

05;09

Экспериментальное исследование эффекта квантового усиления магнитоэлектронных волн в феррит-парамагнитных структурах

© В.В. Данилов, А.Ю. Нечипорук

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Украина
E-mail: chipa@mail.univ.kiev.ua

Поступило в Редакцию 14 декабря 2001 г.

Сообщаются результаты экспериментальных исследований эффекта квантового усиления прямых объемных магнитоэлектронных волн (ПОМЭВ) в составной структуре железоиттриевый (ЖИГ) гранат $Y_3Fe_5O_{12}$ –рубин $Al_2O_3:Cr^{3+}$. Максимальные значения коэффициента усиления составили 12 и 25 дБ при температурах 4.2 и 1.6 К соответственно. Эффект усиления МЭВ с использованием эпитаксиальной структуры пленка ЖИГ — подложка гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) $Gd_3Ga_5O_{12}$ не наблюдался в связи с сильным парамагнитным поглощением МЭВ в кристалле подложки.

Теория квантового усиления магнитоэлектронных волн (МЭВ) развита нами в работе [1]. При этом рассматривались составные структуры железоиттриевые гранаты (ЖИГ)–парамагнитный мазерный кристалл, в котором сверхвысокочастотное (СВЧ) магнитное поле МЭВ взаимодействует с инвертированной спиновой системой парамагнетика. Коэффициент квантового усиления МЭВ рассчитывался по формуле, аналогичной применяющейся в традиционных мазерах бегущей волны [2]:

$$G [\text{дБ/см}] = 4.34(\omega d_m - 2\omega_r)/V_g,$$

здесь V_g и ω_r — групповая скорость распространения и частота релаксации волны; ω — частота сигнального перехода в рубине; d_m — магнитный декремент рубина, характеризующий эффективность взаимодействия МЭВ с инвертированной спиновой системой рубина. Понятно, что процесс усиления возможен только при условии совпадения частот МЭВ и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)

сигнального перехода в рубине. В настоящей работе обсуждаются экспериментальные результаты по наблюдению квантового усиления ПОМСВ при взаимодействии с инвертированной спиновой системой монокристалла рубина при температуре жидкого гелия.

Выбор ПОМСВ для экспериментальных исследований в структуре ЖИГ-рубин был основан на следующих соображениях. Для объемных МСВ СВЧ-поле волны всегда имеет составляющую поляризации, оптимальную для взаимодействия со спиновой системой мазерного кристалла. Это увеличивает значение магнитного декремента рубина d_m . С другой стороны, частота сигнального перехода в рубине находится вблизи верхней частотной границы ПОМСВ, где значение групповой скорости волны является минимальным и соответственно, как это следует из приведенной формулы, увеличивается эффективность взаимодействия. В качестве сигнального нами выбран переход $1 \rightarrow 2$, а перехода накачки — $4 \rightarrow 1$ (угол между направлением внешнего магнитного поля \mathbf{H}_0 и осью симметрии \mathbf{C} рубина составляет 90°) (рис. 1).

Мы исследовали характеристики прохождения СВЧ-мощности через систему возбуждения и детектирования энергии МСВ на частоте сигнального перехода $f_s = 6100$ МГц. Источником накачки кристалла рубина служил магнетронный генератор, работающий на частоте $f_p = 35520$ МГц и обеспечивающий уровень мощности до 3 Вт.

На рис. 2 представлено сравнение амплитудно-полевых характеристик прохождения сигнала ПОМСВ в структуре рубин-эпитаксиальная пленка ЖИГ при температурах 4.2 и 77 К. Как было нами показано ранее [3] (см. также [4]), намагниченная внешним магнитным полем подложка ГГГ при низких температурах создает неоднородное размагничивающее поле, которое, кроме влияния на дисперсию МСВ (сдвиг и уширение кривой), в данном случае приводит также и к неоднородному уширению и смещению линии ЭПР в рубине. С другой стороны, сильное парамагнитное поглощение в подложке ГГГ [3] обеспечивает резкое увеличение потерь МСВ с понижением температуры (это иллюстрирует сравнение кривых 1 и 2), что препятствует созданию инверсии в спиновой системе рубина. Поэтому включение генератора накачки не привело к заметному изменению исследованных зависимостей.

