

Пленки железо-иттриевого граната с магнитными вихрями

В. Ф. Шкарь, В. Н. Варюхин

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, 83114 Донецк, Украина

Поступила в редакцию 17 июня 2008 г.

После переработки 7 июля 2008 г.

Исследованы субмикронные пленки железо-иттриевого граната. Обнаружен эффект переключения невязимного резонансного поглощения, обусловленный переключением поляризации вихрей.

PACS: 75.90.+w, 76.50.+g

Введение. 1. В свое время на основе замещенных пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) были разработаны запоминающие устройства, где элементом памяти являлся цилиндрический магнитный домен (ЦМД). Однако по разным причинам эти устройства не нашли широкого применения. В настоящее время в качестве ячейки памяти рассматривается магнитный вихрь, который, в частности, может существовать в наноразмерных пленках с плоскостью легкой намагниченности [1]. И поскольку размер вихря может находиться в пределах от нескольких единиц до сотен нанометров, то устройство на его основе должно иметь большую плотность записи информации.

2. В работе [2] была показана область существования магнитного вихря в наноразмерном диске в зависимости от его геометрического размера и магнитных характеристик материала. В результате теоретических исследований и математического моделирования было установлено, что для пермоллового наноразмерного диска с определенными параметрами при перемагничивании в нормальном магнитном поле существует критическое значение, при котором происходит переключение поляризации магнитного вихря. Это приводит к появлению гистерезиса на кривой намагничивания образца, поскольку намагниченность кора вихря может быть направлена по полю либо против поля.

3. В работе [3] путем аналитических исследований было показано, что магнитный вихрь через возбуждение колебаний определенного типа может активно взаимодействовать с внешним высокочастотным магнитным полем с круговой поляризацией.

Целью настоящей работы являлось обнаружение вихревого состояния пленки. В этом плане пленки ЖИГ, полученные методом жидкофазной эпитаксии, являются наиболее предпочтительным материалом, поскольку имеют рекордно узкую линию ФМР, что значительно облегчает поисковые исследования.

Образцы. Для исследований были приготовлены две серии образцов. Первая серия представляла набор пленок ЖИГ различной толщины, полученных методом травления исходного образца. Для улучшения согласования параметров пленки с подложкой в ее состав было введено незначительное количество скандия. Пленка выращена методом жидкофазной эпитаксии на (111)-ориентированной подложке из галлий-гадолиниевого граната. Толщина пленок менее 1 мкм определялась по скорости травления.

Вторая серия образцов была получена из двухслойной пленки также методом травления исходного образца. В основном стравливался первый верхний легкоосный ЦМД содержащий слой. Самая тонкая пленка из этой серии представляла собой практически второй слой толщиной 0.13 мкм с плоскостью легкого намагничивания и намагниченностью насыщения $4\pi M_s = 1250$ Гс.

Из всех образцов необходимо было выбрать такие, которые бы в нулевом магнитном поле не содержали доменную структуру. Для контроля была использована установка по исследованию поперечной низкочастотной магнитной восприимчивости на основе датчиков Холла, включенных по схеме компенсации напряжения. В качестве датчиков Холла использованы датчики положения SS490 фирмы Honeywell, имеющие линейные и идентичные между собой характеристики. Геометрия эксперимента была следующей. Переменное магнитное поле частотой 200 Гц было направлено в плоскости образца и нормально плоскости датчиков Холла, один из которых был плотно прижат к торцу пленки, другой был на таком расстоянии, чтобы магнитный поток от пленки не падал на него. Напряжение от датчиков компенсировало друг друга. Таким образом, измерялось напряжение, созданное только магнитным потоком пленки. После усиления и синхронного детектирования сигнал наблюдался на мониторе по оси Y. По оси X подавался сигнал, про-

порциональный магнитному полю, нормально приложенному к образцу и касательно к датчикам Холла.

