Физика низких температур, 1996, т. 22, № 9, с. 1052–1055

Температурные зависимости порога параметрического возбуждения и параметра релаксации спиновых волн в гранатовых структурах

В. В. Данилов, А. Ю. Нечипорук, Л. В. Чевнюк

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

Статья поступила в редакцию 26 марта 1996 г.

Обсуждаются результаты экспериментального исследования температурных зависимостей порога параметрического возбуждения h_{thr} и параметра релаксации спиновых волн (СВ) ΔH_k в монокристаллических пластинах и эпитаксиальных пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ). Показано, что затухание СВ в эпитаксиальном слое ЖИГ больше, чем в монокристаллической пластине, причем различие увеличивается с понижением температуры. Этот факт объясняется влиянием парамагнитной подложки и большим содержанием примесей растворителя и тигля, связанным с особенностями эпитаксиальной технологии. Исследования проводились при температурах 4,2–300 К в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

Обговорюються результати експериментального дослідження порога параметричного збудження h_{thr} та параметра релаксації спінових хвиль (СХ) ΔH_k у монокристалічних пластинах та епітаксійних плівках залізо-ітрійового гранату (ЗІГ). Показано, що поглинання СХ у епітаксійному шарі ЗІГ більше, ніж у монокристалічній пластині, причому різниця збільшується із зниженням температури. Цей факт пояснюється впливом парамагнітної підкладки і більшим вмістом домішок розчинника та тігля, що пов'язано з особливостями епітаксійної технології. Дослідження проводилися при температурах 4,2–300 К у трьохсантиметровому діапазоні довжин хвиль.

Параметрическое возбуждение СВ в условиях параллельной накачки является одним из основных методов определения параметров релаксации ферритов при различных температурах, частотах и волновых числах [1].

По сравнению с объемными кристаллами ЖИГ, в которых процессы релаксации исследованы достаточно полно, эпитаксиальные гранатовые пленки ЖИГ, выращенные на подложках гадолиний-галлиевого граната (ГГГ), имеют специфические особенности, поэтому механизмы затухания СВ в них еще недостаточно выяснены. Поскольку влияние парамагнитной подложки оценено нами в работах [2–4], можно попытаться выделить параметры затухания СВ собственно в эпитаксиальном слое ЖИГ, что и является целью настоящей работы.

Порог параметрического возбуждения СВ в условиях параллельной накачки на частоте $\omega_p/2\pi =$ $= 9\,400$ МГц определялся по известной методике в диапазоне температур 4,2–300 К. В режиме нормального к плоскости образца намагничивания исследовались образцы ЖИГ различной толщины на подложке ГГГ ориентации (111) в форме диска и прямоугольника. Эталонными образцами служили тонкие пластины толщиной 50 мкм, вырезанные из чистого монокристалла ЖИГ в плоскости (111). Все пленочные образцы предварительно подвергались химической полировке (1–2 мин обработки в ортофосфорной кислоте при $T = 400$ К) для удаления избыточных ионов Pt^{4+} и Pb^{2+}, вошедших в приповерхностный слой пленки ЖИГ (200–300 Å) из тигля и расплава в процессе эпитаксиального роста и приводящих к дополнительному затуханию СВ [5].

Кристал-подложка ГГГ, магнитные свойства которого определяются ионом Gd^{3+}, обладает во внешнем магнитном поле H_0 намагниченностью

$$M_p = \kappa_p H_0 = \frac{NJ(J+1)(g/\beta)^2 H_0}{3kT} = 0{,}155\,\frac{H_0[\text{Э}]}{T[\text{K}]}, \quad (1)$$

κ_p — статическая магнитная восприимчивость; N — концентрация магнитных ионов гадолиния; β — магнетон Бора; k — постоянная Больцмана; J — полный магнитный момент; g — фактор, равный двум для ГГГ. На рис. 1 сопоставляются величины κ_p, полученные из расчета по (1) и из эксперимен-

