

## ПЕРЕХОД В СПИНОВОЕ СТЕКЛО И АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ХОЛЛА У БЕСЩЕЛЕВОГО ПОЛУПРОВОДНИКА

*Н.Б.Брандт, В.В.Моцалков, Л.Скрбек,  
А.Н.Талденков, С.М.Чудинов*

В бесщелевых полумагнитных полупроводниках  $\text{Hg}_{1-X}\text{Mn}_X\text{Te}$  ( $0 < X < 0,075$ ) при концентрациях Mn, значительно меньших порога протекания ( $X_c = 0,17$ ), когда прямое обменное взаимодействие между ионами Mn, приводящее к образованию спинового стекла пренебрежимо мало, при  $T \lesssim 1$  К обнаружен переход в состояние спинового стекла, указывающий на существование новой низкотемпературной области на фазовой диаграмме  $X - T$ .

В области составов  $0 < X < 0,075$  полумагнитные полупроводники (ПМП)  $\text{Hg}_{1-X}\text{Mn}_X\text{Te}$  являются бесщелевыми полупроводниками. Бастардом и Левинером<sup>1</sup> было показано, что в этом случае виртуальные межзонные переходы через нулевую щель могут привести к установлению дальнедействующего обменного взаимодействия. Поэтому в интервале  $0 < X < 0,075$ , несмотря на невозможность установления РККИ – осцилляций спиновой плотности из-за малой концентрации свободных носителей тока, образование спинового стекла, с точки зрения

модели <sup>1</sup>, становится возможным. Подчеркнем, что в такой ситуации появление фазы спинового стекла ожидается при малых концентрациях Mn — существенно меньших порога протекания  $X_c = 0,17$ , определенного в модели прямого обмена на решетке типа HgTe. По модели прямого обмена спиновое стекло при  $X < X_c$  образовываться не может <sup>2</sup> и следовало бы ожидать, что ПМПП Hg<sub>1-X</sub>Mn<sub>X</sub>Te с  $X < 0,075$  останется парамагнетиком вплоть до самых низких температур. Насколько нам известно, переход в спиновое стекло ниже порога протекания  $X < X_c = 0,17$  в Hg<sub>1-X</sub>Mn<sub>X</sub>Te и в других ПМПП до сих пор не наблюдался.

В настоящей работе исследованы температурные зависимости коэффициента Холла  $R_X(T)$  и магнитной восприимчивости  $\chi(T)$  в интервале температур  $0,05 < T < 10$  К у монокристаллических образцов Hg<sub>1-X</sub>Mn<sub>X</sub>Te ( $0 < X < 0,075$ ) p-типа с концентрацией акцепторов и доноров (при  $T = 4,2$  К)  $N_A \sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и  $N_D \sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Поскольку в эксперименте могли быть обнаружены особенности, обусловленные переходом ПМПП Hg<sub>1-X</sub>Mn<sub>X</sub>Te в фазу спинового стекла, представляло интерес определить величину  $\chi(T)$  в возможно меньшем внешнем магнитном поле. С этой целью магнитная восприимчивость измерялась при помощи сквида в остаточном магнитном поле  $H \sim 0,05$  Э.

При понижении температуры в области  $T < 1$  К коэффициент Холла изменяется существенно немонотонным образом (рис.1): при  $0,2\text{К} < T < 0,8$  К на кривых  $R_X(T)$  обнаружен локальный максимум, причем его амплитуда резко возрастает с уменьшением магнитного поля, в котором измеряется холловское напряжение. Левее максимума  $R_X(T)$  не выходит на насыщение даже при самых низких температурах.

