

## Резонансные магнитные свойства монокристаллов гадолиний-галлиевого граната

А. Р. Бедюх, В. В. Данилов, А. Ю. Нечипорук, В. Ф. Романюк

Киевский университет им. Тараса Шевченко, Украина, 252022, г. Киев, пр. Глушкова, 2, корп. 5  
E-mail: chipa@boy.rpd.univ.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 28 апреля 1998 г., после переработки 12 октября 1998 г.

Обсуждаются результаты экспериментального исследования резонансных магнитных свойств монокристаллов гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) в диапазоне частот 1,6–9,3 ГГц и температур 4,2–300 К. Установлено, что магнитные потери ГГГ определяются начальным расщеплением энергетических уровней иона гадолиния в кристаллической решетки граната и дипольным уширением. Этим объясняется ширина и форма линии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) кристалла ГГГ, асимметрия которой особенно сильно проявляется на низких частотах. Магнитные потери ГГГ возрастают с увеличением частоты и понижением температуры. Обнаружено значительное увеличение ширины линии ЭПР с понижением температуры, вызванное наличием быстро релаксирующих примесей.

Обговорюються результати експериментального дослідження резонансних магнітних властивостей монокристалів гадоліній-галієвого гранату (ГГГ) в діапазоні частот 1,6–9,3 ГГц і температур 4,2–300 К. Встановлено, що магнітні втрати ГГГ визначаються початковим розщепленням енергетичних рівней іонів гадолінію в кристалічній ґратці гранату та дипольним уширенням. Цим пояснюється ширина та форма лінії електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) кристалу ГГГ, асиметрія якої особливо сильно проявляється на низьких частотах. Магнітні втрати ГГГ зростають із збільшенням частоти і пониженням температури. Встановлено суттєве збільшення ширини лінії ЕПР з пониженням температури, що спричинено наявністю швидко релаксуючих домішок.

PACS: 76.30.-v

Монокристаллы ГГГ  $Gd_3Ga_5O_{12}$  широко применяются в качестве подложек для выращивания эпитаксиальных пленок магнитных гранатов различных составов. В частности, эпитаксиальные пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ)  $Y_3Fe_5O_{12}$  и галлий замещенного ЖИГ являются материальной основой приборов спин-волновой электроники СВЧ диапазона.

Несмотря на то что влияние магнитных свойств подложки ГГГ на затухание и дисперсию магнито-статических спиновых волн (МСВ) в широком диапазоне температур ранее нами уже рассматривалось [1–3], подробное комплексное исследование магнитных потерь ГГГ и их природы не проводилось. Цель настоящей работы — представить уточненные сведения о магнитных резонансных свойствах отечественных кристаллов ГГГ, выращенных методом Чохральского.

Исследование диэлектрической и магнитной проницаемости монокристаллических образцов

ГГГ проводилось с помощью стандартного резонаторного метода. Чувствительность метода была повышена за счет оригинальной аппаратуры, фиксирующей изменение характеристик резонатора и позволяющей регистрировать самопроизвольное изменение частоты с точностью до 50 кГц и добротности до 2% [4]. Измерения диэлектрической проницаемости проводились на частоте 9,3 ГГц в резонаторе с типом колебаний  $E_{020}$ , магнитной — в резонаторе с типом колебаний  $H_{011}$  для образцов размерами  $2 \times 2 \times 75$  мм и  $2 \times 1 \times 75$  мм.

Действительная часть магнитной проницаемости  $\mu'$  монокристалла ГГГ составила  $1,075 \pm 0,001$  в нулевом внешнем магнитном поле и  $1,079 \pm 0,001$  при  $H_0 = 5$  кЭ; диэлектрическая проницаемость ГГГ в рассматриваемом диапазоне составила  $\epsilon = 13,1 \pm 0,1$ .

