. – 2004. – 76. – P.323.
3. Laiho R., Lisunov K.G., Shubnikov M.L., Stamov V.N., Zakhvalinskii V.S. Magnetotransport of  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$  under pressure // Phys. stat. sol.(b). – 1999. – 211. – P.559.
4. Arushanov E.K. // Prog. Cryst. Growth Charact. – 1980. – 3. – P.167.
5. Zdanowicz W., Zdanowicz L. // Ann. Rev. Mater Sci. – 1975. – 5. – P.301.
6. Лифшиц И.М., Косевич А.М. // ЖЭТФ. – 1955. – 29. – С.730; 1957. – 33. – С.88.
7. Лифшиц И.М. // ЖЭТФ. – 1956. – 31. – С.774; 1957. – 32. – С.1500.
8. Косевич А.М., Андреев А.А. // ЖЭТФ. – 1960. – 38. – С.882; 1962. – 43. – С.1061.
9. Laiho R., Lisunov K.G., Lahderanta E., Stamov V.N., Zakhvalinskii V.S. Magnetization and Shubnikov-de Haas effect in diluted magnetic semiconductor  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$  // J. Appl. Phys. – 1997. – 81. – P.5151.
10. Laiho R., Lisunov K.G., Lahderanta E., Stamov V.N., Zakhvalinskii V.S. Shubnikov-de Haas effect in thermally annealed  $(\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y)_3\text{As}_2$  // J. Phys. Chem.Solids. – 1997. – 58. – P. 717.
11. Laiho R., Lisunov K.G., Stamov V.N., Zakhvalinskii V.S. // J. Phys. Chem. Solids. – 1996. – 57;1. – P.1-5.
12. Laiho R., Lisunov K.G., Lahderanta E., Stamov V.N., Zakhvalinskii V.S. // Inst. Phys. Conf. Ser. №. 152. – IOP Publishing, Bristol and Philadelphia. – 1998. – P.889.

INVESTIGATION OF SHUBNIKOV-de HAAS'  
OSCILLATIONS IN  $\alpha$  -PHASE IN DILUTE SOLUTIONS  
( $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y$ ) $_3\text{As}_2$

V.S. Zakhvalisky\*, E. Lahderanta\*\*, A.

Lashkul\*\*,

P.A. Petrenko\*\*\*, M.O. Shakhov\*\*\*\*, M.N. Zakhvaliskaya\*, E.A.  
Pilyuk\*

\*Belgorod State

University,

Pobedy St., 85, Belgorod, 308015,  
Russia.

**Abstract.** Transverse magnetic resistance was investigated by pulse magnetic field in single crystals of solid solutions ( $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y$ ) $_3\text{As}_2$ . It is done for magnetic fields up to 20 T and in the temperature range  $2.4 \leq T \leq 300$  K. For the first time, Shubnikov-de Haas's oscillations were observed in  $\alpha$  -phase of solid solutions of dilute magnetic semiconductor ( $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y$ ) $_3\text{As}_2$ . Abnormal dependence of carriers cyclotron effective mass on magnetic field is observed.

**Key words:** Shubnikov-de Haas' oscillations, dilute magnetic semiconductors, effective mass.