

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПРИЛОЖЕННОГО ВО ВРЕМЯ НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК, НА ИХ СВОЙСТВА

Соловьёв П. Н.,

научный руководитель д-р. техн. наук Беляев Б.А.

Сибирский федеральный университет

Тонкие пленки из магнитомягких материалов (ТМП) широко используются в головках записи и считывания информации, в датчиках слабых магнитных полей, на их основе так же разрабатываются конструкции различных электрически управляемых устройств в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ): фильтров, амплитудных модуляторов, ограничителей мощности, фазовых манипуляторов. Основными характеристиками, определяющими качество тонкопленочных структур для высокочастотных датчиков и устройств обработки сигналов, является высокая магнитная проницаемость и малые потери мощности на СВЧ.

Использование планарных магнитных материалов, таких как тонкие пленки, многослойные структуры и др., позволяет значительно повысить магнитную проницаемость среды, а так же верхнюю границу рабочего диапазона частот. Благодаря большому значению анизотропии формы, собственный магнитный момент планарных наноструктур лежит в их плоскости. Это приводит к более сложному соотношению между магнитной проницаемостью и частотой ФМР, которое носит название закона Аше:

$$(\mu_{cm} - 1)f_p^2 = (\gamma 4\pi M_0)^2. \quad (2)$$

Закон Аше показывает явное преимущество высокочастотных свойств планарных магнитных материалов, по сравнению с объемными средами.

Таким образом, для достижения высоких СВЧ параметров тонких пленок требуется увеличение их намагниченности насыщения при одновременном контроле величины одноосной магнитной анизотропии, которая определяет частоту ФМР в отсутствие внешнего магнитного поля.

Как известно, свойства ТМП, которые создаются с помощью вакуумного напыления, зависят от многих технологических факторов. В их число входит и внешнее магнитное поле, которое присутствует при напылении образцов. Изменяя величину, направление и однородность поля, можно управлять характеристиками получаемых пленок в широких пределах, тем самым находить условия для улучшения их СВЧ свойств.

В настоящей работе представлены результаты серии экспериментов, в которых изучались основные магнитные характеристики тонких пленок, осажденных в различных магнитных системах. ТМП были получены методом вакуумного напыления пермаллоя на стеклянные подложки, которые нагревались до температуры 200°-250° С. Этот диапазон температур, как показали наши предыдущие исследования, является оптимальным для получения качественных образцов. Пермаллой содержал около 73% Ni и около 27% Fe.

За единый цикл напыления изготавливалась серия из 12 образцов, располагаемых на подложкодержателе приблизительно в центре каждой из магнитных систем (рис. 1). Расстояние между подложками размером 10×10 мм² было 5 мм. Большое количество образцов в серии позволило проследить изменение свойств пленок в зависимости от пространственной вариации магнитного поля и угла падения молекулярного луча.

Исследование основных магнитных характеристик полученных пленок проводилось на сканирующем спектрометре ферромагнитного резонанса, с помощью которого измерялись величина и угол направления одноосной магнитной анизотропии и эффективная намагниченность насыщения образцов, с локальных участков диаметром ~ 1 мм с шагом через 2 мм.

Данные о составе и толщине пленок были получены с помощью рентгено-флуоресцентного анализа, который показал, что разброс толщин всех полученных пленок попадал в интервал от 450 до 580 Å. В тоже время, состав пленок отклонялся от состава исходного напыляемого пермаллоя не более чем на 2%.

Для исследования воздействия внешних полей на характеристики тонких пленок было использовано пять различных магнитных систем, которые включали в себя SmCo магниты в форме дисков, диаметром 15 и толщиной 5 мм, а также магнитопроводы, изготовленные из электротехнической стали АРМКО. Схематическое изображение всех магнитных систем и силовых линий, отражающих структуру магнитных полей, которые они создают, показаны на рис. 1.

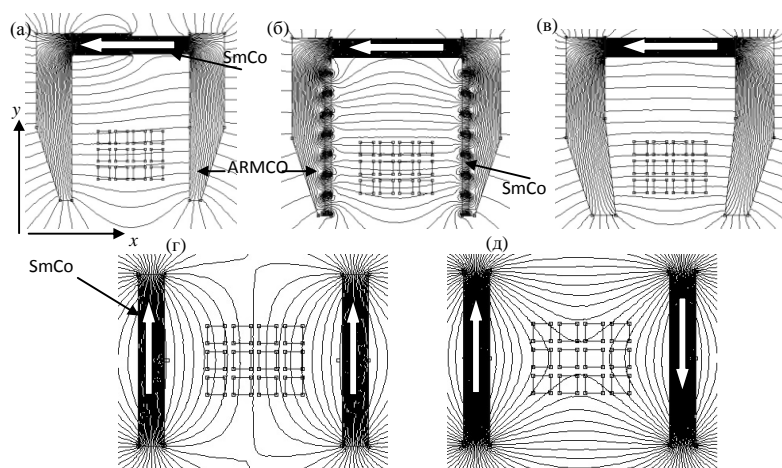


Рис. 1. Схематическое изображение магнитных систем (в плоскости xu), и изолинии магнитной индукции (получены двумерным моделированием). Белые стрелки – направление намагниченности. Квадраты – расположение подложек. (а) – система **M1**, (б) – **M3**, (в) – **M4**, (г) – **M5++** и (д) – **M5+-**.