© В. В. Данилов, А. Ю. Нечипорук, Л. В. Чевнюк, 1996

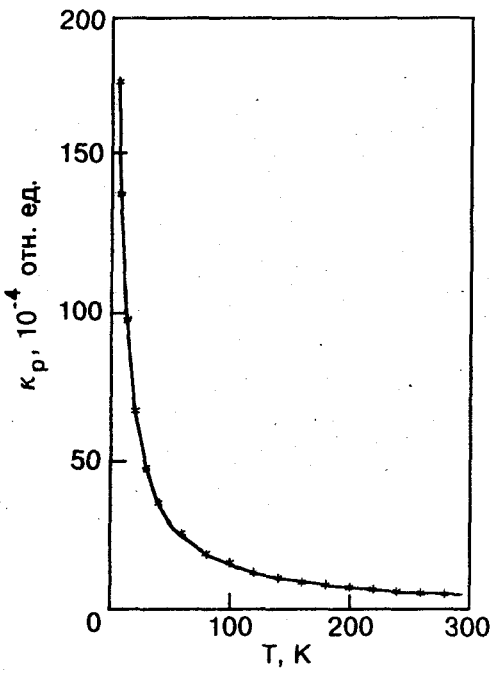

Рис. 1. Температурные зависимости магнитной восприимчивости κ_p кристалла ГГГ: эксперимент (*), расчет по (1) (сплошная линия).

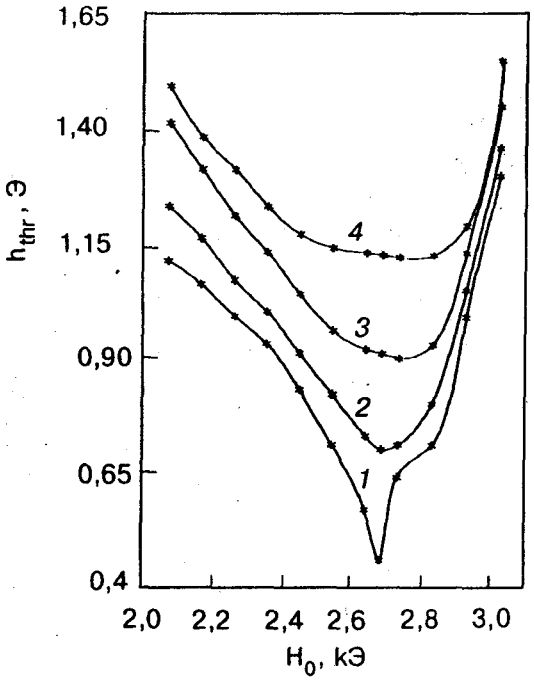

Рис. 2. Полевые зависимости порога параметрического возбуждения спиновых волн в условиях нормального намагничивания эпитаксиальной пленке ЖИГ толщиной 46 мкм при различных температурах T, K; 300 (*1*); 150 (*2*); 77 (*3*); 4,2 (*4*).

та по методу Фарадея [6] (использовался образец ГГГ размерами 1,5×0,5×0,018 мм). Намагниченность подложки при $T < 100$ K и $H_0 > 5$ кЭ становится сравнимой с намагниченностью ферритовой пленки ЖИГ.

С учетом этих результатов по экспериментально наблюдаемому порогу параметрического возбуждения спиновых волн h_{thr} в эпитаксиальных и составных структурах ЖИГ—ГГГ определялись температурные зависимости параметра затухания ΔH_k:

$$\Delta H_k(T) = h_{thr}\gamma\omega_m/2\omega_p = \\ = h_{thr}\gamma 4\pi [M_p(T) + M_f(T)]/2\omega_p , \qquad (2)$$

где γ — гиромагнитное отношение; зависимость $M_f(T)$ для монокристалла ЖИГ взята из [7]. Как известно, полевая зависимость порогового поля h_{thr} имеет вид кривой типа «бабочка» с четким минимумом (см., например, рис. 2, кривая *1*). По минимальному значению h_{thr} определяется минимальное значение ΔH_k, которое и служит релаксационной характеристикой материала.

Прежде всего отметим влияние парамагнитной подложки на характер зависимости $h_{thr}(H_0)$ с понижением температуры. На рис. 2 представлена динамика изменения полевой зависимости порога параметрического возбуждения СВ в условиях нормального намагничевания пленки ЖИГ толщиной 46 мкм в температурном диапазоне 4,2–300 K. С понижением температуры минимум порога смещается в сторону больших полей (кривые *2,3*) в соответствии с температурной зависимостью суммарной намагниченности структуры и становится все менее отчетливым. Наконец, при температуре жидкого гелия (кривая *4*) минимум зависимости $h_{thr}(H_0)$ существенно расширяется. Этот эффект связан с тем, что намагниченная парамагнитная подложка из ГГГ при температурах ниже 100 K создает в месте расположения эпитаксиальной ферритовой пленки неоднородное добавочное статическое магнитное поле, изменяющее суммарное поле, действующее на ЖИГ [3, 8]. При этом, как следствие, изменяется характер зависимости $h_{thr}(H_0)$.

