

# Экспериментальное определение магнитополевой зависимости низкотемпературного спонтанного намагничивания электронной системы гибридизированных состояний примесей кобальта низкой концентрации ( $\leq 0,035$ ат.%) в кристалле селенида ртути

Т.Е. Говоркова, В.И. Окулов

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Россия*

E-mail: okulov@isnet.ru

Статья поступила в редакцию 30 июля 2018 г., опубликована онлайн 26 сентября 2018 г.

Представлены результаты исследований магнитополевых зависимостей удельной намагниченности  $M(H)$  монокристалла селенида ртути с низкой концентрацией примесей кобальта (0,01–0,035) ат.% при температуре 5 К. В итоге детального прецизионного анализа полученных экспериментальных данных впервые выделены вклады спонтанного магнетизма электронной системы гибридизированных состояний донорных примесных атомов кобальта, имеющие вид кривых намагничивания с насыщением. Определенные магнитные параметры, характеризующие спонтанный спиновый магнетизм изучаемой системы, согласуются с результатами, полученными ранее при наблюдении аномалий эффекта Холла и температурных зависимостей магнитной восприимчивости, связанных с проявлением той же системы. Таким образом, в достаточно полном объеме разработано решение проблемы обоснования и описания спонтанной спиновой поляризации электронных систем примесей переходных элементов в пределе малой их концентрации.

Ключевые слова: примеси переходных элементов в полупроводниках, гибридизированные электронные состояния, низкотемпературный магнетизм, спонтанная намагниченность электронов.

Широко развитые исследования спинового упорядочения электронных систем примесей переходных элементов в полупроводниковых кристаллах, отраженные в статьях [1,2], основывались на представлениях о существовании межпримесного взаимодействия как основного механизма, обеспечивающего упорядочение. Однако в работах [3–5] были представлены теоретические аргументы и экспериментальные свидетельства возможности появления спонтанной спиновой поляризации системы донорных электронов примесных атомов без обычного межпримесного влияния только благодаря явлению гибридизации примесных электронных состояний с энергиями в полосе проводимости кристалла. Донорная часть электронов незаполненной оболочки примесного атома переходного элемента, обладающая собственной спиновой поляризацией и энергиями в интервале полосы проводимости кристалла, приобретает в силу эффекта резонансного рассеяния (гибридизации) наряду с остающейся локализацией на атоме также и возможность свободного движения электронов проводимости. Образованная при этом совокупностью примесных атомов система донорных электронов гибридизированных со-

стояний может обладать, как показано в работе [3], спонтанной спиновой поляризацией, обусловленной обменным взаимодействием электронов данной системы с учетом влияния сохраняющейся локализованной части электронной плотности примесного атома. Такой эффект достигается по сути сложением одинаковых вкладов отдельных примесных атомов в спонтанную спиновую поляризацию электронной системы, характеризуемую спиновым расщеплением энергии электрона. Данный механизм спиновой поляризации обладает определенной универсальностью, не связан с межпримесными взаимодействиями и может проявляться поэтому при очень низких концентрациях примесей и в низкоразмерных системах. Согласно результатам работы [3], часть энергии электронов гибридизированных состояний  $\beta$ , связанная со спонтанной спиновой поляризацией локализованной компоненты состояний, в простейшем приближении является линейной функцией концентрации примесей  $n_i$  и термодинамической средней величины концентрации электронов проводимости  $n_e$ :

$$\beta = \psi_1 n_i + \psi_2 n_e \quad (1)$$

с коэффициентами  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , являющимися в этом приближении константами, характеризующими межэлектронное обменное взаимодействие. Спонтанная намагниченность локализованной части электронной плотности, пропорциональная величине  $\beta$ , зависит от напряженности магнитного поля согласно кривой намагничивания, сначала отвечающей возрастанию, а затем выходу на насыщение. Формула, подобная (1), справедлива и для вклада спонтанной спиновой поляризации в энергию проводящей компоненты гибридизированных электронных состояний. Экспериментальное обнаружение в работах [4,5] — проявления спонтанной намагниченности именно в проводимости системы донорных электронов примесей переходных элементов (Fe, Co, Ni, V, Cr) в виде аномалий холловского сопротивления стало первым свидетельством возможности существования таких эффектов при низких концентрациях примесей. Затем в экспериментах по изучению температурных зависимостей примесной магнитной восприимчивости электронных систем гибридизированных состояний примесей Fe, Co и Ni [6] было показано, что в парамагнитной восприимчивости содержится вклад, который отвечает спонтанной поляризации. И вот теперь в настоящей работе поставлена цель осуществления следующего достижения в том же направлении, заключающегося в прямом измерении спонтанной намагниченности примесей низкой концентрации и ее характерной полевой зависимости.

