

05.2;09

©1993

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ШИРИНЫ ЛИНИИ ФМР В Ga, Sc-ЗАМЕЩЕННЫХ ПЛЕНКАХ ЖИГ С МАЛОЙ НАМАГНИЧЕННОСТЬЮ

*А.Г.Темиряев, М.П.Тиломирова, П.Е.Зильберман,
А.В.Марягин, А.С.Хе*

Исследование эпитаксиальных ферритовых пленок (ФП) состава $Y_3(Fe_{2-y}Sc_y)(Fe_{3-x}Ga_x)O_{12}$ представляет прежде всего практический интерес, поскольку магнитостатические волны (МСВ) могут распространяться в них на более низких частотах, чем в пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) [1]. Это открывает перспективы для создания перестраиваемых с помощью магнитного поля частотно-селективных устройств и линий задержки в высокочастотном (метровом) диапазоне, то есть на частотах $\omega/2\pi < < 300$ МГц. В связи с этим весьма важной задачей является отработка технологии эпитаксиального роста ФП с малыми потерями и корректная оценка качества получаемых образцов. Традиционно, параметром магнитной диссипации является ширина линии ферромагнитного резонанса (ФМР) $2\Delta H$. В данной работе мы хотели бы, во-первых, обратить внимание на тот факт, что, в отличие от пленок чистого ЖИГ, образцы с большим содержанием Ga ($x \sim 1$) обнаруживают сильную зависимость ширины линии ФМР от частоты. Во-вторых, показать, что качество имеющихся на сегодняшний день Ga, Sc — замещенных ФП позволяет создавать макеты устройств, имеющих весьма малые потери в метровом диапазоне.

1. Исследованные ФП были выращены методом жидкофазной эпитаксии на подложках из гадолиний-галлиевого граната ориентации (111). Отметим, что введение в ЖИГ немагнитных ионов Ga приводит к уменьшению намагниченности насыщения $4\pi M_0$. Значения $4\pi M_0$ составляют $4\pi M_0 \simeq 1750$ Гс для чистого ЖИГ при $x = 0$ и $4\pi M_0 \sim 400$ Гс в легированном ЖИГ при $x \sim 1$. Исследованные пленки имели $4\pi M_0 = 200-500$ Гс и толщину $S = 20-45$ мкм. Измерения ширины линии ФМР проводились методом "магнитной ямы", аналогично работе [2]. Погрешность измерений составляла $\pm 15\%$. На рис. 1 представлены экспериментальные результаты для трех Ga, Sc — замещенных пленок ЖИГ и контрольного образца чистого ЖИГ. Видно, что в пленках с малой намагниченностью величина $2\Delta H$ быстро нара-

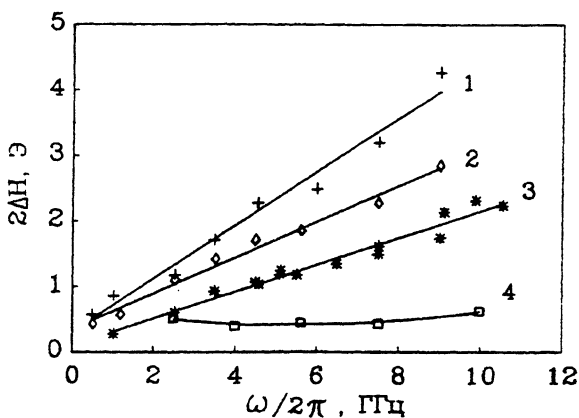


Рис. 1. Зависимость ширины линии ФМР от частоты: образец 1 — $4\pi M_0 \approx 200$ Гс, $S = 45$ мкм; образец 2 — $4\pi M_0 \approx 300$ Гс, $S = 40$ мкм; образец 3 — $4\pi M_0 \approx 470$ Гс, $S = 25$ мкм; образец 4 — $4\pi M_0 \approx 1750$ Гс, $S = 19$ мкм.

