

**Комментарий к статье Т. С. Альтшулер, Ю. В. Горюнова,  
А. В. Духненко, Н. Ю. Шицеваловой “Магнитное фазовое расслоение  
в гексабориде европия и его связь с кондо-взаимодействиями”  
(Письма в ЖЭТФ, т.88, в.3, с.258-262 (2008))**

*С. В. Демишев<sup>1)</sup>, А. В. Семенов, В. В. Глушков, Н. Е. Случанко*

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 13 октября 2008 г.

PACS: 75.47.–m, 75.50.–y, 75.60.–d

В комментируемой работе [1] сообщается о наблюдении расщепления линии электронного спинового резонанса (ЭСР) на частоте 9.25 ГГц при  $T < 40$  К в монокристаллах гексаборида европия,  $\text{EuB}_6$ . Анализируя это явление, авторы рассматривают три возможных объяснения: 1) включения другой Eu-содержащей кристаллической фазы в  $\text{EuB}_6$ ; 2) нерезонансные эффекты и 3) магнитное фазовое расслоение. После исключения первых двух возможностей делается вывод о том, что наблюдаемое поведение линии ЭСР является следствием магнитного фазового расслоения (см. [1], стр. 260). Далее на последнем утверждении строится физическая интерпретация сложного спектра, причиной которого является “образование связанных состояний магнитных моментов  $\text{Eu}^{2+}$  с электронами проводимости и электронами валентной зоны (дырками)”, причем “наблюдается разный тип связи между локализованными спинами европия и носителями зарядов: кондо-связь с дырками и антикондо-связь с электронами проводимости” (см. [1], стр. 262). Здесь кондо и анти-кондо-эффекты понимаются в духе теоретической работы [2], а авторы комментируемой работы рассматривают свои результаты как экспериментальное доказательство справедливости модели [2] применительно к  $\text{EuB}_6$  (см. [1], стр. 261).

Прежде всего отметим, что основной экспериментальный результат работы [1], а именно, расщепление линии ЭСР при  $T < 40$ –50 К, не является оригинальным и был опубликован ранее в нашей работе [3] в апреле 2008. В [3] было найдено, что в ЭСР на частоте 60 ГГц две линии в спектре возникают при  $T \sim 80$  К, причем температурная зависимость поля расщепления (то есть разность резонансных полей

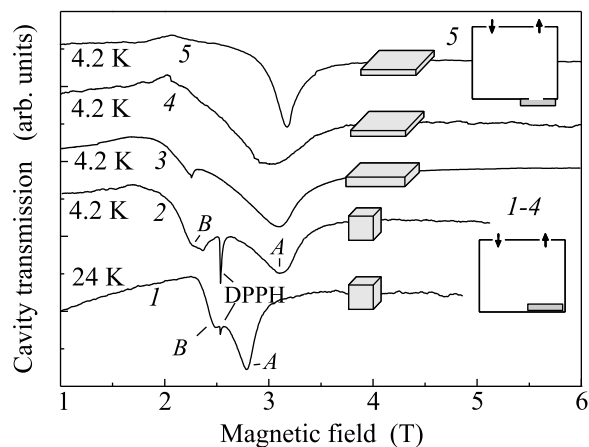
для двух линий) повторяет температурную зависимость намагниченности. Кроме того, для обеих компонент низкотемпературного расщепленного спектра было зарегистрировано нарушение стандартного линейного закона дисперсии  $\omega \sim H$  [3].

Полученные в [3] данные с учетом расширения с частотой температурного интервала, в котором наблюдаются две линии [1, 3], указывают на то, что сложная форма спектра ЭСР [1, 3] может определяться эффектами неоднородности магнитного поля и отражать влияние формы образца. Ниже мы приведем экспериментальное доказательство того, что расщепление линии ЭСР у  $\text{EuB}_6$  является следствием присутствия макроскопического градиента магнитного поля в образце.

Исследование ЭСР у монокристаллов  $\text{EuB}_6$  было выполнено с помощью цилиндрического резонатора, включенного в геометрии отражения (мода  $\text{TE}_{011}$ , частота 60 ГГц, добротность нагруженного резонатора  $\sim 10^4$ ). Подробности об экспериментальной методике приведены в [4]. Высококачественные монокристаллы  $\text{EuB}_6$  были синтезированы в Институте проблем материаловедения НАН Украины и были идентичны образцам, измерявшимся в [1].

Рассмотрим результаты эксперимента в стандартной геометрии ЭСР, когда образцы различной формы располагались внутри резонатора в области максимума переменного магнитного поля (кривые 1–4 и схема 1–4 на рисунке). Когда форма образца близка к кубической, в спектрах ЭСР при низких температурах отчетливо наблюдаются две широкие линии *A* и *B*, расстояние между которыми увеличивается при понижении температуры (см. рисунок, кривые 1, 2). Такая структура спектров ЭСР идентична опубликованной в [1, 3]. При переходе к образцу в виде тонкой плоскопараллельной пластин-

<sup>1)</sup>e-mail: demis@lt.gpi.ru



Влияние формы образца и неоднородности магнитного поля в образце на спектр ЭСР у монокристаллов  $\text{EuB}_6$  на частоте 60 ГГц (пояснения в тексте). Схематически показаны форма образцов и геометрии опытов: стандартная (1–4) и исключая неоднородность магнитного поля (5) (масштаб не соблюден). Внешнее магнитное поле параллельно кристаллографическому направлению [001]

ки наблюдается заметное подавление амплитуды линии  $B$  (рисунок, кривая 3). Дальнейшее уменьшение толщины пластинки (рисунок, кривая 4) еще больше уменьшает амплитуду этой спектральной особенности, превращая ее в “плечо” основного резонанса  $A$ . При этом во всех случаях ширина области резонансного магнитопоглощения при гелиевых температурах составляет  $\sim 1.5$  Тл (рисунок, кривые 2–4).