Монокристаллы селенида ртути с относительной концентрацией примесей кобальта, не превышающей 0,035 ат.%, были выращены методом Бриджмена в Черновицком национальном университете (г. Черновцы, Украина) группой под руководством Л.Д. Паранчич. Концентрация и распределение примесей Co по объему образцов контролировались с помощью рентгеновского микроанализа. Эксперименты проведены на образцах с такими концентрациями примесей, при которых наблюдались ранее изученные эффекты гиб-

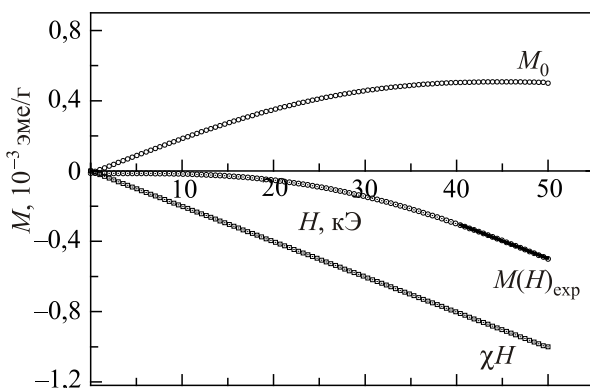


Рис. 1. Полевые зависимости удельной намагниченности  $M(H)$  для монокристалла HgSe:Co при  $T = 5$  К ( $N_{Co} = 2,5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>).  $M(H)_{exp}$  — измеренная полная намагниченность,  $M_0$  — спонтанная намагниченность,  $\chi H$  — диамагнитная часть.

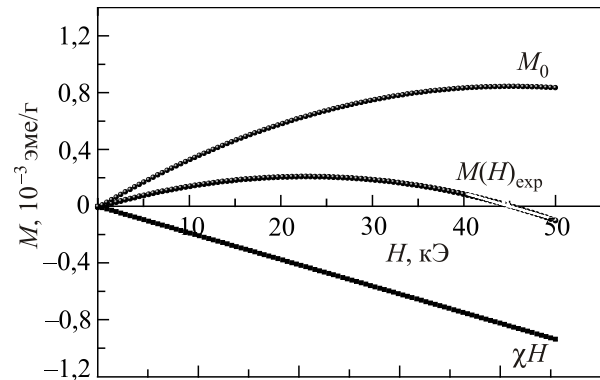


Рис. 2. Аналогичные рис. 1 полевые зависимости намагниченностей для монокристалла HgSe:Co при  $T = 5$  К ( $N_{Co} = 7 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>).

ридизации и спонтанной спиновой поляризации электронной системы. Измерения намагниченности при  $T = 5$  К в магнитном поле  $H \leq 50$  кЭ выполнены А.Ф. Губкиным на СКВИД-магнитометре MPMS-5-XL в ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН. Приводятся данные измерений, полученные на образце 1 (концентрация примесей кобальта  $N_{Co} = 2,5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>) и образце 2 ( $N_{Co} = 7 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>).

Результаты экспериментов приведены на рис. 1–3. Из полученных при измерениях зависимостей намагниченности  $M_{exp}(H)$  (рис. 1, 2) с помощью прецизионного анализа выделена линейно зависящая от напряженности магнитного поля в целом диамагнитная часть  $\chi H$ , которая с хорошей точностью оказалась одинаковой у обоих образцов. Значение диамагнитной восприимчивости  $\chi = -1,87 \cdot 10^{-7}$  эме/(г·Э), близко к известному для нелегированного кристалла селенида ртути с учетом сравнительно малого парамагнитного вклада.

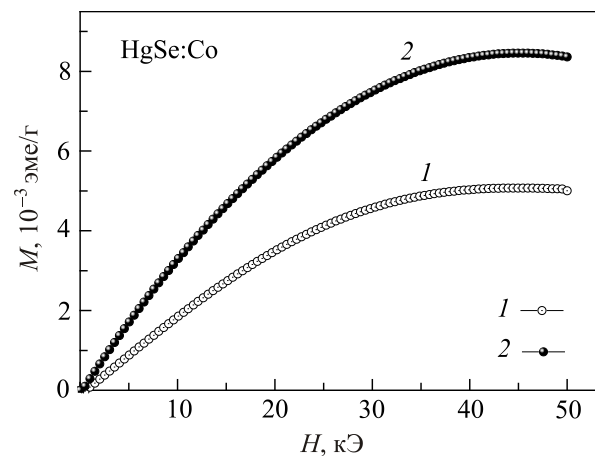


Рис. 3. Полученные кривые спонтанного намагничивания для монокристалла HgSe с низкой концентрацией примесей кобальта при  $T = 5$  К — приведенные на рис. 1, 2 зависимости для образцов.  $N_{Co} = 2,5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> (1),  $N_{Co} = 7 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> (2).