На рис. 3 приведены зависимости $\Delta H_k(T)$ для монокристаллической пластины ЖИГ (кривая *1*, толщина $S_1 = 50$ мкм) и составной структуры ЖИГ–ГГГ (кривая *2*, $S_1 = 50$ мкм, толщина пластины ГГГ $S_2 = 500$ мкм); здесь же показан экспериментально наблюдаемый вклад подложки ГГГ в величину ΔH_k указанной структуры (кривая *3*) и соответствующая теоретическая зависимость (кривая *4*). Последняя кривая рассчитана с учетом формул работы [4] и экспериментальных данных для тангенса угла магнитных потерь ГГГ tg δ [5,8,9].

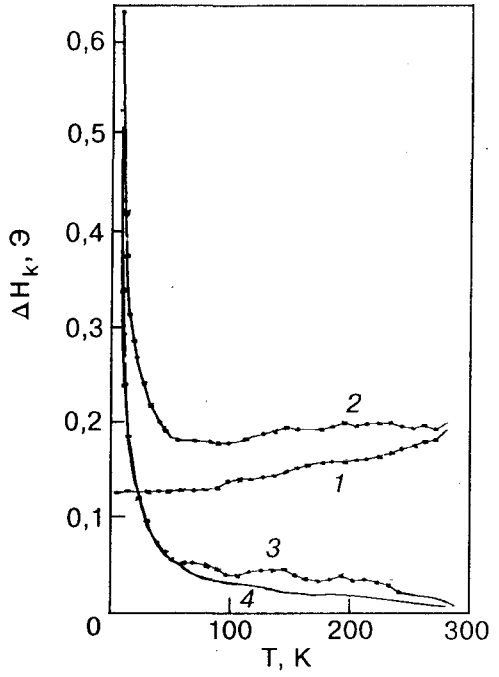

Рис. 3. Температурные зависимости параметра релаксации ΔH_k СВ в монокристаллической пластине ЖИГ (кривая *1*), составной структуре ЖИГ–ГГГ (кривая *2*), экспериментального и расчетного вкладов подложки в величину ΔH_k (кривые *3*, *4*); толщина пластины ЖИГ 50 мкм, толщина подложки ГГГ 500 мкм.

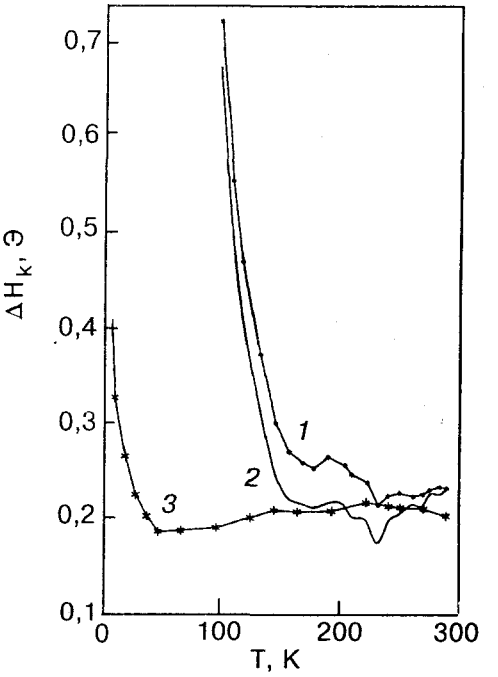

Рис. 4. Температурные зависимости параметра релаксации ΔH_k СВ в эпитаксиальной структуре ЖИГ—ГГГ и в ее «эпитаксиальном» слое (толщина пленки 46 мкм, кривые *1*, *2*), в эпитаксиальной пленке ЖИГ толщиной 8 мкм (кривая *3*).