На рис.1 представлены зависимости суммарного напряжения датчиков Холла от величины нормаль-

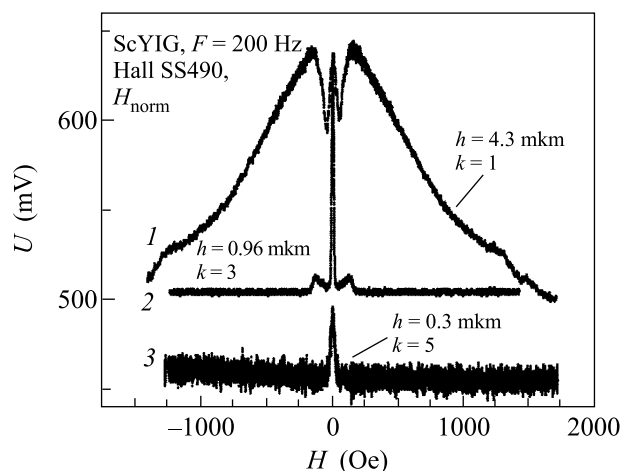


Рис.1. Зависимость суммарного напряжения на датчиках Холла от нормального магнитного поля для пленок с различной толщиной h , здесь k – коэффициент усиления

ного магнитного поля для первой серии образцов. Из рисунка видно, что для образца толщиной 4.3 мкм, кроме ярко выраженного максимума в нулевом поле, обусловленного, по-видимому, необратимым вращением намагниченности за счет кубической анизотропии [4], существует сигнал от пленки вплоть до поля насыщения образца, когда намагниченность направлена по полю, совпадающего с полем коллапса доменной структуры. Для пленки толщиной 0.96 мкм поле, при котором исчезает сигнал от доменной структуры, уже не совпадает с полем насыщения образца, а значительно меньше, то есть существует интервал полей, где доменная структура уже отсутствует (сигнала нет), но намагниченность еще не направлена по полю. И, наконец, для пленки 0.3 мкм доменная структура отсутствует во всем интервале магнитных полей. Такая пленка, вероятнее всего, находится не в однодоменном, а в вихревом состоянии.

Таким образом, для проведения исследований из первой серии образцов была отобрана пленка толщиной 0.3 мкм, а из второй серии – пленка, представляющая практически второй слой, толщиной 0.13 мкм.

Эксперимент. Итак, как следует из [3], для обнаружения неоднородного вихревого состояния пленки необходимо возбуждать магнитное колебание поляризованным по кругу сверхвысокочастотным (СВЧ) магнитным полем. Такое поле можно создать с помощью замедляющей системы электромагнитной волны [5] типа “меандр” с определенными [4]

характеристиками. Образец помещался в область круговой поляризации поля меандра, которая находится приблизительно на расстоянии 17 мкм от его плоскости (см. рис.2). (Теоретическое и

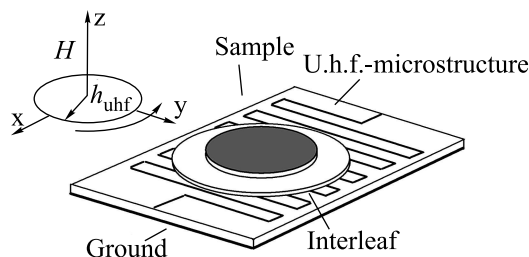


Рис.2. Геометрия эксперимента для наблюдения переключения невязимого резонансного поглощения

экспериментальное подтверждение наличия циркуляционной поляризации СВЧ поля такой структуры и простую технологию ее изготовления можно найти в реферате “Определение оптимальных размеров датчика СВЧ поверхностных волн (П.В.) на основе меандровой линии замедления (Л.З.)” на сайте <http://www.reflist.ru/docnext/3174.2.shtml>. С помощью поворотных устройств образца и магнита поле можно было устанавливать вдоль любой оси монокристаллической пленки. Исследования были проведены в диапазоне частот 300–1200 МГц. На рис.3 представлена зависимость первой производной

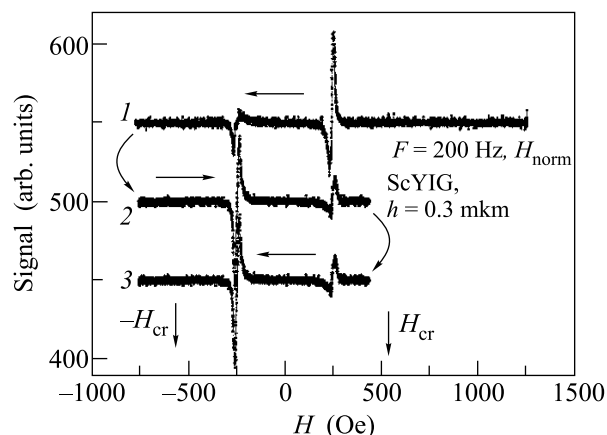


Рис.3. Зависимость первой производной магнитной восприимчивости от нормального магнитного поля для последовательного ряда его изменений

сигнала ФМР от нормального к пленке магнитного поля на частоте 640 МГц для образца толщиной 0.3 мкм из первой серии. Из рисунка видно, что в пленке наблюдается невязимое поглощение СВЧ энергии, то есть спектр ФМР является асимметричным относительно нулевого значения поля. Если поле не достигает критической величины, то асим-

метрия спектра ФМР не меняется (рис.3, кривые 2 и 3), если достигает, то происходит переключение асимметрии спектра (рис.3, кривые 1 и 2).