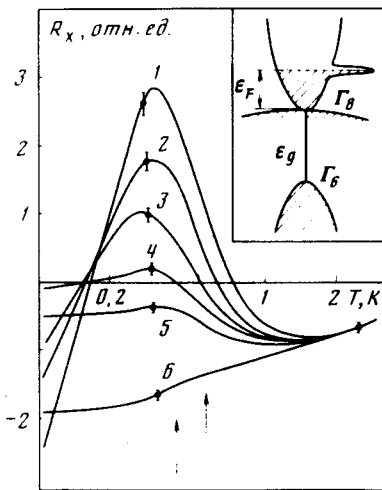


Рис.1. Зависимость коэффициента Холла  $R_X$  от температуры  $T$  для монокристаллического образца Hg<sub>0,98</sub>Mn<sub>0,02</sub>Te в различных магнитных полях: 1 — 20 Э; 2 — 50 Э; 3 — 100 Э; 4 — 150 Э; 5 — 200 Э; 6 — 500 Э. Стрелками обозначено положение максимума на кривой  $\chi(T)$  для этого же образца. На вставке показана схема зонной структуры бесщелевых ПМПП Hg<sub>1-X</sub>Mn<sub>X</sub>Te p-типа

В магнитном поле  $H > 200$  Э кривые  $R_X(T)$  становятся монотонными. Следует отметить, что вид кривых  $R_X(T)$  в области слабых магнитных полей существенно зависит от температуры, при которой производилась коммутация магнитного поля. Если магнитное поле коммутировать ниже некоторой характерной температуры порядка  $T_{max}$ , то при  $H \rightarrow 0$  полевые зависимости холловского напряжения  $U_X(H)$  для  $T \lesssim T_{max}$  стремятся не к нулю, а к некоторой конечной величине. В случае коммутации H при  $T \approx 1$  К ( $T > T_{max}$ )  $U_X \rightarrow 0$ , когда  $H \rightarrow 0$ . При такой процедуре измерения зависимости  $U_X(T)$  в слабом поле в диапазоне  $T < T_{max}$  меняются с температурой медленнее и имеют тенденцию к насыщению (рис.2).

Магнитная восприимчивость  $\chi(T)$  существенно отличается от закона  $\chi(T) \sim (T - \theta)^{-1}$  (рис.3). С понижением температуры на  $\chi(T)$  наблюдается максимум и минимум ( $T = T_{min}$ ). В области  $T < T_{min}$   $\chi(T)$  снова начинает расти при убывании температуры вплоть до  $T \approx 0,05$  К.

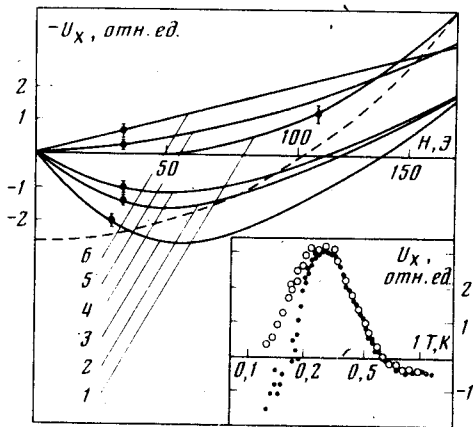


Рис.2.

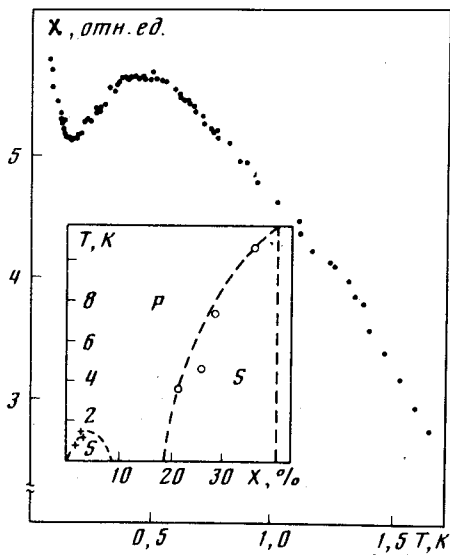


Рис.3.

