

ЭПР СВЯЗАННЫХ ДЫРОК В GaAs⟨Mn⟩

Мастеров В. Ф., Штельмах К. Ф., Барбашов М. Н.

Приведены результаты исследования ЭПР кристаллов GaAs⟨Mn⟩ и GaAs⟨Mn, Zn⟩. Показано, что спектры ЭПР с $g=2.82$ и 5.635 соответствуют разрешенным и запрещенным переходам центра Mn ($3d^5+h$), основным состоянием которого является триплет $F=1$.

В настоящее время существуют две альтернативные модели нейтрального центра марганца в соединениях $A^{III}B^V$, занимающего A^{III} -узел в решетке кристалла [1, 2]: центр с электронной конфигурацией $3d^4$ и центр, имеющий электронную структуру $(3d^5)+h$ (дырка). Попытки зарегистрировать ЭПР нейтрального центра марганца долгое время оставались безуспешными.

В одной из наших работ [3] сообщалось о наблюдении спектра ЭПР в области слабых полей ($g \approx 5.8$), который мы отнесли к межузельному центру Mn^0 ($3d^7$) в GaAs. Однако последующий анализ экспериментальных результатов [4] показал, что скорее всего спектр с $g \sim 6$ обусловлен центром Mn ($3d^5+h$).

В данной работе приводятся результаты более полного исследования ЭПР кристаллов GaAs⟨Mn⟩. Измерения проводились на спектрометре ER220D-LR при температурах 3.8 К и выше. Исследовались те же самые образцы GaAs⟨Mn⟩, что и в [3], после длительного (более 4 лет) хранения образцов при комнатной температуре, а также кристаллы GaAs⟨Mn, Zn⟩ (также после длительного хранения). В обоих случаях при $T=4$ К наблюдался спектр ЭПР, вид которого приведен на рис. 1.

Спектр состоит из трех основных групп линий: 1) известного спектра СТС, обусловленного центрами Mn^- ($3d^5$) с $g \sim 2$; 2) спектра СТС с $g=(5.635 \pm 0.005)$ и $A=(62.0 \pm 0.4)$ Гс; 3) одиночной широкой линии с $g=(2.82 \pm 0.01)$ и $\Delta H_{pp} \sim 500$ Гс.

Форма одиночной линии различна у разных образцов; g -факторы у двух последних компонент спектра изотропны, но их интенсивности имеют угловую зависимость (рис. 2).

Полученные результаты позволяют предположить, что оба спектра связаны с дырками, поскольку интенсивности спектров 2 и 3 коррелируют с концентрацией дырок в материале. Наличие СТС в спектре 2 свидетельствует о том, что в этом случае дырка связана с центром марганца. Отношение $g_2/g_3=2$ указывает на то, что этот спектр обусловлен «запрещенными» переходами, а линия 3 — разрешенными переходами центра Mn ($3d^5+h$). Однако возникает вопрос: почему отсутствует СТС в спектре разрешенного перехода и почему его интенсивность в исходных образцах оказывается сравнимой с интенсивностью спектра «запрещенных» переходов? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим энергетическую структуру центра Mn ($3d^5+h$).

Обменное взаимодействие дырки, имеющей полный момент j , с марганцем, имеющим электронную конфигурацию $3d^5$ и спин $s=5/2$, будем считать антиферромагнитным [5]. В результате центр можно характеризовать полным моментом $F=s-j$, при этом нижним состоянием оказывается триплет с $F=1$. Первое возбужденное состояние центра с $F=2$ расположено выше на величину удвоенного интеграла J , значение которого оценивается равным 4 мэВ [6],

что значительно больше энергии зеемановского расщепления. Поэтому можно положить при $T \sim 4$ К эффективный момент центра $\bar{F}=1$ (рис. 3, а). При $J \gg \gg g\beta H$ g -фактор триплета записывается в виде

$$\tilde{g}_F = \frac{1}{2}(g_s - \tilde{g}_j) + \frac{s(s+1) - j(j+1)}{2\bar{F}(\bar{F}+1)}(g_s + \tilde{g}_j),$$

где g_s — g -фактор электронной конфигурации $3d^5$, и его можно принять равным 2; \tilde{g}_j — g -фактор дырки; $s=5/2$; $j=3/2$. Если принять g -фактор дырки равным -1 (без учета спин-орбитального расщепления валентной зоны), то $\tilde{g}_F=11/4$, что близко к наблюдаемому значению $g_2=2.82$.

