

## СПЕКТР ЭПР И ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ $Fe^{2+}$ В КОРУНДЕ

О. В. Адаменко, Е. М. Ганапольский

Интерес к иону  $Fe^{2+}$  в корунде проявляется давно [1, 2] и обусловлен он несколькими причинами. Как было установлено ранее [3, 4] методом акустического парамагнитного резонанса (АПР), этот ион обладает сильным электрон-фононным (ЭФ) взаимодействием, с которым связана большая скорость спин-решеточной релаксации при низких температурах. Поэтому присутствие его в рубине даже в весьма малой концентрации, в качестве примеси, обычно сопутствующей активным мазерным ионам  $Cr^{3+}$ , может повлиять за счет кросс-процесса на скорость спин-решеточной релаксации  $Cr^{3+}$  [2] и существенно ухудшить характеристики мазерного кристалла. Для того чтобы определить области спектров, где могут реализоваться подобные кросс-процессы, необходимы надежные и точные сведения о структуре спектра основного мультиплета  $Fe^{2+}$ , выяснить которые с помощью стандартного метода ЭПР сантиметрового диапазона оказалось невозможным из-за запрета магнитодипольного перехода между уровнями возбужденного дублета  $M_s = \pm 1$ . С помощью АПР, в котором этот запрет снимается, из анализа температурной зависимости интенсивности резонансной линии была приблизительно определена величина начального расщепления  $D$  уровней мультиплета. В то же время этим методом было установлено, что система трех уровней основного мультиплета с эффективным спином  $S=1$ , обладающая сильной ЭФ связью, подходит для реализации фазерных эффектов усиления и генерации гиперзвука, обусловленных фононными переходами между уровнями возбужденного дублета  $M_s = \pm 1$  при накачке (электромагнитной или гиперзвуковой) между основным и возбужденным уровнем. Однако для точного определения начального расщепления, величины ЭФ взаимодействия и соответственно скорости релаксации, необходимых для реализации фазерного эффекта, измерений АПР оказалось недостаточно.

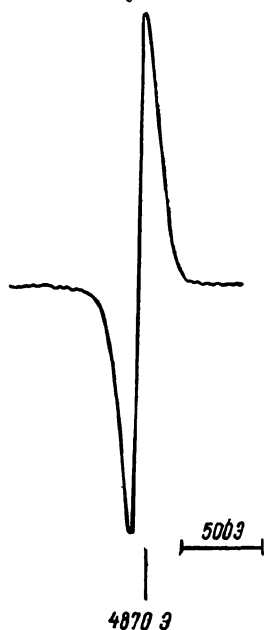
В связи с этим для исследования структуры спектра и ЭФ взаимодействия  $Fe^{2+}$  был применен комплексный метод, включающий измерения АПР на частоте перехода между уровнями возбужденного дублета  $M_s = \pm 1$  на частоте 9.4 ГГц и ЭПР между основным и возбужденным уровнем на частоте 137.5 ГГц. С помощью этого метода при температуре 4.2 К был впервые обнаружен спектр  $Fe^{2+}$  в корунде, измерено начальное расщепление основного мультиплета и определены компоненты тензора ЭФ взаимодействия, а также характерное время релаксации  $T_1$  при гелиевых температурах.

Остановимся кратко на особенностях эксперимента, связанных с применением комплексного метода. Образец кристалла корунда с  $Fe^{2+}$  должен удовлетворять требованиям, связанным с возбуждением в нем продольной гиперзвуковой волны и измерением ее резонансного поглощения (АПР), с одной стороны, и измерением резонансного поглощения электромагнитного поля в двухмиллиметровом радиодиапазоне, с другой. В связи с этим образец был выполнен в виде стержня круглого сечения диаметром 2.6 мм и длиной 15 мм. Геометрическая ось стержня совпадала с его кристаллографической осью симметрии второго порядка. При исследованиях АПР использовалась эхо-импульсная методика, описанная ранее [5], а для измерений ЭПР был создан спектрометр двухмиллиметрового радиодиапазона с однородным магнитным полем до 30 кЭ. Особенность его заключалась в том, что образец, в котором было измерено резонансное поглощение гиперзвука, помещался в круглый волновод и полностью заполнял