В связи с этим был проведен такой же эксперимент в структуре из монокристаллических пластин ЖИГ и рубина толщиной по $200 \mu\text{m}$ и размерами 16×20 mm. Результаты эксперимента представлены

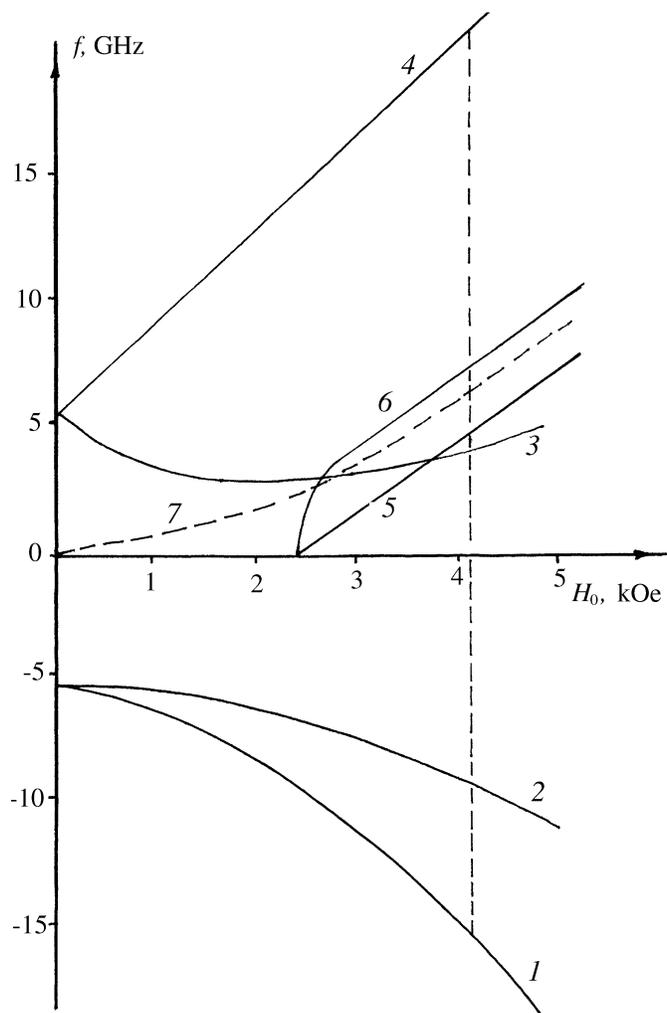


Рис. 1. Частотно-полевые области существования ПОМСВ в ЖИГ и ЭПР в рубине при температуре жидкого гелия: 1-4 — энергетические уровни иона Cr^{3+} в Al_2O_3 , 5, 6 — нижняя и верхняя частотные границы МСВ, 7 — частота сигнального перехода $1 \rightarrow 2$ в рубине; вертикальной штриховой линией обозначен рабочий режим.