Отметим, что различие теоретической и экспериментальной кривых составляет не более 5–10% во всем температурном диапазоне. На рис. 4 приведены зависимости $\Delta H_k(T)$ для эпитаксиальной структуры ЖИГ–ГГГ (кривая *1*, $S_1 = 46$ мкм, $S_2 = 400$ мкм) и «эпитаксиального» слоя ЖИГ этой же структуры (кривая *2*). Последняя зависимость найдена с использованием кривой *3* рис. 3 в предположении, что вклад слоя ГГГ в величину ΔH_k эпитаксиальной структуры такой же, как и в составной структуре. Из минимальных значений h_{thr} следуют минимальные параметры релаксации СВ ΔH_k пластины и пленки ЖИГ, равные 0,13 и 0,20 Э соответственно. Как видно из экспериментальных данных, порог параметрического возбуждения начинает увеличиваться с температур $T <$ < 150 K для эпитаксиальных и $T < 60$ K для составных структур ЖИГ—ГГГ. Соответственно параметр затухания СВ «эпитаксиального» слоя ЖИГ становится заметно больше, чем в слое объемного монокристалла ЖИГ.

Анализируя приведенные результаты, можно заключить, что рост затухания СВ в составных структурах ЖИГ—ГГГ во всем температурном диапазоне и в эпитаксиальных пленках для температур выше 170 K вызван парамагнитным поглощением в кристалле ГГГ. В то же время резкое увеличение параметра затухания ΔH_k большинства исследованных нами пленок для температур ниже 170 K не может быть объяснено только влиянием подложки и, таким образом, связано с потерями в эпитаксиальном слое ЖИГ. Как известно, скорость эпитаксиального роста гранатовых пленок из раствора в расплаве как минимум на порядок выше, чем объемных монокристаллов, что соответственно способствует захвату большего количества примесей растворителя и тигля. Кроме этого, небольшое рассогласование постоянных решетки пленки и подложки также способствует вхождению указанных примесей, поскольку последние увеличивают период идентичности. Тем не менее технология жидкофазной эпитаксии при соответствующем подборе режима выращивания, по-видимому, позволяет добиться получения эпитаксиальных слоев ЖИГ, пригодных для низкотемпературных применений. Об этом свидетельствует, например, экспериментальная зависимость для пленки ЖИГ толщиной 8 мкм (рис. 4, кривая *3*), для которой минимальная величина параметра затухания ΔH_k составляет 0,175 Э.

1. А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков, *Магнитные колебания и волны*, Наука, Москва (1994).
2. М. Г. Балинский, В. В. Данилов, А. Ю. Нечипорук, В. М. Талалаевский, *Известия вузов, Радиофизика* **32**, 1253 (1986).
3. В. В. Данилов, Д. Л. Лыфарь, Ю. В. Любонько, А. Ю. Нечипорук, С. М. Рябченко, *Известия вузов, Физика* **32**, 48 (1989).
4. М. Г. Балинский, В. В. Данилов, А. Ю. Нечипорук, *Радиотехника и электроника* **38**, 1319 (1993).
5. A. R. Bedykh, V. V. Danilov, A. Yu. Nechiporuk, and A. V. Tychinsky, *Proc. Int. Symp. Surface Waves in Solids and Layered Structures*, Novosibirsk (Russia) (1986), 2, p. 277.
6. В. И. Чечерников, *Магнитные измерения*, Изд-во МГУ, Москва (1969).
7. Ю. М. Яковлев, С. Ш. Генделев, *Монокристаллы ферритов в радиотехнике*, Советское радио, Москва (1975).
8. V. Marysko, *J. Magn. Magn. Mater.* **101**, 159 (1991).
9. J. D. Adam, J. H. Collins, and D. I. Cruikshank, *Proc. 21 Annual Conf. Magn and Magn. Mater.*, Philadelphia (1976), p. 643.

Temperature dependences of the spin waves parametric excitation threshold and relaxation parameter in garnet structures

V. V. Danilov,
A. Yu. Nechiporuk, and L. V. Chevnyuk

The results of the experimental investigation of temperature dependences of spin waves (SW) parametric excitation threshold h_{thr} and relaxation parameter ΔH_k in monocrystal plates and epitaxial films of yttrium-iron garnet (YIG) are discussed. It was shown, that SW damping in epitaxial YIG layer is stronger than that in the monocrystal plate, the difference becomes greater with temperature decreasing. This fact is explained by an influence of paramagnetic substrate and increased concentration of impurities of solvent and crucible due to epitaxial technology features. The above investigations were carried out at temperature from 4.2 to 300 K in the 3-cm wavelength band.