

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ  
В ЭЛЕМЕНТАХ МИКРОСХЕМ

В.И. Нецветов, Ю.В. Медведев, А.И. Коссе, В.В. Щиголов

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины,  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина, [aleksandr.kosse@gmail.com](mailto:aleksandr.kosse@gmail.com)

Статические, и особенно динамические, свойства ЦМД (цилиндрические магнитные домены), значительно различаются между неимплантированными и ионно-имплантированными ЭФГП указанного состава. Ионная имплантация, как видно из рис. 1, увеличивает скорость и подвижность ЦМД в ионно-имплантированных ЭФГП (1) (ЭФГП – эпитаксиальная феррит-гранатовая пленка) почти вдвое по сравнению с неимплантированной ЭФГП (2). Ионная имплантация поверхности доменосодержащей кристаллической пленки является одним из методов подавления так называемых жестких доменов [1]. Жесткость, или магнитная твердость, ЦМД обусловлена наличием в их доменных стенках вертикальных блоховских линий (ВБЛ), то есть областей разворота вектора намагниченности в плоскости оси легкого намагничивания (ОЛН) кристаллической пленки. ВБЛ могут пронизывать доменную границу по всей ее высоте (толщине пленки), но они же могут образовывать и сложные, так называемые горизонтальные блоховские линии (ГБЛ). Не вдаваясь в подробности структурных особенностей ВБЛ и ГБЛ, отметим, что плотность количества этих линий в доменной границе ЦМД пропорциональна снижению величин скорости и подвижности последних. Кроме того, при перемещении в магнитном градиенте поля смещения  $H_{см}$  (магнитное поле вдоль ОЛН) ЦМД с имеющимися в его доменной стенке ВБЛ сдвигается под углом к направлению градиента, величина угла сноса которого возрастает с ростом числа ВБЛ в границе. С таким (нежелательным в каналах продвижения) свойством жестких доменов можно бороться, углубляя магнитостатическую ловушку (МСЛ), в которой продвигается ЦМД то есть увеличивая ток в каналах продвижения и придавая ей форму, напоминающую яму в виде гиперboloида вращения. Это реализовалось в исследуемой доменопродвигающей структуре с токовым управлением в виде симметричных двухслойных меандров.

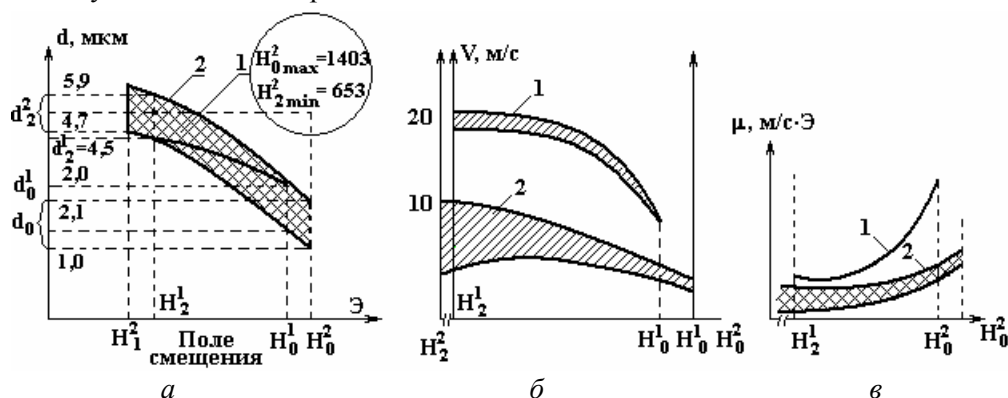


Рис. 1. Свойства ЦМД в имплантированной (1) и неимплантированной (2) ЭФГП.  
а – зависимость диаметров коллапса  $d_0$  и эллиптической неустойчивости  $d_2$  для ЭФГП 1 и 2;  
б – зависимость скорости ЦМД  $V_s$  от поля смещения для ЭФГП 1 и 2;  
в – зависимость подвижности  $\mu$  от  $H$  для 1 и 2 ЭФГП

Дополнительной проблемой магнитотвердых ЦМД в каналах продвижения в стартстопных режимах является их вращение по дуговой траектории после окончания тока продвижения. ЦМД проявляет как бы инерцию последействия, связанную с перераспределением плотности ВБЛ сразу после его остановки. Это приводит к небольшому (порядка диаметра ЦМД) смещению центра ЦМД [2]. Но такое смещение ощутимо влияет на область устойчивости работы (ОУР) канала продвижения, так как следующая МСЛ, подхватывающая ЦМД в стартовой части режима продвижения, может не захватить его, который был смещен с нужной позиции.