Поскольку намагниченность  $\text{EuB}_6$  при низких температурах не мала, эффекты размагничивания существенны, например, для исследованных образцов в форме плоскопараллельной пластинки при  $T = 4.2$  К поле размагничивания превышает 1 Тл. Таким образом, магнитное поле внутри образцов различной формы не является однородным. Данные рисунка свидетельствуют о том, что когда доля объема образца с сильной неоднородностью поля уменьшается (переход от образца в форме куба к образцу в форме плоскопараллельной пластинки), вид спектра ЭСР становится более простым, и выраженная дублетная структура не возникает.

Рассмотрим теперь ЭСР у  $\text{EuB}_6$  в случае, когда неоднородностью магнитного поля в образце можно пренебречь. В этом эксперименте дно резонатора выполнялось из тонкой фольги с небольшим отверстием, располагавшимся в области максимума переменного магнитного поля. Образец в форме плоскопараллельной пластинки, имеющий линейные размеры много больше диаметра отверстия, располагался вне

резонатора так, чтобы полностью закрыть отверстие (схема 5 на рисунке), и фиксировался токопроводящим клеем для обеспечения хорошего электрического контакта (при гелиевых температурах удельное сопротивление  $\text{EuB}_6$  составляет  $\sim 25$  мкОм·см [5]). В такой геометрии опыта края образца, где постоянное магнитное поле неоднородно, экранированы от переменного магнитного поля и магнитный резонанс соответствует только той части образца, где магнитное поле можно считать однородным.

Кривая 5 на рисунке соответствует вышеописанной геометрии опыта и получена для той же плоскопараллельной пластинки, что использовалась при стандартных внутррезонаторных измерениях (рисунок, кривая 4). Видно, что в случае однородного магнитного поля спектр ЭСР образован одной линией, ширина которой оказывается приблизительно в три раза меньше, чем в случае неоднородного поля (сравни кривые 4 и 5 на рисунке). Выполненные нами в диапазоне 1.8–200 К температурные измерения показали, что расщепление линии ЭСР в рассматриваемом случае полностью отсутствует.

Полученные данные позволяют сделать однозначный вывод о том, что расщепление линии ЭСР у  $\text{EuB}_6$  связано исключительно с макроскопическим градиентом магнитного поля в образце. Действительно, микронеоднородности, обусловленные магнитным фазовым расслоением, спин-поляронными и ферронными эффектами, должны проявляться во всех случаях, в том числе и для экспериментальной геометрии, соответствующей кривой 5 на рисунке. Проведенное нами подробное исследование показало, что эти эффекты действительно оказывают влияние на спектры ЭСР [6], но, как мы видим, не приводят к расщеплению линии ЭСР при низких и промежуточных температурах. Отметим, что исследование новых мод магнитных колебаний, возникающих в условиях неоднородности магнитного поля в образце, представляет собой интересную самостоятельную задачу, которая, однако, напрямую не связана с особенностями основного состояния и магнитного упорядочения  $\text{EuB}_6$ .

Таким образом, мы показали, что в действительности для  $\text{EuB}_6$  реализуется четвертая, не учтенная авторами [1], возможность, приводящая к наблюдаемой сложной картине спектра ЭСР. К сожалению, приходится констатировать, что эксперимент, представленный в [1], содержит серьезную методическую ошибку. Вследствие этого все выводы и интерпретация, содержащиеся в [1], не имеют надлежащего экспериментального обоснования. В частности, в настоящее время отсутствуют предпосылки для использо-

вания модели [2] для объяснения особенностей электронного спинового резонанса в гексабориде европия.

Исследование ЭСР было поддержано грантами Российского фонда фундаментальных исследований # 07-02-00243 и # 05-08-33463. Авторы признательны Н.Ю. Шицеваловой за предоставление монокристаллов  $\text{EuB}_6$ .

1. Т. С. Альтшулер, Ю. В. Горюнов, А. В. Духненко, Н. Ю. Шицевалова, Письма в ЖЭТФ **88**, 258 (2008).

2. J. Kunes and W.E. Pickett, Phys. Rev. B **69**, 165111 (2004).
3. V. V. Glushkov, A. V. Semeno, N. E. Sluchanko et al., Physica B **403**, 932 (2008).
4. С. В. Демишев, А. В. Семенов, Н. Оhta и др., ФТТ **49**, 1236 (2007).
5. В. В. Глушков, А. В. Богач, К. В. Гоньков и др., ЖЭТФ **132**, 150 (2007).
6. A. V. Semeno, V. V. Glushkov, A. V. Bogach et al., Phys. Rev. B 2008, in press.