Следует также отметить, что абсолютная величина критического поля для отрицательного и положительного значений в общем случае является разной и зависит как от полярного, так и азимутального угла. И вообще, обнаружить асимметрию спектра удастся только после длительной и кропотливой подстройки по этим углам. Когда эти углы установлены, переключение невязимного поглощения осуществляется стабильно. И еще, чем тоньше пленка, тем легче настроиться на проявление переключения невязимного поглощения. Это явление было обнаружено на пленке толщиной 0.13 мкм и намагниченностью насыщения $4\pi M_s = 1250$ Гс, при этом H_{Cr} составляло 460 Э (того же порядка, что и в [2]), а интенсивность линии ФМР при переключении изменялась в 30 раз.

Далее, при уменьшении толщины пленки одновременно с исчезновением сигнала от доменной структуры и появлением переключения невязимного ФМР появляется и резонансное поглощение (предсказанное в [3]) при нулевом значении поля (рис.4) в широком

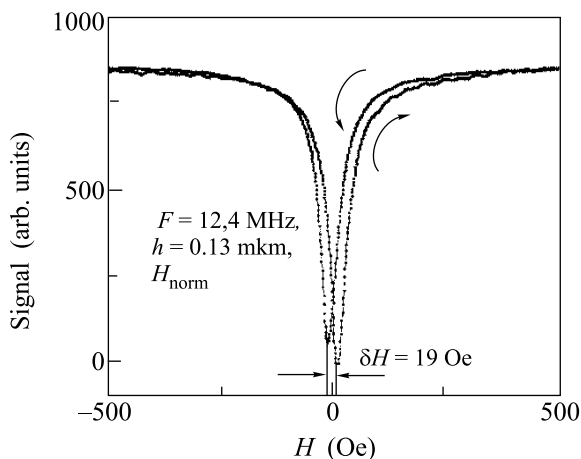


Рис.4. Зависимость магнитной восприимчивости от нормального магнитного поля для образца из второй серии с $h = 0.13$ мкм

интервале частот (по крайней мере, 5–30 МГц). Особенности этого резонанса: 1) он хорошо возбуждается высокочастотным (ВЧ) полем аксиальной симметрии (плоская катушка в виде улитки), 2) наблюдается гистерезис (как и в [2]) в интервале между положительным и отрицательным значениями критического поля. Для пленки с указанной выше характеристикой ширина гистерезиса по полю составляла 19 Гс.

Обсуждение. Для тонких (меньше 1 мкм) пленок ЖИГ с доменной структурой вектор намагни-

ченности в доменах лежит практически в плоскости пленки. Такие пленки легко перемагничиваются планарным магнитным полем. Уже в поле 20–30 Э они находятся в насыщенном состоянии и датчиком Холла, расположенным у торца пленки, можно обнаружить ее поле рассеяния и записать петлю перемагничивания. Однако чем тоньше пленка, тем слабее сигнал. Использование переменного поля и синхронного детектирования позволяет значительно улучшить соотношение сигнал-шум, однако сигнал на датчике Холла будет пропорционален уже не намагниченности, а магнитной восприимчивости пленки. Тем не менее, и этого достаточно для того, чтобы иметь некоторое представление о магнитном состоянии пленки. Из рис.1 видно, как изменяется планарная магнитная восприимчивость пленок при изменении внешнего нормального к пленке магнитного поля. Для относительно толстой 4.3 мкм пленки во всем интервале изменения поля наблюдается сигнал (рис.1 кривая 1). При этом в пленке вплоть до поля насыщения существует доменная структура. Следовательно, сигнал обусловлен наличием доменной структуры. С исчезновением доменов при достижении поля насыщения исчезает и сигнал. При уменьшении толщины пленки до 0,96 мкм радикально изменяется и вид кривой восприимчивости (рис.1, кривая 2) — сигнал от пленки исчезает в поле, значительно меньшем, чем поле насыщения. Можно предположить, что в этом поле доменная структура становится неустойчивой и происходит трансформация в другую магнитную конфигурацию, у которой отсутствует планарное поле рассеяния, наводящее сигнал в датчике Холла. Такой конфигурацией может быть вихревое состояние пленки, когда магнитные моменты замкнуты сами на себя. (Аналогичная ситуация рассматривалась в работе [2] для пермоллового нанодота. Однако там был переход из однодоменного состояния, характерного для нанодотов, в вихревое). Для пленки толщиной 0.3 мкм, как видно из рис.1, кривая 3, сигнал отсутствует во всем диапазоне полей. Следовательно, она изначально находится в неоднородном, предположительно вихревом, состоянии. Рассмотрим это предположение.