Для подавления этих неприятных (с точки зрения скорости и надежности работы микросхем) свойств жестких ЦМД используют облучение поверхности ЭФГП ионами водорода или других газов. Такое искусственное введение микродефектов в кристаллической структуре пленки приводит к небольшой наведенной плоскостной анизотропии, позволяющей в большей мере подавлять возникновение ВБЛ, стимулируя, особенно при нуклеации ЦМД, к возникновению минимального их количества.

В работе использовалась ЭФГП вышеуказанного состава с имплантированным слоем толщиной около 100 нм ионами с энергией  $200 \pm 100$  кэВ и дозой имплантации  $10^{16} - 10^{17}$  см<sup>2</sup>. Но даже в имплантированных ЭФГП при больших скоростях движения ЦМД или во время его зарождения импульсами генерации с очень крутыми фронтами (<15 нс для используемой в данной работе пленки) жесткие домены все же возникают. Для борьбы с таким ограничивающим ОУР устройства явлением было введено небольшое градиентное поле в плоскости  $H_{пл} \approx 5-6$  Э, направленное вдоль канала продвижения. Чтобы не вводить специальный магнит в качестве источника такого поля, нами использовался наклон вектора поля смещения на  $4^\circ$  в сторону движения ЦМД, что и обеспечивало нужную нам величину поля в плоскости. При этом исследования показали, что в узле генерации зарождаются ЦМД с одной парой ВБЛ, что является единственной комбинацией числа ВБЛ в доменной стенке, позволяющей двигаться в направлении градиента магнитного поля без углового отклонения [2].

На рис. 2,а показана часть двухслойного токового канала продвижения ЦМД в виде двух меандров, сдвинутых один относительно другого на четверть пространственного периода. Токи продвижения в каналах сдвинуты на четверть временного периода: в нижнем канале  $i_n = I_0 \sin(\omega t)$ , в верхнем  $i_n = 4/3 I_0 \cos(\omega t)$ , где  $I_0$  — амплитуда тока в нижнем канале;  $\omega$  — частота тока.

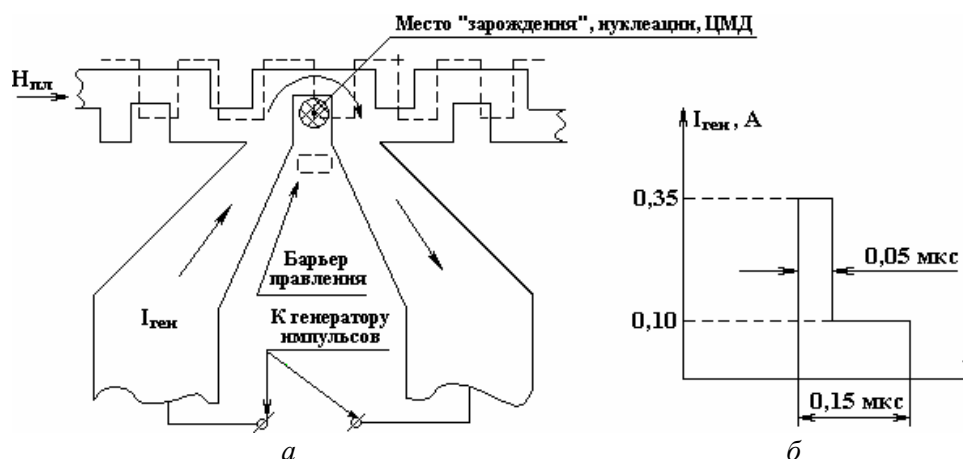


Рис. 2. Узел генерации и продвижения ЦМД.

а — топологический рисунок узла нуклеации и канала продвижения ЦМД (штриховой линией обозначена срединная линия меандра верхнего слоя канала продвижения — это выполнено для того, чтобы не загромождать рисунок); б — форма импульса генерации  $I_{ген}$

Так как верхний слой отстоит выше от доменосодержащего слоя, чем нижний, то для выравнивания глубин магнитных ловушек этими слоями верхний слой необходимо питать током на  $1/3$  большим. Такой пространственно-временной сдвиг обеспечивает последовательный ряд бегущих с частотой  $\omega$  магнитных ловушек, продвигающих информационный двоичный код в виде наличия (1) или отсутствия (0) ЦМД.

