

05; 06

Релаксационные потери магнитных возбуждений в наноразмерных пленках железо-иттриевого граната

© Л.В. Луцев, С.М. Сутурин, А.М. Коровин, В.Э. Бурсиан,
Н.С. Соколов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия

E-mail: l_lutsev@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 ноября 2017 г.

Исследованы релаксационные потери магнитных возбуждений в наноразмерных пленках $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG), полученных методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии (LMBE). Обнаружено, что ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH резко возрастает с понижением температуры от 300 до 77 К. Наблюдаемое увеличение ΔH объяснено характерными релаксационными процессами, вызванными наличием ионов Fe^{2+} . В связи с отсутствием этого эффекта в толстых пленках YIG, выращенных методом жидкофазной эпитаксии и содержащих ионы Pb^{4+} , сделан вывод о том, что присутствие ионов с акцепторными свойствами в пленках YIG, полученных методом LMBE, будет способствовать уменьшению концентрации ионов Fe^{2+} и в результате снижению релаксационных потерь.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.13.46322.17118

Создание приборов на основе спиновых волн, распространяющихся в наноразмерных ферромагнитных пленках, является перспективной темой СВЧ-электроники. Ожидается, что их интеграция с транзисторными структурами на одном полупроводниковом чипе приведет к миниатюризации СВЧ-устройств, увеличению полосы пропускания, повышению селективности и скорости информационного обмена [1]. Успешное выращивание пленок железо-иттриевого граната ($Y_3Fe_5O_{12}$, YIG), имеющих низкие потери распространения спиновых волн, на подложках Si и GaN показало реализуемость интеграции спин-волновых приборов в полупроводниковой интегральной схеме [2,3]. Малое затухание спиновых волн позволяет построить полосно-пропускающие

фильтры, линии задержки, шумоподавители. Низкие релаксационные потери являются ключевым фактором также в приборах спинтроники на основе спинового эффекта Холла в структурах YIG/Pt [4–9]. Несмотря на то что в последнее время в наноразмерных пленках YIG, полученных методом импульсного лазерного нанесения, достигнуты малые величины релаксации спиновых возбуждений [10–12], проблема уменьшения затухания спиновых волн остается актуальной. В настоящей работе описано получение наноразмерных пленок YIG, выращенных методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии (LMBE), и исследованы релаксационные потери магнитных возбуждений в этих пленках. Исходя из температурных зависимостей ширины линии ферромагнитного резонанса (ФМР) найдено, что наблюдаемое увеличение ширины линии ФМР характерно для релаксационных процессов, вызванных наличием ионов Fe^{2+} . Сравнение с пленками, полученными методом жидкофазной эпитаксии, позволило прийти к выводу, что присутствие легирующих ионов-акцепторов в пленках YIG позволит уменьшить релаксационные потери.

Пленки YIG были выращены на подложках гадолиний-галлиевого граната ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, GGG) с ориентацией (111) методом LMBE по одностадийной высокотемпературной технологии [10,13,14]. Перед процессом роста для улучшения поверхностной морфологии GGG-подложки подвергались трехчасовому отжигу при 1000°C в атмосферном воздухе. Рост пленок YIG осуществлялся переносом вещества со стехиометрической мишени $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ под действием излучения эксимерного импульсного лазера KrF Lambda Physics COMPEX 201 ($\lambda \approx 248 \text{ nm}$) с плотностью энергии на мишени $3.0\text{--}3.4 \text{ J/cm}^2$. Мишень была получена по стандартной технологии изготовления ферритов из шихты, содержащей оксиды Y_2O_3 и Fe_2O_3 марки осч. Использование оксидов марки осч позволяет избежать уширения линии ФМР, вызываемого присутствием быстрорелаксирующих редкоземельных ионов. Скорость роста пленок (см. таблицу, пленки № 1–3) изменялась в диапазоне от 0.2 до 0.7 \AA/s . Нанесение пленок YIG проходило в атмосфере кислорода при давлении 0.04 mbar (№ 1, 2) и 0.2 mbar (№ 3) на GGG-подложки, нагретые до 850°C . Кристаллическая структура и качество, а также толщина нанесенных слоев контролировались *in situ* методом дифракции электронов (RHEED 3D mapping) и *ex situ* методом рентгеновской дифракции с использованием подхода, аналогичного описанному в [10,13]. Морфология поверхности пленок и подложки исследована