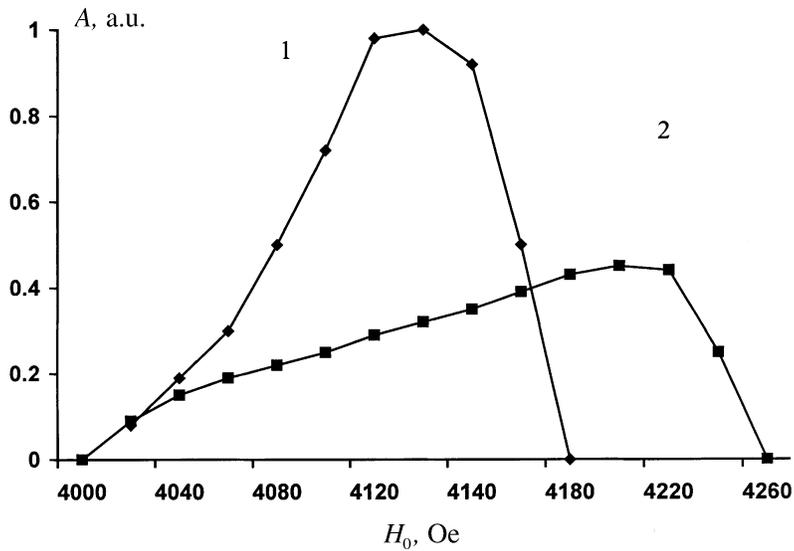


Рис. 2. Сравнительная амплитудно-полевая характеристика прохождения ПОМСВ в структуре эпитаксиальная пленка ЖИГ-рубин при температурах 77 (1) и 4.2 К (2), $f_s = 6100$ MHz.

на рис. 3. При включении генератора накачки был зарегистрирован эффект квантового усиления ПОМСВ при температурах 4.2 и 1.6 К. Коэффициент усиления отсчитывался относительно уровня сигнала волны при выключенной накачке. Заметим, что максимальное расчетное значение коэффициента усиления составляет соответственно 15 и 31 dB, а ширина полосы усиления — около $60 \div 70$ MHz, что совпадает с шириной линии ЭПР в рубине, но больше, чем в традиционных лазерах бегущей волны [5]. Большее значение полосы усиления в нашем случае объясняется некоторой неоднородностью статического магнитного поля, вызванной размагничивающими полями относительно толстых пластин ЖИГ.

Таким образом, экспериментально показана принципиальная возможность квантового усиления СВЧ-сигналов в структуре ЖИГ-мазерный кристалл. Для реализации лазера бегущей волны интегрального

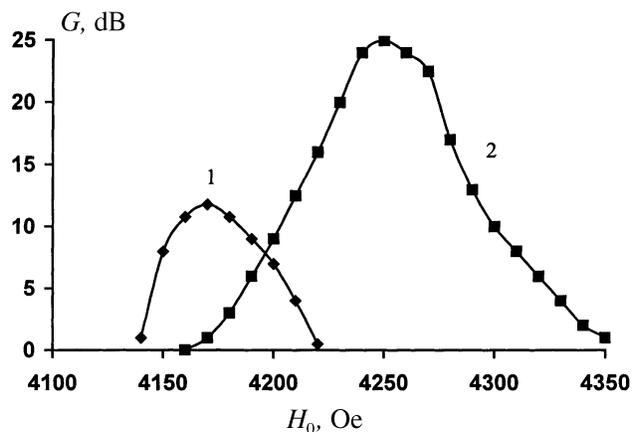


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента квантового усиления ПОМСВ в структуре из пластин ЖИГ и рубина толщиной $200\ \mu\text{m}$ при 4.2 К (1) и 1.6 К (2), $f_s = 6100\ \text{MHz}$.

типа, очевидно, может подходить эпитаксиальная структура ЖИГ–диамантитный гранат [1]. В такой структуре пленка ЖИГ выступает в качестве замедляющей структуры, а подложка из диамантитного граната — в качестве активной среды, для чего она легируется активными парамагнитными центрами, обеспечивающими мазерный эффект.

Список литературы

- [1] Балинский М.Г., Данилов В.В., Нечипорук А.Ю. // ЖТФ. 1993. Т. 63. В. 9. С. 122–130.
- [2] Сигмен А. Мазеры. М.: Мир, 1966. 520 с.
- [3] Данилов В.В., Лыфарь Д.Л., Любонько Ю.В. и др. // Изв. вузов. Физика. 1989. Т. 32. В. 4. С. 48–53.
- [4] Marysko M. // Journ. of Magn. and Magn. Mater. 1991. V. 101. N 1. P. 159–161.
- [5] Черпак Н.Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. В. 7. С. 815–854.