В канал продвижения встроена генераторная петля, так что часть ее является и частью канала. Это обеспечивает одновременную синхронную работу обоих узлов. На рис. 2,а показано место нуклеации ЦМД, которое соответствует пространственной фазе такта продвижения. Вид токового импульса в генераторной петле показан на рис. 2,б, где первым импульсом создается локализованная область обратной намагниченности, обеспечивающая зарождение сферического домена внутри ЭФГП, а вторым импульсом стимулируется его прораствание вдоль ОЛН по всей толщине ЭФГП — возникает ЦМД [3]. При этом в доменной границе зарождающегося ЦМД, благодаря наличию имплантированного слоя и поля в плоскости  $H_{пл}$ , возникает пара ВБЛ, направленных по градиенту  $H_{пл}$ , что обеспечивает продвижение ЦМД четко вдоль канала без угловых отклонений и последствий. Заметим, что импульс тока генерации по амплитуде значительно больше  $I_0$ , он сопровождается запаздывающим импульсом теплового градиента, способного сдвинуть место положения ЦМД,

приводя к сбою в работе канала продвижения. Для этого было произведено неглубокое локальное травление по технологии [4], обеспечивающее удержание ЦМД в необходимой позиции.

Подстилающий слой двуокиси кремния между ионно-имплантированной поверхностью и первым токопроводящим слоем, в котором расположены магниторезистивный датчик ЦМД из пермаллового сплава [5] и нижний меандр канала продвижения с генераторной петлей, выполняет функции слоя, демпфирующего напряжения не только растяжения-сжатия, но и частичного теплоизолятора.

Напряжения растяжения-сжатия возникают на границах контура топологических рисунков в слоях металлических покрытий. Это происходит из-за того, что коэффициент температурного расширения феррит-гранатовой пленки существенно отличается от напыляемых металлических слоев (тройного слоя «хром-медь-хром» и пермаллоя). Напыление производится при температурах от 200 до 400°C для разных слоев. Остывание до комнатной температуры приводит к возникновению напряжения сжатия-растяжения вдоль границ вытравливаемых фотолитографическим методом топологических рисунков (меандров, датчиков, генератора). Однако благодаря специально подобранному составу ЭФГП коэффициенты магнитострикции сведены к такому минимуму, который не позволяет формировать ощутимые магнитные ямы и барьеры на пути продвижения ЦМД.

Оптимальная толщина подслоя SiO<sub>2</sub> составляет 0,15 мкм из следующих соображений. При  $h \leq 0,13$  мкм в пленке SiO<sub>2</sub> еще могут возникать поры в виде проколов, что крайне нежелательно, так как при плазменном напылении пермаллового слоя, в котором методом фотолитографии формируют датчик ЦМД, частицы магнитного сплава, оседая в порах SiO<sub>2</sub>, создадут магнитные дефекты, задерживающие ЦМД. Если  $h > 0,17$  мкм, то для создания необходимой глубины МСЛ придется ощутимо увеличивать амплитуду тока  $I_0$ , что в свою очередь приводит к нежелательному потоку тепла, снижающему ОУР продвигающего узла. Демпфирующий слой SiO<sub>2</sub> также предохраняет ионно-имплантированную поверхность ЭФГП от многократных технологических операций в процессе изготовления микросхемы, приводящих к разогреву во время напыления различных слоев и их химического травления.

Узел считывания ЦМД является наиболее узкой частью в смысле устойчивости работы по сравнению с остальными узлами — генератором и каналом продвижения домена. Датчиком наличия информационной единицы (преобразованный в полосу ЦМД) является прямоугольник из магниторезистивного пермаллоя, конструкция которого описана в [6]. Последовательность операций поэтапного растяжения круглого ЦМД в полосовой (для получения надежного отношения «сигнал-шум», поступаемого в усилитель), а также поэтапного сжатия и коллапса (уничтожения, схлопывания) ЦМД вызывает необходимость в увеличенных значениях тока для растяжения ЦМД и его коллапса. Это приводит к ощутимым тепловым потокам, снижающим и сужающим ОУР всей микросхемы. Попытки уменьшить тепловую нагрузку узла считывания за счет единичного такта вместо ряда последовательных тактов, расширения круглого ЦМД сразу в полосовой до длины, соизмеримой с длиной датчика, оказались неприемлемыми. Единичный такт расширения ЦМД токовым импульсом, обеспечивающим быстрое продвижение границы ЦМД под полосой пермаллового датчика, приводил к нескольким неприятным фактам. Как упоминалось выше, движение доменной границы со скоростью насыщения  $V_s$ , даже в ионно-имплантированной пленке, приводило к накоплению существенного количества ВБЛ в стенке полосового домена. Было также замечено, что после такого единичного акта растяжения домена уровень считываемого сигнала заметно снижался. Причиной этому, как оказалось впоследствии, явилось образование хаотической доменной структуры в самой пермаллоевой полосе датчика в результате его перемагничивания растягивающим импульсом тока. Такая доменная структура магниторезистивного датчика, как упоминалось в [5], не позволяет получить ощутимого изменения его проводимости, то есть сигнала о наличии ЦМД.