Условия выращивания и свойства полученных пленок YIG

Номер пленки	Условия выращивания		Толщина d , nm	$T = 295$ K		$T = 77$ K	
	давление O_2 , mbar	скорость роста, Å/s		$4\pi M - H_a$, kOe	ΔH , Oe	$4\pi M - H_a$, kOe	ΔH , Oe
1	0.04	0.2	31	2.38	6.6	4.29	37.4
2	0.04	0.7	19	1.90	6.1	3.26	32.3
3	0.2	0.6	18	2.26	12.6	3.61	70.2
4	LPE, 930°C		6300	1.70	0.63	2.29	0.80

довалась на атомно-силовом микроскопе Integra производства NT-MDT с помощью полуконтактной методики. Морфология поверхности пленки YIG № 2, полученной методом LMBE, представлена на рис. 1. Следует отметить, что повышение давления кислорода в процессе роста приводит к некоторому закруглению ростовой поверхности.

Магнитные параметры выращенных структур определялись на спектрометре электронного парамагнитного резонанса X-диапазона по спектрам ФМР. Измерения проводились на касательно и перпендикулярно намагниченных образцах в температурном диапазоне от 77 K до комнатной температуры (295 K). В ходе исследований при стабилизированной частоте в диапазоне $F = 9.24-9.29$ GHz и линейной развертке магнитного поля записывалась первая производная сигнала поглощения. При понижении температуры наблюдались сдвиг и изменение спектра ФМР (рис. 2). Для определения магнитных характеристик образцов спектры ФМР, полученные экспериментально, были аппроксимированы суммой первых производных лоренцевских кривых по магнитному полю H

$$A(H) = \sum_i^n C^{(i)} \frac{\partial L^{(i)}(H)}{\partial H},$$

где A — амплитуда сигнала, $C^{(i)}$ — коэффициент, i — номер пика,

$$L^{(i)}(H) = \frac{1}{1 + (H - H_0^{(i)})^2 / (\Delta H^{(i)}/2)^2}$$

— кривая Лоренца, $H_0^{(i)}$ — положение пика с номером i , $\Delta H^{(i)}$ — ширина линии ФМР этого пика. Для нахождения магнитных парамет-

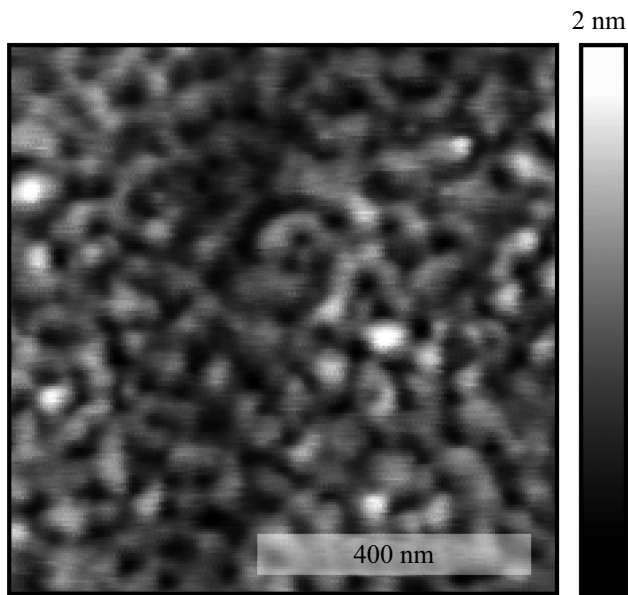


Рис. 1. Морфология поверхности пленки YIG (№ 2), полученной методом ЛМВЕ.

