

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО СПЕКТРА $YFeO_3$ МЕТОДОМ СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

*А.А.Волков, Ю.Г.Гончаров, Г.В.Козлов, К.Н.Кочарян,
С.П.Лебедев, А.С.Прохоров, А.М.Прохоров*

Измерен спектр комплексной магнитной проницаемости антиферромагнитного $YFeO_3$ в диапазоне частот $\nu = 6 \div 20 \text{ см}^{-1}$ с разрешением $0,001 \text{ см}^{-1}$ в нулевом внешнем магнитном поле при $T = 78 \div 600 \text{ К}$. Изучено поведение двух магнитных мод, которые при $T = 300 \text{ К}$ располагаются на 10 и $17,6 \text{ см}^{-1}$ и имеют ширины соответственно $0,1$ и $0,05 \text{ см}^{-1}$.

Субмиллиметровый диапазон длин волн ($\lambda \sim 3 - 0,3 \text{ мм}$), куда попадают линии резонансного поглощения многих антиферромагнетиков, считается трудным для проведения спектроскопических исследований. Это относится и к спектроскопии ИК поглощения, однако справедливо лишь до тех пор, пока речь идет о традиционных методах измерений, используемых в СВЧ и ИК диапазонах. Если же принять во внимание быстро прогрессирующую в последние годы технику субмиллиметровой (СБММ) спектроскопии, основанную на применении в качестве источников излучения перестраиваемых монохроматических генераторов типа ламп обратной волны (ЛОВ-спектроскопия), то ситуация, по нашему мнению, является прямо противоположной. В методическом отношении именно СБММ диапазон становится наиболее удобным для проведения спектроскопических работ. Оказалось, что здесь удастся сочетать основные достоинства техники СВЧ и ИК спектроскопии. С одной стороны, высокое "качество" рабочего излучения — его достаточно большая интенсивность ($\sim 10 \text{ мВт}$), высокая монохроматичность ($\Delta \nu / \nu \sim 10^{-5}$) и степень поляризации ($\sim 99,99\%$) — позволяет проводить измерения с высоким разрешением и отношением сигнал/шум. С другой стороны, как и в ИК спектроскопии, измерения проводятся в свободном пространстве с помощью простых измерительных схем. Это дает возможность, во-первых, в широких пределах непрерывно перестраивать частоту рабочего излучения, и, как

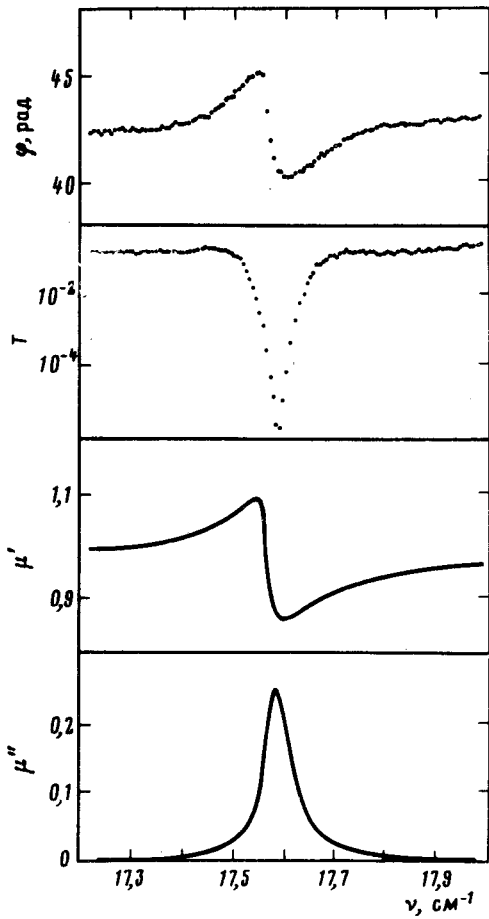


Рис. 1

Рис. 1, а, б – Субмиллиметровые спектры фазового сдвига волны при прохождении $\varphi(\nu)$ и энергетического коэффициента пропускания $T(\nu)$ пластинки YFeO_3 толщиной 0,818 мм, снятые при $h \parallel M$ в области высокочастотной ветви антиферромагнитного резонанса. Внешнее магнитное поле отсутствует, температура комнатная. в, г – Спектры магнитной проницаемости $\mu'(\nu)$ и $\mu''(\nu)$, рассчитанные на основе спектров $T(\nu)$ и $\varphi(\nu)$