Разность

$$M_{\text{exp}}(H) - \chi H = M_0(H) \quad (2)$$

согласно ее величине, характеру полевой зависимости и сложившимся уже представлениям об исследуемой системе следует считать спонтанной намагниченностью электронной системы донорных гибридизированных состояний. Зависимость с сильным низкотемпературным насыщением является соответствующим характерным признаком. Магнитные параметры полученных зависимостей  $M_0(H)$ : намагниченность насыщения  $M_S$  (0,005, 0,008) эме/г, и магнитный момент в основном состоянии  $\mu_S$  (1,5, 0,9)  $\mu_0$ /ат. отвечают слабому ферромагнетизму.

В итоге можно считать, что результат настоящей работы открывает возможность полного серьезного описания и развития изучения феномена спонтанной спиновой поляризации низкоконцентрированных электронных систем.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Электрон» № АААА-А18-118020190098-5 и проекту № 18-10-2-6 Программы УрО РАН при поддержке РФФИ (грант № 15-02-08909).

1. T. Dietl and H. Ohno, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 187 (2014).
2. H. Ohno, *J. Appl. Phys.* **113**, 136509 (2013).
3. В.И. Окулов, Е.А. Памятных, В.П. Силин, *ФНТ* **37**, 1001 (2011) [*Low Temp. Phys.* **37**, 798 (2011)]
4. А.Т. Лончаков, В.И. Окулов, Т.Е. Говоркова, М.Д. Андрийчук, Л.Д. Паранчич, *Письма в ЖЭТФ* **96**, 444 (2012).
5. А.Т. Lonchakov, V. I. Okulov, E.A. Pamyatnykh, T.E. Govorkova, M.A. Andriichuk, L.D. Paranchich, S.B. Bobin, and V.V. Deryushkin, *Solid State Phenom.* **233-234**, 456 (2015).
6. Т.Е. Говоркова, А.Т. Лончаков, В.И. Окулов, М.Д. Андрийчук, А.Ф. Губкин, Л.Д. Паранчич, *ФНТ* **41**, 202 (2015) [*Low Temp. Phys.* **41**, 154 (2015)].

Експериментальне визначення магнітопольової залежності низкотемпературного спонтанного намагнічення електронної системи гібридизованих станів домішок кобальту низької концентрації ( $\leq 0,035$  ат.%) у кристалі селеніду ртуті

Т.Е. Говоркова, В.И. Окулов

Представлено результати досліджень магнітопольових залежностей питомої намагніченості  $M(H)$  монокристала селеніду ртуті з низькою концентрацією домішок кобальту (0,01–0,035) ат.% при температурі 5 К. У результаті детального прецизійного аналізу отриманих експериментальних

даних уперше виділено внески спонтанного магнетизму електронної системи гібридизованих станів донорних домішкових атомів кобальту, що мають вигляд кривих намагнічування з насиченням. Визначені магнітні параметри, що характеризують спонтанний спіновий магнетизм системи, яка вивчається, узгоджуються з результатами, отриманими раніше при спостереженні аномалій ефекту Холлу та температурних залежностей магнітної сприйнятливості, пов'язаних з проявом тієї ж системи. Таким чином, в досить повному об'ємі розроблено вирішення проблеми обґрунтування та опису спонтанної спигової поляризації електронних систем домішок перехідних елементів при їх малій концентрації.

Ключові слова: домішки перехідних елементів у напівпровідниках, гібридизовані електронні стани, низькотемпературний магнетизм, спонтанна намагніченість електронів.

Experimental determination of the magnetic-field dependence of the low-temperature spontaneous magnetization of the electron system of hybridized states of cobalt impurities of low concentration ( $\leq 0.035$  at.%) in a mercury selenide crystal

T.E. Govorkova and V.I. Okulov

The results of investigations of the magnetic field dependences of the specific magnetization  $M(H)$  of a mercury selenide single crystal with a low cobalt impurity concentration (0.01–0.035) at.% at a temperature of 5 K. As a result of a detailed precision analysis of the obtained experimental data the contributions of the spontaneous magnetism of the electron system of hybridized states of donor impurity cobalt atoms for the first time have the form of magnetization curves with saturation. Certain magnetic parameters characterizing the spontaneous spin magnetism of the system under study agree with the results obtained earlier in observing the anomalies of the Hall effect and the temperature dependences of the magnetic susceptibility associated with the manifestation of the same system. Thus, a solution of the problem of justifying and describing the spontaneous spin polarization of electronic systems of impurities of transition elements at their low concentration has been developed in sufficient detail.

Keywords: impurities of transition elements in semiconductors, hybridized electronic state, low-temperature magnetism, spontaneous magnetization of electrons.