Используемые в эксперименте магнитные структуры представляли собой следующие конструкции. Конструкции **M1**, **M3** и **M4**, показанные на рис. 1 (а-в), имеют одинаковые размеры ($140 \times 160 \times 17$ мм) и состоят из магнитопроводов, изготовленных из АРМКО. В **M1** источником магнитного поля являются два, соединенных последовательно, самарий-кобальтовых магнита цилиндрической формы, а в системах **M4** и **M3** такие магниты набраны из SmCo дисков. Система **M3** представляет собой модификацию **M1**, где в магнитопроводе, для усиления магнитного потока, сделаны вставки из дополнительных дисков SmCo, а конструкция **M4** имеет небольшое сужение на свободных концах магнитопровода, увеличивающие однородность поля в этой области. Система **M5** состоит из двух цилиндров, образованных SmCo дисками, размещенными в медных оправках. Намагниченности цилиндров в **M5++** сонаправлены, а в **M5+-** встречно направлены.

Таким образом, благодаря использованию различных конфигураций магнитных систем, в области пленок были получены различные магнитные поля – отличающиеся как по направлению, так и по величине и градиенту. Используя зондовую методику, были экспериментально измерены напряженности магнитных полей во всех магнитных

системах (рис. 4 (а)). Видно, что в области расположения образцов магнитные поля достаточно сильно изменяются от пленки к пленке.

Как известно, наиболее сильно влияние, которое оказывает магнитное поле на напыляемые тонкие пленки, проявляется в формировании направления легкой оси одноосной магнитной анизотропии. Ось легкого намагничивания (ОЛН) магнитных пленок почти соответствует направлению приложенного магнитного поля, так как после остывания расплавленного металла во внешнем поле происходит закрепление различных дислокаций и структурных неоднородностей, приводящее к появлению выделенных осей, причем в разных частях пленки эти направления могут различаться. Сканирующий спектрометр ФМР позволяет фиксировать распределение этих неоднородностей по площади образцов. Полученные с помощью спектрометра угловые распределения ОЛН для образцов, изготовленных в трех магнитных системах, показаны конусами на рис. 3. Видно, что направления ОЛН примерно следуют за направлением внешнего поля.

От внешнего магнитного поля зависит не только направление, но и величина одноосной анизотропии (H_k). Предполагается, что H_k увеличивается с увеличением напряженности внешнего поля, так как у разных дефектов разная энергия активации, и с увеличением поля вероятность перемещения дислокации увеличивается. Однако, когда угол падения молекулярного луча отличается от нормали к плоскости подложки, возникает выделенное направление в пленке, вызванное геометрическим эффектом «самозатенения». И в этом случае ось легкого намагничивания формируется перпендикулярно направлению пучка. В зависимости от того, совпадает направление анизотропии, индуцированной наклонным падением, с направлением внешнего поля или нет, происходит увеличение или уменьшение итоговой одноосной анизотропии образцов.

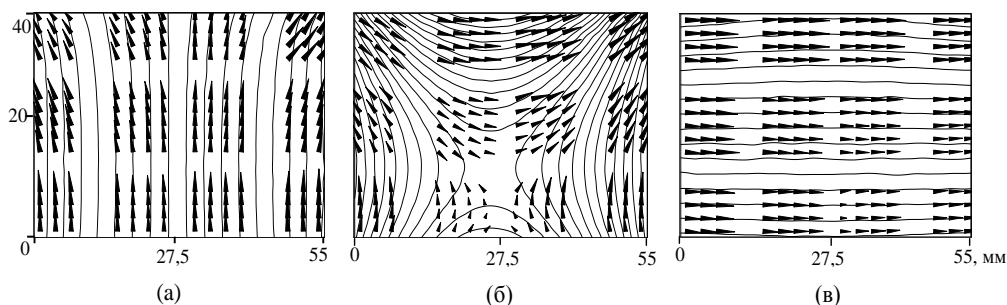


Рис. 3. Направления ОЛН для массива пленок в трех магнитных системах: (а) – **M5++**, (б) – **M5+-**, (в) – **M4**. Конусы показывают - локальные направления ОЛН в получаемых пленках, линии – направление магнитного потока внешнего поля.

На рис. 4 показано относительное расположение набора пленок и источника пучка атомов пермаллоя, а так же углы падения пучка вдоль оси x . Видно, что максимальный угол вдоль оси x составляет около 7° , так что можно ожидать, что величина анизотропии будет зависеть от расположения пленок относительно центра массива.