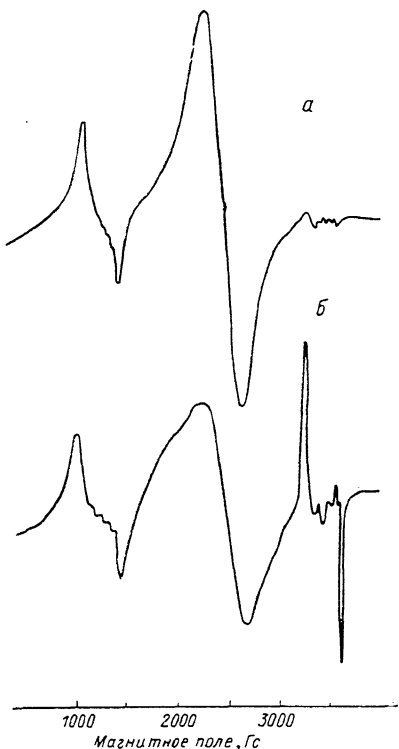


Рис. 1. Спектр ЭПР кристаллов GaAs<Mn,Zn> (а) и GaAs<Mn> (б).

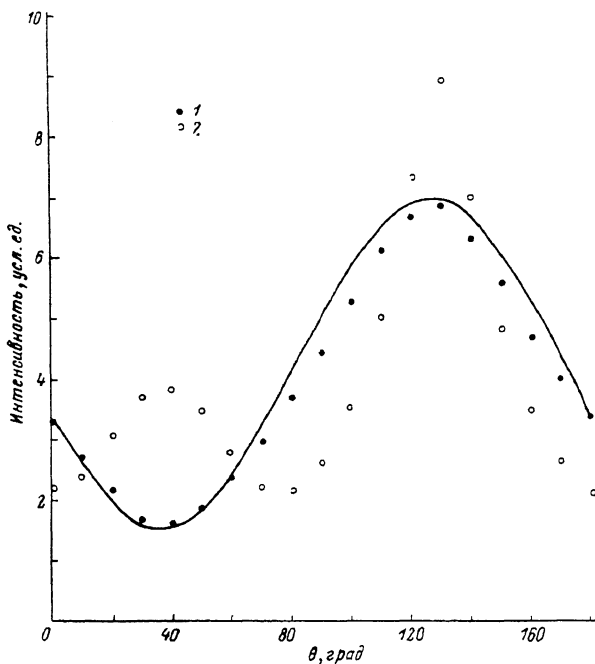


Рис. 2. Угловая зависимость интенсивности спектров ЭПР.

Сплошная линия — зависимость $(1-3 \cos^2 \theta)$. Спектры 1 — 2, 2 — 3.

В реальных кристаллах всегда присутствуют случайные локальные напряжения, которые снимают вырождение триплета, как это показано на рис. 3, б. Для аксиальных искажений с определенными D и z спиновый гамильтониан может быть записан в виде

$$\mathcal{H} = 3(H\tilde{g}_F) + D\{F_z^2 - 1/3\bar{F}(\bar{F}+1)\},$$

где в общем случае \tilde{g} является тензором, D — величина расщепления в нулевом поле, z — ось искажения.