Исследования полевых зависимостей магнитных потерь  $\mu''$  в диапазоне частот  $f = 1,62$ – $2,90$  ГГц (см. рис. 1) проводились при комнатной темпера-

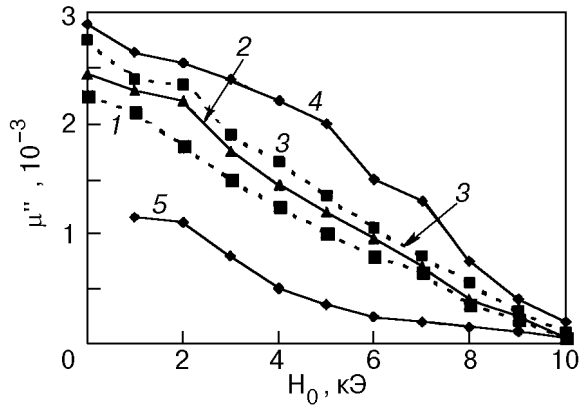


Рис. 1. Магнитные потери монокристалла ГГГ при комнатной температуре на частотах 1,62 (1), 1,89 (2), 2,25 (3) и 2,90 (4) ГГц; кривая 5 – данные работы [5] (частота 2,1 ГГц).

туре на радиоспектрометре РЭ1301, переоборудованном для работы в соответствующем диапазоне частот.

На частоте 9,3 ГГц магнитные потери  $\mu''$  монокристалла ГГГ определяли при комнатной температуре и температуре жидкого азота, а ширину линии ЭПР  $\Delta H$  – в диапазоне температур 4,2–300 К. Полевые зависимости  $\mu''$  в этом диапазоне частот приведены на рис. 2. На рис. 1, 2 представлены также зависимости  $\mu''(H_0)$  из работы [5] (кривые 5 и 3 соответственно). Прежде всего обращает на себя внимание наличие поглощения в нулевом внешнем магнитном поле и явно выраженная асимметрия линии поглощения, проявляющаяся вплоть до частот около 10 ГГц. С другой стороны, магнитные потери при температуре жидкого азота приблизительно в 4 раза больше, чем при комнатной (рис. 1, кривая 2).

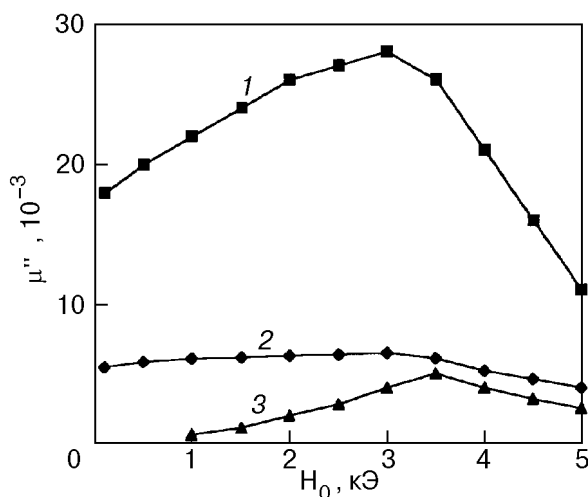


Рис. 2. Магнитные потери монокристалла ГГГ на частоте 9,3 ГГц при температуре жидкого азота (1) и комнатной температуре (2) в сравнении с данными работы [5], полученными при комнатной температуре (3).

## Обсуждение результатов

Для выяснения природы магнитных потерь в ГГГ следует учитывать, во-первых, структуру энергетических уровней ионов  $Gd^{3+}$  в решетке граната и, во-вторых, их диполь-дипольное взаимодействие.

Несмотря на то что свободный ион  $Gd^{3+}$  имеет нулевой орбитальный момент в основном состоянии, в кристаллической решетке гранатов существует начальное магнитное ( $H_0 = 0$ ) расщепление до 8,5 ГГц вследствие частичного смешивания с другими состояниями. Естественно, что в кристалле  $Gd_3Ga_5O_{12}$  сильное диполь-дипольное взаимодействие ионов  $Gd^{3+}$  превращает эту систему уровней в сплошную полосу, последняя и обуславливает начальные потери и асимметрию линии ЭПР при низких частотах и малых величинах внешнего магнитного поля. Таким образом, наряду с начальным расщеплением существенный вклад в ширину линии ЭПР вносит дипольное уширение, составляющее  $\sim 3$  ГГц. С ростом частоты (и соответственно величины внешнего магнитного поля) эти оба фактора постепенно формируют широкую линию ЭПР, которая и наблюдается в эксперименте.