Однако для определенных магнитных систем наблюдается достаточно хорошая закономерность между H_k и $H_{внеш.}$. Как видно из рис. 5, для магнитной системы **M5+-**, где образуется относительно высокий градиент полей, проявляется четкая зависимость поля анизотропии от величины внешнего поля. В тоже время, для системы **M4**, где поле меняется слабо, H_k примерно одинакова для всех пленок, а влияние углового напыления почти не обнаруживается.

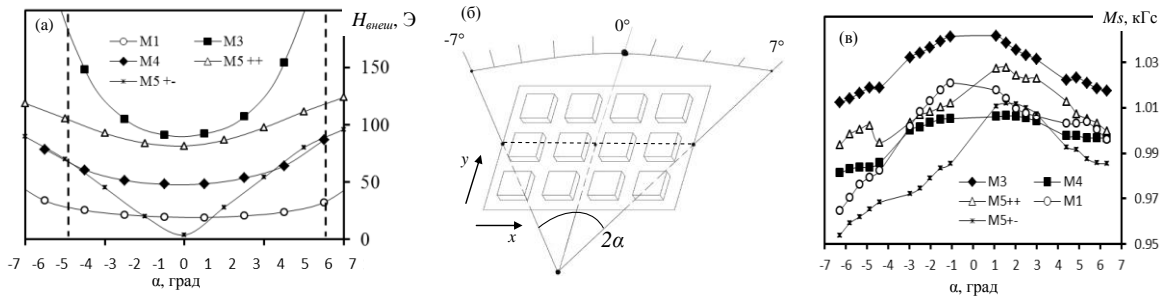


Рис. 4. (а) – напряженность полей в различных системах, измеренная в середине массива пленок. Штриховыми линиями обозначена область, в которой находятся пленки. (б) – расположение массива пленок относительно источника потока пермаллоя. Горизонтальная пунктирная линия обозначает путь, вдоль которого измерялись значения $H_{внеш}$ и M_s . (в) – намагниченность насыщения пленок в массиве, для различных магнитных систем.

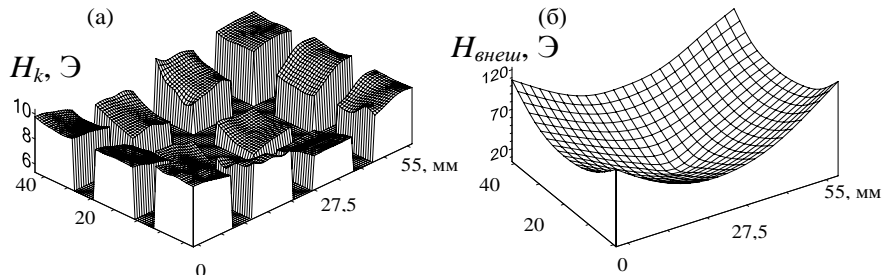


Рис. 5. Величина H_k , измеренная по поверхности массива пленок (а) и напряженность внешнего магнитного поля в области расположения пленок в магнитной системе (б), для системы **M5+-**.

Как уже упоминалось ранее, контроль над намагниченностью тонких магнитных пленок необходим для улучшения их СВЧ свойств. Поэтому важной задачей является определение влияния магнитных полей на данную характеристику ТМП. На рис. 4 (в) показана намагниченность насыщения, измеренная для пленок в центральном ряду. Видно, что M_s зависит от величины внешнего поля: намагниченность принимает наибольшее значение для пленок, напыленных в системе **M3**, где, как видно из рис. 4 (а), создается наибольшая напряженность поля по сравнению с другими системами. В тоже время независимо от магнитной системы наблюдается схожее поведение M_s – намагниченность растет от периферии массива к его центру. Однако это повышение не всегда симметрично. Обнаруженное увеличение намагниченности, вероятно, связано с тем, что напряжения, возникающие в пленках при падении пучка атомов пермаллоя, изменяются таким образом, что максимум образуется не совсем напротив источника атомов. Учитывая тот факт, что величина M_s в тонких пленках имеет сильную зависимость от внутренних напряжений, именно возникающими напряжениями можно объяснить наблюдаемое поведение намагниченности насыщения от образца к образцу.

Таким образом, исследовано влияние неоднородностей внешних магнитных полей, а также угла падения молекулярного луча при вакуумном осаждении тонких магнитных пленок на их основные характеристики. Как известно, при формировании пленок в процессе напыления они испытывают влияние со стороны большого количества различных факторов. Поэтому наблюдаемые свойства образцов являются результатом конкуренции или согласованности разнообразных физических воздействий. Однако часто бывает сложно, а иногда и невозможно, разделить или хотя бы определить степень влияния существующих механизмов, имеющих к тому же различную физическую природу. Результаты наших исследований показывают, что измерения характеристик пленочных структур на сканирующем спектрометре ФМР позволяют как обнаруживать, так и фиксировать степень влияния внешних факторов на свойства пленочных образцов.