Кроме того, после окончания такта считывания полосовой домен, стягиваясь в круглый ЦМД, часто оказывался в непредсказуемой и неприемлемой для его коллапса позиции. Это происходило из-за тех же ВБЛ, которые были накоплены в процессе растяжения ЦМД, — эффект последствия смещал положение ЦМД, выводя его из необходимой позиции для коллапса. К этому добавлялось и то обстоятельство, что длительность однотокового растяжения требовала большего времени, чем такт продвижения или генерации, что ограничивало быстродействие всего устройства.

Таким образом, при выборе материала ЭФГП для микросхемы следует обращать внимание на такой его состав, который обеспечивал бы минимальный коэффициент магнитострикции вдоль ОЛН (для предотвращения магнитных барьеров и ям из-за напряжений сжатия-растяжения вдоль топологических границ). При этом материал ЭФГП должен обладать магнитострикцией в плоскости, так как эффект подавления магнитотвердых ЦМД благодаря ионной имплантации обусловлен именно

этим свойством.

Для усовершенствования характеристик микросхем на основе доменосодержащих ЭФГП необходимо, по мнению авторов, изменить общепринятую концепцию считывания информации, описанную со всеми ее недостатками в данной работе, ограничивающую быстродействие и надежность всего устройства. Возможно, следует направить поиск на применение материалов с гигантским магниторезистивным эффектом типа манганитов, но проявляющих такое свойство при малых магнитных полях порядка поля рассеивания ЦМД (50–100 Э) и при комнатных температурах. Это дает возможность иметь размеры считывающих датчиков порядка диаметра ЦМД, что уменьшит площадь чипа, тепловую нагрузку и увеличит быстродействие. Авторами ведется поиск многослойных структур с указанными свойствами, предполагающих их формирование напылением нанотолщинных слоев как магнитопроводников, так и магнитодиэлектриков. При удачном сочетании технологических возможностей и необходимых физических свойств материалов интерес к магнитным микросхемам будет возрастать.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бобек Э., Делла Торре Э. *Цилиндрические магнитные домены*. Пер. с англ. М.: Энергия, 1977.
2. Лисовский Ф.В. *Физика цилиндрических магнитных доменов*. М.: Сов. радио, 1979.
3. Раев В.К., Ходенков Г.Е. *Цилиндрические магнитные домены в элементах вычислительной техники*. М.: Энергоиздат, 1981. С. 94–95.
4. Netsvetov V.I., Kosse A.I., Shchigolev V.V., Khokhlov V.A. and Medvedev Yu.V. A Study of the Potential Barriers of Cylindrical Magnetic Domains in Garnet Films Obtained by the Chemical and Electron-Beam Etching Methods. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009, **45**(4), 294–296.
5. Netsvetov V.I., Medvedev Yu.V., Shchigolev V.V., Kosse A.I. and Khizhenkov P.K. Magnetochemical Peculiarities of Manufacturing Magnetoresistive Sensors in Integral Microcircuits. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010, **46**(5), 494–496.

Поступила 11.04.11

#### Summary

We present the results of studying of dynamic properties of cylindrical magnetic domains (CMD) in chip elements such as junctions of generation, channels of promotion and reading of CMD. We have identified the features of nucleation and collapse of single domains in elements of generation and reading. Domain containing material is an epitaxial ferrite-garnet film (EFGP) of  $(Y, Sm, Lu, Ca)_3 \cdot (Fe, Ga)_5O_{12}$  with the following parameters: the collapse field  $H_0 = 105$  Oe, field elliptical instability  $H_2 = 80$  Oe, the anisotropy field  $H_a = 1200$  Oe, saturation magnetization  $M_s = 210$  Gs, the Curie temperature  $T_c = 410$  K, film thickness  $4.8 \mu\text{m}$ . EFGP of such a composition has both the color contrast of domain structures, which allows reliably fix the CMD position down to its smallest diameter ( $2.2 \mu\text{m}$ ) in the state before collapse, and good dynamic characteristics, such as the speed limit of the CMD (velocity saturation)  $V_s = 20$  m/s and their mobility  $\mu = 5$  m/s·Oe. A reason restricting the region of the chip stable operation is a reading junction. A trend to increasing of magnetoresistive effect at room temperatures and magnetic fields 50–150 Oe is found.