поперечное сечение. Так как корунд обладает значительной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon=10$ ), то кристаллический корундовый стержень, имеющий плоскопараллельные торцы, необходимые для возбуждения гиперзвука, выполнял в волноводе роль электромагнитного резонатора спектрометра ЭПР. Для последнего была выбрана схема прямого усиления с синхронным детектированием на частоте модуляции магнитного поля (1 кГц). В качестве источника СВЧ был применен генератор дифракционного излучения [6], обладающий высокой стабильностью по частоте и амплитуде колебаний, чем в значительной мере обеспечивалась достаточно высокая чувствительность ЭПР спектрометра:  $10^{13}$  спин. $\cdot$ Э $^{-1}$ . В качестве

приемника электромагнитного излучения служил детектор на основе компенсированного InSb, располагавшийся в гелиевом криостате на конце волновода. При определении концентрации  $Fe^{2+}$ , необходимой для измерения компонент тензора ЭФ взаимодействия, использовался кристалл андалузита с  $Fe^{3+}$ , который находился в волноводе рядом с корундом, содержащим  $Fe^{2+}$ . Поскольку ширина линии ЭПР  $Fe^{3+}$  в андалузите приблизительно такая же, как и  $Fe^{2+}$  в корунде, а расположения их в магнитном поле при подходящей ориентации андалузита близки между собой, то по известной концентрации  $Fe^{3+}$  в андалузите, определенной стандартным методом ЭПР в сантиметровом радиодиапазоне, можно было достаточно точно определить концентрацию  $Fe^{2+}$  в корунде.

Обнаруженный спектр ЭПР  $Fe^{2+}$  в корунде показан на рисунке. Он соответствует параллельной ориентации магнитного поля и оси симметрии



Линия ЭПР  $Fe^{2+}$  в корунде;  $f=137.5$  ГГц.

третьего порядка. Из данных ЭПР было непосредственно определено начальное расщепление основного мультиплета:  $D=(3.77 \pm 0.01)$  см $^{-1}$ . Оказалось, что ширина линии для перехода  $|0\rangle \leftrightarrow |+1\rangle$  составляет 250 Э, что на порядок больше, чем для линии АПР на переходе между возбужденными уровнями. Это связано, по-видимому, с влиянием остаточных деформаций кристалла на структуру спектра в условиях сильного ЭФ взаимодействия. Резонансное поглощение гиперзвука при 4.2 К составляло 1.1 дБ/см при концентрации  $Fe^{2+}$ , равной  $(1.3 \pm 0.1) \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ . Комбинация компонент ЭФ взаимодействия для связи с продольными упругими колебаниями [7], определенная на основе этих данных, составляет  $1.2 \cdot 10^3$  см $^{-1}$ , с поперечными —  $8.6 \cdot 10^2$  см $^{-1}$ . Отсюда для времени релаксации  $T_1$  (4.2 К) было получено  $10^{-6}$  с. Эти результаты и основанные на них расчеты температурной зависимости  $T_1(T)$  непосредственно подтверждают полученные ранее данные о характере релаксационных процессов  $Fe^{2+}$  при низких температурах [4].

#### Л и т е р а т у р а

- [1] *Stewens K. W. H., Walch D. J. Phys. C.: Sol. St. Phys.*, 1968, vol. 1, N 6, p. 1554—1562.
- [2] *Raoult G., Gavaix A., Vasson A. M. Phys. Rev. B: Sol. St.*, 1971, vol. 4, N 11, p. 3849—3853.
- [3] *Ганапольский Е. М. Изв. АН СССР*, 1971, т. 35, № 5, с. 955—960.
- [4] *Ганапольский Е. М. ФТТ*, 1975, т. 17, № 1, с. 67—75.
- [5] *Ганапольский Е. М. ПТЭ*, 1969, № 6, с. 214—215.
- [6] *Шестопалов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. т. 2. Источники. Элементная база. Радиосистемы. Киев: Наукова Думка*, 1985, 256 с.
- [7] *Ганапольский Е. М., Маковецкий Д. Н. ФТТ*, 1973, т. 15, № 8, с. 2447—2453.