стает с увеличением частоты, причем с уменьшением намагниченности крутизна роста $2\delta\dot{H}(\omega)$ увеличивается. В то же время для пленки чистого ЖИГ значение $2\Delta H$ в частотном диапазоне 2.5–10 ГГц изменяется незначительно, что качественно согласуется с результатами, полученными в работе [2]. Это показывает, что ширина линии ФМР в легированных пленках с пониженной намагниченностью, измеренная на какой-либо одной частоте, не вполне однозначно характеризует качество материала. В связи с этим целесообразно рассмотреть вопрос о том, какое же феноменологическое описание релаксации может быть использовано для объяснения полученных результатов. Запишем уравнение движения намагниченности в виде модифицированного уравнения Блоха, учитывающего как поперечную, так и продольную релаксацию [3]

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} = \omega_r \left(\mathbf{M} - \frac{M_0}{H_0} \mathbf{H} \right), \quad (1)$$

где γ — гиромагнитное отношение, H_0 — внутреннее статическое магнитное поле, \mathbf{H} — эффективное магнитное поле, ω_r — частота релаксации. Тогда при фиксированном магнитном поле полуширина линии ФМР составляет $\Delta\omega = \omega_r$. В пленке, намагниченной по нормали, полуширина линии ФМР при фиксированной частоте равна $\Delta H = \Delta\omega/\gamma$. В исследованных образцах измеренное значение γ составляло $2\pi \cdot 2.81$ МГц/Э и не зависело от частоты. Таким образом, если ω_r постоянна, то экспериментально измеряемые параметры релаксации не должны зависеть от частоты. Это

удовлетворительно соответствует экспериментальным данным для пленки чистого ЖИГ и результатам, полученным в [2], но не описывает частотные зависимости, наблюдающиеся в легированных пленках с низкой намагниченностью. С другой стороны, взяв ивой вид релаксационного члена в уравнении (1), мы получим уравнение движения в форме Ландау-Лифшица, учитывающей лишь поперечную релаксацию

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} - \frac{\omega_d}{M^2} \mathbf{M} \cdot (\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}), \quad (2)$$

где ω_d — параметр релаксации. Из уравнения (2) получаем

$$\Delta H = \frac{\omega_d}{\gamma^2 M_0} \sqrt{\omega^2 + \gamma^2 (H_a^2 + M_0^2 4\pi^2 \sin^4 \theta)}, \quad (3)$$

где H_a — эффективное поле анизотропии, θ — характерный угол между M_0 и волновым вектором \mathbf{k} . Взяв для оценки $H_a \sim 100$ Э, $\theta \sim S/D < 5 \cdot 10^{-2}$ (где $D \simeq 0.1$ см диаметр “магнитной ямы”), мы получим, что при частотах выше 300 МГц слагаемое ω^2 под корнем доминирует. Тогда ΔH линейно возрастает с частотой, и наклон этой линейной зависимости увеличивается с уменьшением M_0 . Это согласуется с экспериментальными результатами для пленок легированного ЖИГ. Аппроксимируя экспериментальные результаты для образцов 1, 2, 3 линейными зависимостями (прямые с соответствующими номерами на рис. 1), можно оценить значения ω_d . Оказывается, что величины ω_d для всех трех образцов близки и составляют $\omega_d/2\pi \simeq 26$ КГц для пленок 1 и 2, $\omega_d/2\pi \simeq 30$ КГц для пленки 3. Таким образом можно сделать вывод, что использование феноменологического уравнения (2) является наиболее приемлемым для описания диссипации в Ga, Sc — замещенных пленках ЖИГ с пониженной намагниченностью. При этом параметр релаксации ω_d сохраняется примерно постоянными при изменении намагниченности пленки. Конечно, вопрос о механизмах релаксации, приводящих к различным частотным зависимостям ширины линии ФМР в пленках чистого и легированного ЖИГ, требует специального рассмотрения. На основании изложенного можно лишь предположить, что в исследованном диапазоне частот основную роль играет: 1) продольная релаксация для пленок чистого ЖИГ; 2) поперечная релаксация для пленок Ga, Sc — замещенного ЖИГ. Отметим также, что измерение ΔH на частоте 9 ГГц, являющейся стандартной для аттестации пленок ЖИГ [4], может приводить к существенным ошибкам в оценке качества легированных пленок ЖИГ.