ров и релаксационных потерь магнитных возбуждений определялись положение и ширина линии ФМР основного пика ($i = 0$), т.е. пика, имеющего максимальную амплитуду. Разность намагниченности и одноосной анизотропии $4\pi M - H_a$ (эффективная намагниченность) пленки, соответствующая этому пику, находилась из решения системы, составленной из уравнений, определяющих положение пика в касательном и перпендикулярном подмагничивающих полях [15],

$$F = \gamma [H_{0\parallel}^{(0)} (H_{0\parallel}^{(0)} + 4\pi M - H_a)]^{1/2},$$

$$F = \gamma (H_{0\perp}^{(0)} - 4\pi M + H_a),$$

где F — частота, γ — гиромагнитное отношение, $H_{0\parallel}^{(0)}$ и $H_{0\perp}^{(0)}$ — магнитные поля основного пика при касательном и перпендикулярном подмагничивании соответственно. Измеренные при комнатной температуре и температуре 77 К величины эффективной намагниченности

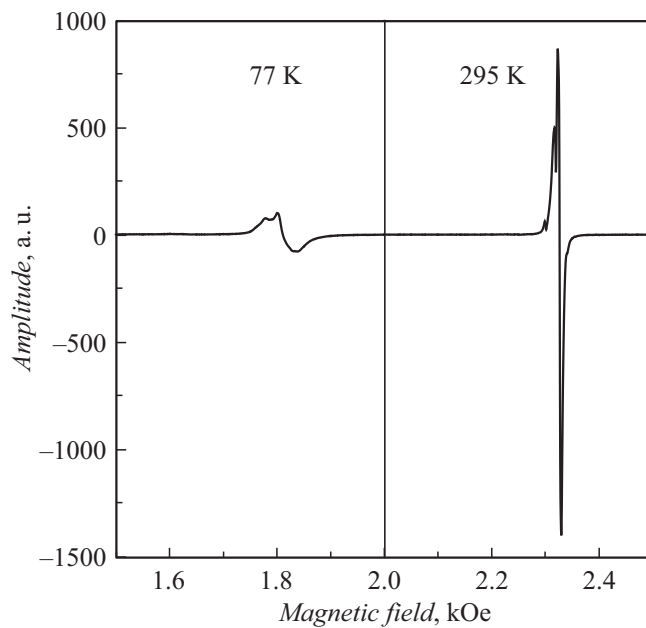


Рис. 2. Сдвиг и изменение спектра ФМР намагниченной пленки YIG № 1 с ориентацией намагниченности, касательной ее поверхности, на частоте 9.28 GHz при понижении температуры от 295 до 77 К.

$4\pi M-H_a$ и ширины линии ФМР для пленок, выращенных методом LMBE (№ 1–3), приведены в таблице. Там же для сравнения с пленками YIG, выращенными методом LMBE, представлены значения $4\pi M-H_a$ и ΔH пленки YIG (№ 4), полученной методом жидкофазной эпитаксии (LPE) при 930°C. На рис. 3 показана температурная зависимость ширины линии ΔH основного пика спектра ФМР касательно намагниченной пленки YIG № 2.

Из таблицы и рис. 2 и 3 видно, что для пленок № 1–3 ширины линий ФМР значительно больше ширины линии пленки № 4, полученной методом LPE. При этом увеличение давления кислорода при выращивании пленок приводит к дополнительному увеличению ширины линии ФМР (образец № 3). При уменьшении температуры от 295 до 77 К происходит резкое увеличение ΔH в 5.3–5.7 раз. Данное уширение