На самом деле, как уже отмечали, в реальном кристалле существуют напряжения, случайные как по направлению, так и по величине начального расщепления, поэтому энергетическая структура центра должна выглядеть так, как она представлена на рис. 3, в. Как видно из рисунка, линия разрешенного перехода при этом уширяется значительно больше, чем линия «запрещенного» перехода. При $D \sim g\beta H$ разрешенный переход вообще не наблюдается из-за уширения линии ЭПР. Очевидно, длительное хранение образцов при комнатной температуре приводит к частичному снятию внутренних локальных напряжений в образцах, в результате чего наблюдается разре-

шенный переход с $g=2.82$, хотя СТС, обусловленная ядерным спином марганца $s=5/2$, не разрешается. Неоднородность внутренних напряжений слабее сказывается на уширении линий «запрещенных» переходов, поэтому спектр слабой интенсивности с $g_3=5.635$ наблюдается даже в исходных (свежеприготовленных) кристаллах [3]. По-видимому, он обусловлен той частью центров, которые находятся в относительно слабо искаженных внутренних полях.

Как известно, вероятность резонансных переходов определяется в этом случае параметром $D/g\beta H$. Поэтому для объяснения угловой зависимости интенсивности спектров ЭПР необходимо предположить, что величина начального расщепления D различна для различных кристаллографических направ-

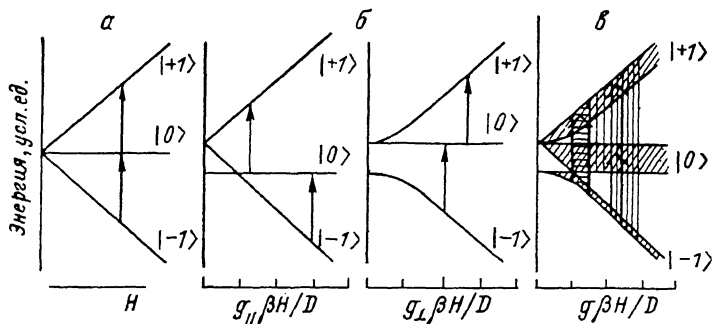


Рис. 3. Диаграмма энергетических уровней триплета $\tilde{F}=1$ в магнитном поле.

а — в отсутствие искажений, б — при аксиальном искажении для двух направлений поля $H \parallel z$ и $H \perp z$, в — при наличии случайных по направлению локальных напряжений при $D=\text{const}$.

лений кристалла, т. е. схема расщепления состояния кристалла $F=1$ сложнее, чем представленная на рис. 3, в.

Наличие большого числа разрешенных переходов (в полосе сложных расщеплений, в том числе в области слабых полей, при которых переходы не регистрируются) приводит к малому времени спин-решеточной релаксации. Поэтому спектр ЭПР наблюдается только при низких температурах. При повышении температуры до ~ 8 К оба спектра 2 и 3 уширяются и становятся ненаблюдаемыми.

Таким образом, нам представляется, что результаты исследования ЭПР кристаллов GaAs<Mn> p-типа проводимости с релаксированными (частично) внутренними напряжениями свидетельствуют в пользу существования центра Mn ($3d^5$)+h как нейтрального центра марганца, в котором существует антиферромагнитный обмен между дыркой и $3d^5$ -оболочкой марганца.

В заключение мы выражаем благодарность С. Б. Михрину за предоставление образцов и И. Л. Лихолиту за помощь при проведении эксперимента.

Л и т е р а т у р а

- [1] Мастеров В. Ф. — ФТП, 1984, т. 18, в. 1, с. 3—23.
- [2] Clerjaud V. J. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1985, v. 18, p. 3615—3661.
- [3] Мастеров В. Ф., Михрин С. Б., Саморуков Б. Е., Штельмах К. Ф. — ФТП, 1983, т. 17, в. 7, с. 1259—1264.
- [4] Михрин С. Б. — Автореф. канд. дис. ЛПИ. Л., 1985.
- [5] Карлик И. Я., Меркулов И. А., Мирлин Д. Н., Никитин Л. П., Перель В. И., Сапега В. Ф. — ФТТ, 1982, т. 24, в. 12, с. 3550—3557.
- [6] Аверкиев Н. С., Гуткин А. А., Осипов Е. Е., Рециков М. А. — ФТП, 1987, т. 21, в. 10, с. 1847—1853.