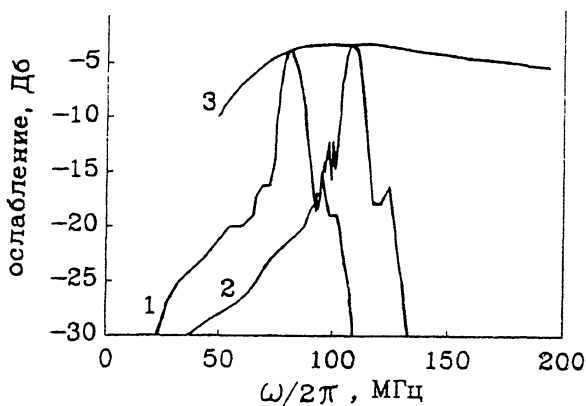


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики макета фильтра при $H_0 = 4 \text{ Э}$ — кривая 1, $H_0 = 6.5 \text{ Э}$ — кривая 2 и зависимость вносимых потерь от рабочей частоты — кривая 3.

2. В работе [1], где исследовалось распространение МСВ в Ga, Sc — замещенных пленках ЖИГ, приведенные экспериментальные данные показывают, что суммарные потери при возбуждении, распространении и приеме МСВ на частотах ~ 100 МГц очень велики и составляют 40–50 дБ. В связи с этим было бы целесообразно остановиться на вопросе о том, насколько исследовавшиеся нами пленки перспективны для создания частотно селективных устройств метрового диапазона, то есть могут ли быть реализованы подобные устройства с малыми потерями. На рис. 1 представлены характеристики макета полосно пропускающего фильтра, изготовленного на основе ФП толщиной 45 мкм с намагниченностью $4\pi M_0 = 200$ Гс (образец 1), помещенной в касательное подмагничивающее поле H_0 . Приведены амплитудно частотные характеристики макета при $H_0 = 4 \text{ Э}$ — кривая 1 и $H_0 = 6.5 \text{ Э}$ — кривая 2, а также частотная зависимость вносимых потерь при изменении внешнего поля — кривая 3. Ширина полосы пропускания данного макета на уровне -3 дБ составляет ~ 8 МГц. Исследование фазо-частотной характеристики показало, что в пределах данной полосы фаза сигнала линейно изменяется на величину $\simeq 150^\circ$. Отметим, что при перестройке центральной частоты фильтра от 70 до 180 МГц вносимые потери не превышают 5 дБ. Управление при этом осуществляется за счет изменения H_0 от 3 до 17 Э. Возможность распространения МСВ с малыми потерями при столь низких подмагничивающих полях обусловлена, в частности, отсутствием в пленке доменной структуры. Отметим, что при входной мощности $P > 4$ мкВт наблюдается увеличение вносимых потерь за счет развития неустойчивости по отношению к процессам

трехмагнитного распада. Допустимые значения входной мощности могут быть несколько увеличены при использовании нормально намагниченных ФП. Тем не менее низкий по сравнению с устройствами на поверхностных акустических волнах (ПАВ) динамический диапазон устройств на МСВ может ограничивать применение последних. В то же время преимуществом МСВ фильтров является возможность перестройки рабочей частоты. Таким образом, представленные результаты показывают, что качество имеющихся на сегодняшний день Ga, Sc — замещенных пленок ЖИГ позволяет говорить о перспективности таких пленок для создания перестраиваемых фильтров метрового диапазона.

Список литературы

- [1] Казаков Г.Т., Марягин А.В., Нам Б.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 19. С. 1733–1737.
- [2] Калинин Б.А., Ковшиков Н.Г., Колодин П.А., Панчурин И.П. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. В. 10. С. 53–55.
- [3] Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука. 1973. 592 с.
- [4] Adam J.D., Daniel M.R., Emtage R., Talisa S.H. Magnetostatic waves. Academic Press. 1991. 142 p.

Институт радиотехники
и электроники РАН
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию
9 августа 1993 г.