Рис.2. Зависимость холловского напряжения  $U_X$  от магнитного поля  $H$  при разных температурах: 1 – 150 мК; 2 – 200 мК; 3 – 250 мК; 4 – 350 мК; 5 – 500 мК; 6 – 700 мК для образца  $\text{Hg}_{0,98}\text{Mn}_{0,02}\text{Te}$ . Коммутация поля производилась при  $T > T_{max}$  (сплошные кривые на рисунке и точки "о" на вставке) и при  $T < T_{max}$  (пунктирная кривая на рисунке и точки "•" на вставке)

Рис.3. Температурная зависимость магнитной восприимчивости  $\chi(T)$  для образца  $\text{Hg}_{0,98}\text{Mn}_{0,02}\text{Te}$ . На вставке приведена фазовая диаграмма  $T - X$ :  $P$  – парамагнитная фаза,  $S$  – спиновое стекло, "+" – данные настоящей работы, "•" – <sup>2</sup>, "о" – данные <sup>4</sup> для ПМПП  $\text{Hg}_1 - \chi \text{Mn}_x \text{Se}$

Аномалии коэффициента Холла (рис.1, 2) и магнитной восприимчивости (рис.3) характерны для перехода в спиновое стекло. Известно, что эффекты, связанные с этим переходом, весьма чувствительны к величине внешнего магнитного поля<sup>3</sup>. В слабом поле (в данном случае при  $H < 200$  Э) энергия обменного взаимодействия магнитных моментов существенно превышает их энергию взаимодействия с внешним полем. Этим, очевидно, и объясняется уменьшение амплитуды локального максимума  $R_X(T)$  при увеличении  $H$  (рис.1). Различие  $\Delta U_X$  между температурными зависимостями коэффициента Холла в слабом поле, измеренными при коммутации магнитного поля либо при  $T > T_{max}$  либо при  $T < T_{max}$  (рис.2) появляется, когда начинаются процессы локального замораживания спинов, причем величина  $\Delta U_X$  возрастает по мере понижения температуры.

Рост  $\chi(T)$  при  $T < T_{min}$  (рис.3) может быть связан с парамагнитным вкладом в  $\chi(T)$ , либо от изолированных ионов  $\text{Mn}^{2+}$ , оставшихся в "порах" бесконечного кластера, возникшего в результате перехода  $\text{Hg}_1 - \chi \text{Mn}_x \text{Te}$  в спиновое стекло, либо от локализованных магнитных моментов (ЛММ), связанных с носителями, заполняющими примесную акцепторную зону (см. вставку на рис.1). Концентрация акцепторов в изученных образцах составляет  $\sim 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что намного ниже критической моттовской ( $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Поэтому наличие ЛММ в примесной зоне представляется возможным.

Излом на кривой  $\chi(T)$ , локальный максимум на  $R_X(T)$ , его зависимость от магнитного поля и от температуры, при которой производилась коммутация поля – все это свидетельствует о переходе бесщелевого ПМПП  $\text{Hg}_1 - \chi \text{Mn}_x \text{Te}$  в спиновое стекло. Таким образом, фазовая диаграмма  $T - X$  (вставка на рис.3) оказывается более сложной, чем предполагалось ранее<sup>2,3</sup>. Фаза спинового стекла образуется не только при  $0,17 < X < 0,4$ , но и в интервале  $0 < X < 0,075$ . Правая граница этого интервала определяется открытием прямой

щели: при  $X > 0,075$  ПМПП  $\text{Hg}_{1-X}\text{Mn}_X\text{Te}$  не являются бесщелевыми и механизм <sup>1</sup> становится невозможным.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность И.М.Цидильковскому и Б.Б.Поникарову за предоставление монокристаллических образцов  $\text{Hg}_{1-X}\text{Mn}_X\text{Te}$  и обсуждение результатов.

#### Литература

1. *Bastard G., Lewiner C.* Phys. Rev., 1979, B20, 4256.
2. *Nagata S., Galazka R.R., Mullin D.P., Akbarzadeh H., Khattak G.D., Furdyna J.K., Keesom P.H.* Phys. Rev., 1980, B22, 3331.
3. *Verbeer B.H., Niewenhuys G.J., Stoker H., Mydosh J.A.* J. de Physique, 1978, 39, C6-917.
4. *Khattak G.D.* Phys. Rev., 1981, B23, 3553.

Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
9 марта 1982 г.