Температурная зависимость нормированной ширины линии ЭПР пластины ГГГ размерами  $0,5 \times 5$  мм и толщиной 400 мкм представлена на рис. 3 (ширина линии при комнатной температуре составляет  $\Delta H \approx 3$  кЭ). Интересно, что резонансное поле ЭПР во всем температурном диапазоне существенно не изменялось и составляло 3,1–3,2 кЭ. Значительное увеличение ширины линии с понижением температуры (около  $\Delta H \approx 6,7$  кЭ при температуре жидкого гелия) объясняется тем, что для синтеза исследованных нами монокристаллов

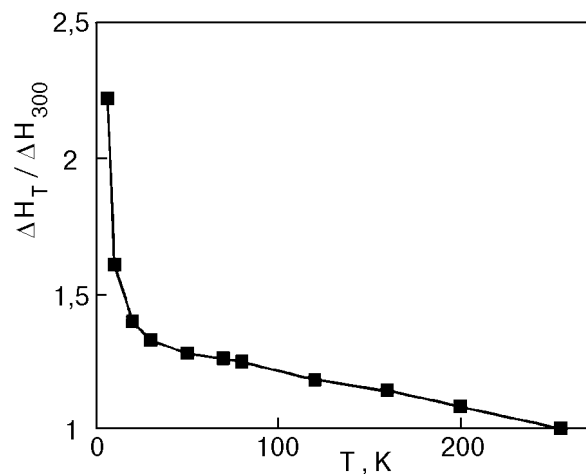


Рис. 3. Температурная зависимость нормированной ширины линии ЭПР монокристаллической пластины ГГГ на частоте 9,3 ГГц.

ГГГ использовалась окись гадолиния чистотой 99,5%. При этом наличие сопутствующих примесей редкоземельных ионов обеспечивает канал спин-решеточной релаксации для ионов  $Gd^{3+}$ , эффективность которого возрастает с понижением температуры [6]. По-видимому, наличие примесей может также объяснить и несколько большие значения  $\mu''$  исследованных нами образцов по сравнению с данными, полученными в [5] при комнатных температурах.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность чл.-корр. НАНУ С. М. Рябченко за помощь в проведении исследований и полезные обсуждения результатов работы.

1. В. В. Данилов, Д. Л. Лыфарь, Ю. В. Любонько, А. Ю. Нечипорук, С. М. Рябченко, *Изв. вузов, Физика* **32**, 48 (1989).
2. М. Г. Балинский, В. В. Данилов, А. Ю. Нечипорук, *Радиотехника и электроника* **38**, 1319 (1993).
3. В. В. Данилов, А. Ю. Нечипорук, Л. В. Чевнюк, *ФНТ* **22**, 1052 (1996).
4. Д. Д. Пилипко, В. Ф. Романюк, Е. Н. Смирнов, *Приборы и техника эксперимента*, № 5, 150 (1983).
5. J. D. Adam, J. H. Collins, and D. I. Cruikshank, *Proc. 21 Annual Conf. Magn. and Magn. Mater.*, Philadelphia (1976), p. 643.
6. А. Г. Гуревич, *Магнитный резонанс в ферритах и ферромагнетиках*, Наука, Москва (1973).

## Resonant magnetic properties of gadolinium-gallium garnet monocrystal

A. R. Bedukh, V. V. Danilov, A. Yu. Nechiporuk, and V. F. Romanyuk

The experimental results on resonant magnetic properties of the gadolinium-gallium garnet (GGG) monocrystal at temperature 4.2–300 K and frequencies 1.6–9.3 GGz are considered. It is found that the GGG magnetic loss is caused by the initial energy level splitting of the gadolinium ions in the crystal lattice of garnet and by the dipole broadening. The EPR line width and form in GGG can be explained by the influence of these factors. The asymmetry of the EPR line is most pronounced at low frequencies. The GGG magnetic loss increases with decreasing temperature and increasing frequency. It is found that the EPR line width increases essentially with decreasing temperature resulted from the presence of rapid relaxation impurities.