Для пленки ЖИГ, выращенной на (111)-ориентированной подложке, топологические магнитные вихри должны иметь поляризацию, а не быть чисто плоскостными, поскольку присутствует, во-первых, кубическая магнитная кристаллическая анизотропия, одна из легких осей которой перпендикулярна плоскости пленки, а во-вторых, одноосная анизотропия с легкой осью намагничивания, нормальной плоскости пленки за счет несоответствия

параметров решетки пленки и подложки. Может присутствовать и одноосная ростовая технологическая анизотропия. (В ЦМД материалах эти вклады хорошо изучены). Следовательно, ядра вихрей обязательно будут иметь нормальную компоненту намагниченности – поляризацию. В свою очередь, наличие поляризации ядер вихрей приводит, во-первых, к появлению критического поля [2] переключения поляризации вихрей (поляризованные против поля становятся поляризованными по полю), а во-вторых, как следствие, к гистерезису [2] кривой перемагничивания образца. И то и другое наблюдается в субмикронных (менее 0.3 мкм) пленках ЖИГ или пленках типа ЖИГ (см. рис.3 и 4): 1) Переключение поляризации вихрей при достижении критического поля наблюдается через переключение невязанного резонансного поглощения (рис.3). Последнее имеет место только в том случае, если ФМР возбуждается СВЧ полем с круговой поляризацией, что следует также из [3]. При линейной поляризации СВЧ поля невязанность ФМР отсутствует. В нашем случае поляризованное по кругу поле создавалось замедляющей системой типа меандр. Пленка прижималась к меандру через целлулоидную прокладку, толщиной 17 мкм. Без прокладки ФМР является взаимным. (Частоту ФМР можно было подобрать так, чтобы поле ФМР совпадало с полем переключения поляризации вихрей. При этом при прохождении через критическое поле наблюдалась интересная картина деформации линии ФМР.) 2) Гистерезис наблюдался на кривой магнитной восприимчивости на частоте 12.4 МГц (рис.4).

Таким образом: 1) возбуждение поляризованным по кругу СВЧ полем невязанного ФМР, 2) эффект пе-

реключения этого резонансного поглощения при достижении критического поля, 3) совпадение этого поля по порядку величины с аналогичным полем из теоретической работы [2], 4) появление магнитного колебания с аксиальной симметрией, предсказанного в теоретической работе [3], 5) наличие гистерезиса, предсказанное в [2], указывают на то, что пленка находится в неоднородном вихревом состоянии.

Выводы 1. Обнаружен эффект переключения невязанного резонансного поглощения, обусловленный переключением поляризации магнитных вихрей.

2. Определено критическое поле переключения поляризации вихрей. Установлено, что оно не обязательно должно быть одинаковым для противоположных направлений поля.

3. Показана возможность определения поляризации магнитного вихря по поглощению СВЧ поля с круговой поляризацией.

4. Установлено, что пленки ЖИГ толщиной менее 0.3 мкм находятся в вихревом состоянии.

5. Установлено, что характерной особенностью для пленок ЖИГ в вихревом состоянии является возбуждение резонансного поглощения в нулевом магнитном поле в диапазоне частот 5–30 МГц.

1. А. М. Косевич, Б. А. Иванов, А. С. Ковалев, *Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны*, Киев: Наукова думка, 1983, с. 189.
2. В. П. Кравчук, Д. Д. Шека, ФТТ **49**, 1834 (2007).
3. А. С. Ковалев, Я. Е. Прилепский, ФНТ **28**, 1292 (2002).
4. В. Ф. Шкарь, Е. И. Николаев, В. Н. Саяпин и др., ФТТ **46**, 1043 (2004).
5. Р. А. Силин, В. П. Сазонов, *Замедляющие системы*, М.: Изд. "Сов. радио", 1966, с. 632.