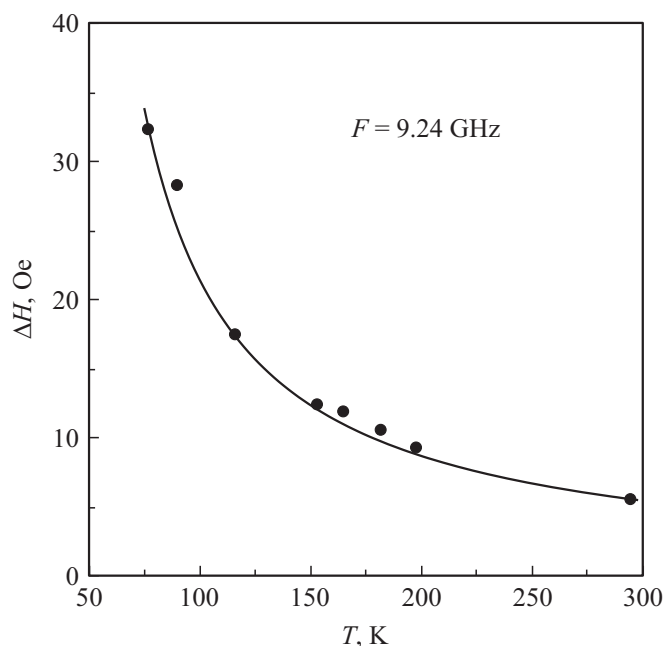


Рис. 3. Температурная зависимость ширины линии ΔH основного пика спектра ФМР касательно намагниченной пленки YIG № 2 на частоте 9.24 GHz. Линия, соединяющая экспериментальные точки, является частью кривой Лоренца и проведена для удобства восприятия.

нельзя объяснить увеличением неоднородности магнитных параметров пленок, так как эффективная намагниченность $4\pi M - H_a$ при 77 K возрастает лишь в 1.6–1.8 раза. Также резкое увеличение ширины линии ФМР с понижением температуры нельзя объяснить двухмагнонным релаксационным механизмом — рассеянием магнонов на шероховатостях структуры пленок (рис. 1), так как продольный размер шероховатости на поверхности пленок YIG (50–100 nm) много меньше длин волн, возбуждаемых при ФМР, которые по порядку величины соответствуют продольным размерам образца. Вместе с тем следует заметить, что наблюдаемое резкое увеличение ΔH с понижением температуры характерно для релаксационных процессов, вызванных присутствием ионов

Fe^{2+} в октаэдрических позициях [16–19]. Незначительное количество быстрорелаксирующих ионов Fe^{2+} (сотые доли процента) приводит к существенному увеличению ширины линии ФМР в диапазоне 77–300 К и характерному максимуму ΔH , наблюдаемому при температуре, меньшей 77 К [16]. Согласно [20], релаксационные процессы связаны с перескоками электронов $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$. Появление ионов Fe^{2+} , по-видимому, можно связать с дефектами структуры и нарушением стехиометричности состава пленок YIG в процессе LMBE-выращивания. Нарушение стехиометричности обусловлено сдвигом кислородного равновесия в структуре пленки YIG и, как следствие, избытком двухвалентных катионов. С другой стороны, следует отметить, что пленка № 4, полученная методом LPE, демонстрирует незначительное увеличение ΔH , что указывает на отсутствие или пренебрежимо малое количество быстрорелаксирующих ионов.

Сравнение температурных зависимостей ширин линий ФМР образцов, полученных методами LPE и LMBE, наводит на соображения о том, как можно уменьшить релаксационные потери магнитных возбуждений пленок YIG, выращенных с помощью LMBE. В методе LPE пленки YIG растут в растворе-расплаве, содержащем PbO, и незначительное количество ионов Pb^{2+} и Pb^{4+} входит в структуру YIG. Благодаря смешиванию $6p$ -электронов иона Pb^{2+} с $2p$ -электронами O^{2-} усиливается сверхобменное взаимодействие между Fe^{3+} [21]. Вместе с тем присутствие ионов Pb^{4+} способствует переносу заряда от Fe^{2+} к Pb^{4+} и образованию Fe^{3+} : $\text{Fe}^{2+} + \text{Pb}^{4+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Pb}^{3+}$. При этом количество ионов Fe^{2+} уменьшается. Можно полагать, что легирование пленок YIG ионами-акцепторами, одним из вариантов которого могла бы стать небольшая добавка окиси свинца в мишень при росте пленок YIG методом LMBE, позволит значительно уменьшить релаксационные потери магнитных возбуждений в этих пленках.