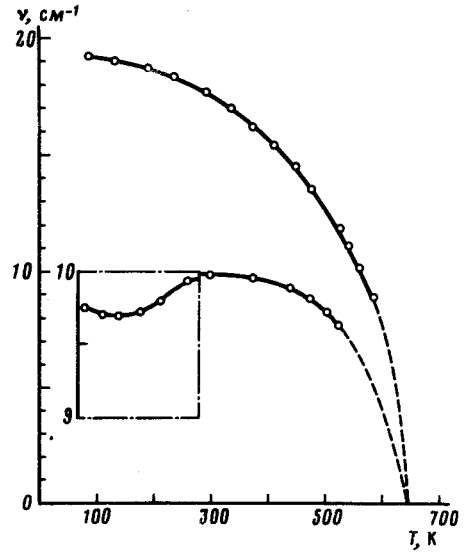


Рис. 3. Температурные зависимости частот двух магнитных мод в YFeO_3 ($T_N = 648 \text{ K}$)

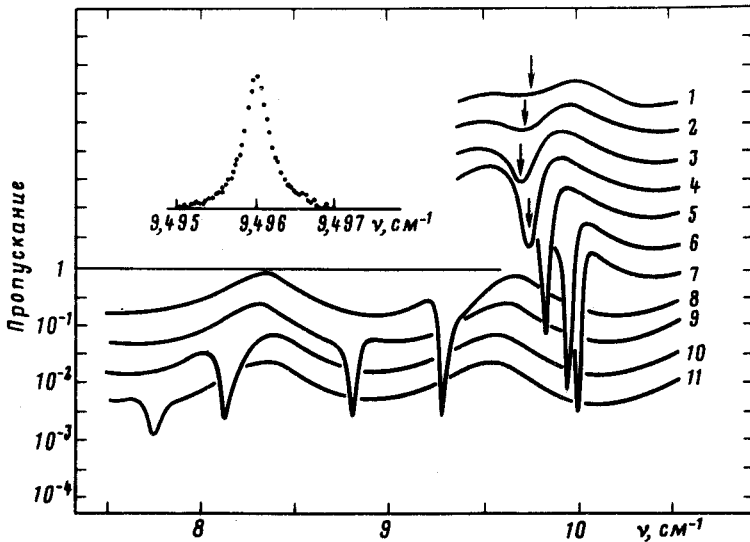


Рис. 2. Спектры пропускания $T(\nu)$ пластинки YFeO_3 толщиной 0,818 мм, снятые при разных температурах (1 – 78, 2 – 111, 3 – 137, 4 – 175, 5 – 210, 6 – 256, 7 – 296, 8 – 437, 9 – 473, 10 – 506, 11 – 523 K) в ориентации $h \perp M$ в области низкочастотной ветви антиферромагнитного резонанса. Внешнее магнитное поле отсутствует. Плавные осцилляции на кривых обусловлены интерференцией волн внутри образца. В верхнем левом углу приведена запись пропускания открытого резонатора Фабри – Перо, демонстрирующая разрешающую способность спектрометра (ширина линии $\sim 0,001 \text{ cm}^{-1}$, пропускание в максимуме – 2%)

следствие, регистрировать измеряемые величины не в отдельных частотных точках, а в виде спектров. Во-вторых, простое распределение поля в рабочей волне очень сильно упрощает и организацию измерений, и все последующие расчеты. Регистрация спектров становится возможной в реальном масштабе времени.

В той или иной степени возможности СБММ-спектроскопии уже использовались при исследовании свойств магнетиков ¹⁻³. Во всей же совокупности перечисленными достоинствами обладают сейчас СБММ ЛОВ-спектрометры типа "Эпсилон" ⁴. Первоначально эти приборы предназначались для проведения диэлектрических измерений на СБММ волнах, т. е. для записи спектров диэлектрической проницаемости веществ ⁵. Теперь, однако, нам представляется возможным распространить эту экспериментальную методику и на случай веществ, обладающих магнитными свойствами ($\mu^* \neq 1$).

