

## ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА СВЕРХДИАМАГНЕТИКА

В. И. Литвинов

Показано, что в синглет-триплетном токовом состоянии экситонного диэлектрика возникает ферромагнитное (ФМ) упорядочение, что исключает появление сверхдиамагнетизма. Сверхдиамагнитное (СДМ) состояние возможно лишь при учете спин-орбитального взаимодействия. В этом случае существует линия соприкосновения СДМ- и ФМ-фаз.

1. Микроскопическое обоснование феноменологической модели со спонтанными токами [1] опирается на возможность фазового перехода полуметалла или полупроводника в состояние с волной плотности тока (ВПТ,  $\Delta_{SI} \neq 0$ ) или волной плотности тока спина (ВПТС,  $\Delta_{tI} \neq 0$ ) [2].

При анализе токового состояния в связи с его сверхдиамагнитными свойствами обычно полагают, что возникает щель  $\Delta_{SI}(\mathbf{r})$ , а с нею неоднородный ток. При этом функция отклика на полное поле имеет особенность, свидетельствующую о возникновении идеального диамагнетизма. Восприимчивость  $\chi = M/H$  при этом конечна и равна  $-1/4\pi$ . Вырождением токовых состояний ( $T_{SI} \approx T_{tI}$ ) в отсутствие спин-орбитального взаимодействия при анализе СДМ-фазы пренебрегают, изучая случаи возникновения только  $\Delta_{SI}$  [3, 4].

2. Существует, однако, принципиальное отличие состояния  $\Delta_{SI} \neq 0$ ,  $\Delta_{tI} \neq 0$  от сверхдиамагнитного.

Спектр одночастичных возбуждений в токовом состоянии имеет вид

$$\omega_{1,2}^{\uparrow\downarrow}(\mathbf{k}) = \pm \sqrt{\epsilon_{\mathbf{k}}^2 + (\mathbf{k}\mathbf{p} - \Delta_{SI} \pm \Delta_{tI})^2}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{k}$  — спектр исходной двухзонной системы, знаки  $\mp$  перед корнем соответствуют индексам 1, 2, а под корнем — спиновым индексам,  $\mathbf{p}$  — матричный элемент импульса в представлении Латинжера—Кона для зон разной четности.

Наличие спинового расщепления спектра обуславливает существование спонтанного момента в упорядоченной фазе  $\Delta_{SI} \neq 0$ ,  $\Delta_{tI} \neq 0$  при ненулевом легировании;

$$M = \mu_B \sum_k \{ \text{sgn}(kp - \Delta_{SI}) [f(\omega_1^\uparrow) + f(\omega_2^\uparrow) - f(\omega_1^\downarrow) - f(\omega_2^\downarrow)] \}, \quad (2)$$

где 
$$f(x) = [e^{\beta(x - \mu)} + 1]^{-1}.$$

Ситуация аналогична таковой в экситонном ферромагнетике [5], но только в токовом состоянии. Отметим, что наличие в спектре  $k$ - $p$ -гибридизации не влияет на фазовую диаграмму, построенную в [5] для экситонного ферромагнетика.

Таким образом, при  $\Delta_{SI} \neq 0$ ,  $\Delta_{tI} \neq 0$  имеет место особенность в отклике на внешнее поле  $X$ , т. е. ферромагнетизм.

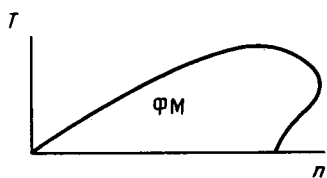


Рис. 1. Фазовая диаграмма модели со спонтанными токами при  $T_{SI} = T_{tI}$  в переменной температура — уровень легирования

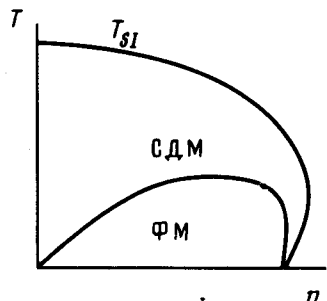


Рис. 2. Фазовая диаграмма модели при  $T_{SI} > T_{tI}$

3. В отсутствие спин-орбитального взаимодействия, снимающего вырождение токовых состояний [6], СДМ вообще возникнуть не может; переход в токовое состояние происходит на линии зарождения ФМ-фазы, которая построена в [5] (см. рис. 1).

4. Учет спин-орбитального взаимодействия делает более выгодным состояние с ВПТ ( $T_{SI} > T_{tI}$ ), при этом аналогия с экситонным ферромагнетиком позволяет построить фазовую диаграмму СДМ (см. рис. 2).

Свойства отклика на линии зарождения СДМ-фазы  $T_{SI}(n)$  исследованы в [3, 4]. При понижении температуры ( $n \neq 0$ ) происходит переход из СДМ в ФМ-фазу. Существование линии перехода СДМ в ФМ предсказано впервые в настоящей работе.

С увеличением уровня легирования температурный интервал СДМ-фазы уменьшается.

5. При определении направлений поиска веществ со СДМ-свойствами следует считаться с отмеченной выше ролью спин-орбитального взаимодействия, снимающего вырождение состояний с ВПТ и ВПТС, а также с ограниченным интервалом температур, в котором сверхдиамагнетизм должен проявляться.

Смена фаз с СДМ на ФМ при понижении температуры, обнаруженная в эксперименте, может служить дополнительным подтверждением экситонной модели спонтанных токов как механизма возникновения сверхдиамагнетизма.

В заключение отметим, что учет неоднородности токового состояния не должен сказаться на качественных результатах работы, например, в случае слабой неоднородности, размер которой много больше длины свободного пробега электрона.

Институт  
прикладных проблем механики и математики  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
13 мая 1980 г.  
После переработки  
8 августа 1980г.

### Литература

- [1] Б.А.Волков, В.Л. Гинзбург, Ю.В.Копаев. Письма в ЖЭТФ, 27, 221, 1978.
  - [2] Б.А.Волков, Ю.В.Копаев. Письма в ЖЭТФ, 27, 10, 1978.
  - [3] Б.А.Волков, Ю.В.Копаев, М.С.Нунупаров, В.В.Тугушев. Письма в ЖЭТФ, 30, 317, 1979.
  - [4] Б.А. Волков, Ю.В.Копаев, В.В.Тугушев. Письма в ЖЭТФ, 27, 615, 1978.
  - [5] Б.А.Волков, Ю.В.Копаев, А. И.Русинов. ЖЭТФ, 68, 1900, 1975;  
Б.А.Волков, А.И.Русинов, Р.Х.Тимеров. ЖЭТФ, 70, 1130, 1976.
  - [6] Б.А.Волков, В.Г.Канцер, Ю.В.Копаев. ЖЭТФ, 75, 1402, 1978.
-