Таким образом, в работе проведено сравнительное исследование релаксационных потерь магнитных возбуждений в наноразмерных пленках YIG, выращенных методом LMBE (при варьировании ряда ростовых параметров) и методом LPE. Обнаружено, что ширина линии ФМР резко возрастает с понижением температуры. Наблюдаемое увеличение ΔH характерно для релаксационных процессов, вызванных наличием ионов Fe^{2+} . Сравнение температурных зависимостей ширин линий ФМР образцов, полученных методами LPE и LMBE, приводит к выводу о том, что присутствие ионов с акцепторными свойствами (например, Pb^{4+}) в

выращенных структурах будет способствовать уменьшению количества ионов Fe^{2+} и понижению релаксационных потерь.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-12-01508).

Список литературы

- [1] *Chen Z., Harris V.G.* // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. N 8. P. 081101.
- [2] *Stognij A.I., Lutsev L.V., Bursian V.E., Novitskii N.N.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. N 2. P. 023905.
- [3] *Stognij A., Lutsev L., Novitskii N., Besspalov A., Golikova O., Ketsko V., Gieniusz R., Maziewski A.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. N 48. P. 485002.
- [4] *Kajiwara Y., Harii K., Takahashi S., Ohe J., Uchida K., Mizuguchi M., Umezawa H., Kawai H., Ando K., Takanashi K., Maekawa S., Saitoh E.* // Nature 2010. V. 464. N 7286. P. 262–267.
- [5] *Sandweg C.W., Kajiwara Y., Ando K., Saitoh E., Hillebrands B.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. N 25. P. 252504.
- [6] *Kurebayashi H., Dzyapko O., Demidov V.E., Fang D., Ferguson A.J., Demokritov S.O.* // Nature. Mater. 2011. V. 10. P. 660–664.
- [7] *Hahn C., de Loubens G., Klein O., Viret M., Naletov V.V., Ben Youssef J.* // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. N 17. P. 174417.
- [8] *Nakayama H., Althammer M., Chen Y.-T., Uchida K., Kajiwara Y., Kikuchi D., Ohtani T., Geprägs S., Opel M., Takahashi S., Gross R., Bauer G.E.W., Goennenwein S.T.B., Saitoh E.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. N 20. P. 206601.
- [9] *Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B.* // Nature. Commun. 2014. V. 5. N 4700. P. 1–8.
- [10] *Lutsev L.V., Korovin A.M., Bursian V.E., Gastev S.V., Fedorov V.V., Suturin S.M., Sokolov N.S.* // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. N 18. P. 182402.
- [11] *Chang H., Li P., Zhang W., Liu T., Hoffmann A., Deng L., Wu M.* // IEEE Magn. Lett. 2014. V. 5. P. 6700104.
- [12] *Chen J., Heimbach F., Liu T., Yu H., Liu C., Chang H., Stückler T., Hu J., Zeng L., Zhang Y., Liao Z., Yu D., Zhao W., Wu M.* // J. Magn. Magn. Mater. 2018. V. 450. P. 3–6.
- [13] *Krichevtsov B.B., Gastev, S.V., Suturin S.M., Fedorov V.V., Korovin A.M., Bursian V.E., Banshchikov A.G., Volkov M.P., Tabuchi M., Sokolov N.S.* // Sci. Technol. Adv. Mater. 2017. V. 18. N 1. P. 351–363.
- [14] *Sokolov N.S., Fedorov V.V., Korovin A.M., Suturin S.M., Baranov D.A., Gastev S.V., Krichevtsov B.B., Maksimova K.Yu., Grunin A.I., Bursian V.E., Lutsev L.V., Tabuchi M.* // J. Appl. Phys. 2016. V. 119. N 2. P. 023903.

- [15] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
- [16] *Крупичка С.* Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. М.: Мир, 1976. Т. 2. 440 с.
- [17] *Spencer E.G., LeCraw R.C., Linares R.C., jr.* // Phys. Rev. 1961. V. 123. N 6. P. 1937–1938.
- [18] *Judy J.H.* // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. N 3. P. 1328–1330.
- [19] *Tchernev D.I.* // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. N 3. P. 1046–1047.
- [20] *Clogston A.M.* // Bell System Tech. J. 1955. V. 34. N 4. P. 739–760.
- [21] *Scott G.B., Page J.L.* // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. N 3. P. 1342–1349.