На ЛОВ-спектрометре "Эпсилон -2" в диапазоне частот $6 - 20 \text{ см}^{-1}$ в интервале температур $78 - 600 \text{ K}$ нами исследовался антиферромагнитный кристалл YFeO_3 . Плоскопараллельные пластинки YFeO_3 a -среза просвечивались излучением при двух ориентациях вектора магнитного поля \mathbf{h} относительно вектора намагниченности образца \mathbf{M} (случаи $\mathbf{h} \perp \mathbf{M}$ и $\mathbf{h} \parallel \mathbf{M}$). Для нескольких образцов разных толщин при нулевом внешнем магнитном поле были сняты спектры энергетических коэффициентов пропускания T и соответствующих фазовых сдвигов волны φ . Типичные результаты этих измерений представлены на рис. 1 (a и b) и рис. 2.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает следующее:

1) В обеих ориентациях ($\mathbf{h} \perp \mathbf{M}$ и $\mathbf{h} \parallel \mathbf{M}$) в СБММ спектрах YFeO_3 наблюдаются моды антиферромагнитного резонанса (рис. 1 и рис. 2). В первом случае — это уже известная линия на 10 см^{-1} (при комнатной температуре) ⁶, во втором — более высокочастотная линия (на 17 см^{-1}), которая до сих пор в ИК спектрах не наблюдалась. Она, как и линия на 10 см^{-1} , видна в спектрах комбинационного рассеяния света ⁷, и в связи с этим интересно отметить, что проявление КР — активных мод в ИК спектрах centrosymmetric кристалла, каким является YFeO_3 , происходит вопреки правилу альтернативного запрета, справедливому для электрических взаимодействий. Налицо доказательство магнитной природы наблюдаемых мод.

2) На основании оптических формул по спектрам $T(\nu)$ и $\varphi(\nu)$ рассчитываются спектры магнитной проницаемости $\mu'(\nu)$ и $\mu''(\nu)$ (рис. 2). Значение диэлектрической проницаемости (в данном случае $\epsilon' = 22,6$, $\epsilon'' = 0,08$), необходимое для этих расчетов, определяется из тех же спектров $T(\nu)$ и $\varphi(\nu)$ вне линии магнитного резонанса. При соответствующем программном обеспечении спектрометра спектры $\mu'(\nu)$ и $\mu''(\nu)$ могут регистрироваться в реальном масштабе времени. До сих пор измерения такого типа оптическими методами, насколько нам известно, не проводились.

3) Важным моментом в данном исследовании является высокая разрешающая способность использованного метода — $0,001 \text{ см}^{-1}$, в то время, как предшествующие работы по регистрации частотных спектров магнетиков в СБММ диапазоне волн ограничивались разрешениями не более $0,1 \text{ см}^{-1}$ ^{6, 7}. Это позволило нам, по-видимому, впервые на столь высоких частотах, наблюдать реальный контур линии антиферромагнитного резонанса и проследить за его изменением в процессе изменения температуры (рис. 2). Отметим, в частности, что ширины линий антиферромагнитных мод на 10 и 17 см^{-1} при комнатной температуре составили соответственно $0,1$ и $0,05 \text{ см}^{-1}$. При охлаждении YFeO_3 до температуры жидкого азота высокочастотная мода сужается еще в несколько раз. В поведении же низкочастотной моды при этом наблюдается весьма тонкий эффект — немонотонность зависимостей ее частоты, ширины и интенсивности от температуры (рис. 2 отмечен стрелками, на рис. 3 дан в укрупненном масштабе). Все явление по частоте разворачивается в пределах $0,3 \text{ см}^{-1}$.

В заключение авторы выражают благодарность А.С.Боровику-Романову, Л.А.Прозоровой, А.М.Кадомцевой за плодотворные обсуждения.

Литература

1. *Виноградов Е.А., Ирисова Н.А., Мандельштам Т.С., Прохоров А.М., Шмаонов Т.А.* ПТЭ, 1967, №5, 192.
2. *Prokhorov A.S., Radashevsky E.G., Velikov L.V.* IEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. V MTT-22, 1974, №12, 1064.
3. *Крафтмахер Г.А., Мериакри В.В., Червоненкис А.Я., Щеглов В.И.* ЖЭТФ, 1972, 63, 1858.
4. *Волков А.А., Козлов Г.В., Лебедев С.П., Мальцев В.И.* Препринт ФИАН №80, 1981.
5. *Козлов Г.В., Волков А.А., Лебедев С.П.* УФН, 1981, 135, 515.
6. *Великов Л.В., Витвинин Е.А., Иванникова Г.Е., Игошин Ф.Ф., Кирьянов А.П., Маркианов С.С.* ФТТ, 1980, 22, 3612.
7. *White R.M., Nemanich R.J., Herring C.* Phys. Rev. B., 1982, 25, 1822.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 декабря 1983г.