

GMR-ДАТЧИКИ

ГЛАЗА, НЕРВЫ, МОЗГ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

В.Юдинцев

Гигантский магниторезистивный* эффект (Giant Magnetoresistance – GMR) в 1988 году независимо друг от друга описали ученый Университета Париж-11 Альберт Ферт и профессор Института физики твердого тела при Научно-исследовательском центре в Юлихе (ФРГ) Петер Грюнберг. В 2007 году работы А.Ферта и П.Грюнберга были отмечены Нобелевской премией по физике. Суть эффекта – существенное уменьшение (на 10–20%) удельного сопротивления многослойных структур магнитных и немагнитных металлов даже при незначительном изменении внешнего магнитного поля. В основе этого явления лежит квантовая характеристика электрона – собственный момент количества движения, или спин. Разработка методов изготовления элементов с нанометровыми размерами позволила создавать устройства, в которых успешно используется это свойство электрона. Было положено начало новому научному направлению – так называемой спинтронике. К элементам спинтроники и относятся GMR-датчики. Появление датчиков на основе GMR-эффекта привело к резкому увеличению плотности записи жестких дисков компьютеров. Но сегодня это не единственная область их применения. Благодаря малым размерам и низкой потребляемой мощности, а также высокой робастности в неблагоприятных условиях и относительно низкой стоимости GMR-датчики все шире применяются в промышленных, автомобильных электронных системах и диагностическом медицинском оборудовании.

СУТЬ GMR

GMR-эффект заключается в значительном уменьшении сопротивления многослойной структуры, состоящей из чередующихся слоев ферромагнетиков толщиной в несколько нанометров и немагнитных металлов такой же толщины, при воздействии на нее сильного магнитного поля [1–3]. Гигантский магниторезистивный эффект обусловлен волновыми свойствами электрона, в том числе и собственным моментом количества движения (спином), не связанным с реальным вращением электрона. Спин порождает определенный магнитный момент электрона, а значит, обуславливает его взаимодействие с внешним магнитным полем. Электрон может находиться в двух спиновых состояниях, которым соответствуют собственное "вращение" электронов по часовой стрелке или против нее. Таким образом, спин электронов проводимости в GMR-структуре может иметь только два направления: по направлению внешнего магнитного поля (условно спин направлен вверх) и против его направления (спин направлен вниз).

Как известно, электрическое сопротивление проводников возникает в основном из-за рассеяния свободных электронов проводимости на атомах, отклонившихся со своего положения вследствие тепловых колебаний. Рассеяние электронов проводимости в GMR-структуре определяется их спиновой поляризацией в ферромагнитных металлах. Электроны проводимости, направление спина которых совпадает с направлением внутреннего магнитного поля ферромагнетика, испытывают меньшее сопротивление при движении, чем электроны, спин которых ориентирован навстречу внутреннему магнитному полю. Последние чаще сталкиваются с атомами среды и испытывают при движении большее сопротивление. В первом случае электрическое сопротивление среды меньше, чем во втором. В результате электрический ток в ферромагнитном металле формируют электроны со спином по направлению намагниченности материала и против него.

Таким образом, в основе GMR-эффекта лежит поляризация спина электронов проводимости в ферромагнетиках и "спиновая зависимость" рассеяния электронов. Но как вос-

* Словари русского языка и энциклопедии дают написание "магнеторезистивный". В научном мире более широко распространено написание "магниторезистивный".

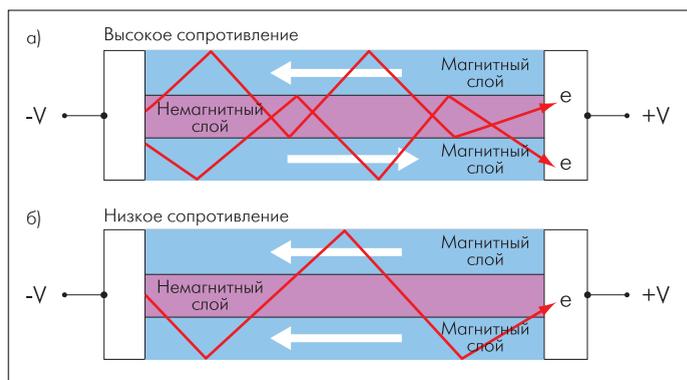


Рис. 1. Простейшая GMR-«сэндвич» структура: а) – в отсутствие внешнего магнитного поля, с противоположной ориентацией магнитных полей ферромагнетиков вследствие антиферромагнитной связи (высокое сопротивление) и б) – в присутствии магнитного поля, с однонаправленной ориентацией магнитных полей ферромагнетиков (низкое сопротивление).

пользоваться "внутренним миром" ферромагнетика для манипуляции сопротивлением?

Тут на помощь и пришли структуры, состоящие из чередующихся слоев ферромагнетиков и немагнитных металлов. Простейшая GMR сэндвич-структура с нефиксированной ориентацией собственного магнитного поля содержит два слоя мягкого магнитного материала (сплавы железа, никеля, кобальта) толщиной от 4 до 6 нм, разделенных слоем немагнитного проводящего материала (например, меди) обычно толщиной 3–5 нм. При тщательном подборе материала и толщины немагнитного слоя ориентации магнитных полей слоев ферромагнетиков вследствие возникновения антиферромагнитной связи противоположны. Как правило, слои такой структуры формируются в виде узких полосок шириной несколько микрон. При прохождении тока в такой структуре спин электронов в одном из слоев ферромагнетика совпадает с ориентацией его собственного магнитного поля. Во втором ферромагнитном слое, ориентация магнитного поля которого противоположна спину, электроны активно рассеиваются, и полное электрическое сопротивление структуры будет большим, поскольку электроны с "правильным" для этого слоя спином уже почти все рассеяны в первом слое (рис.1а). Если же такую сэндвич-структуру поместить в достаточно сильное внешнее магнитное поле (35–50 Э), преодолевающее антиферромагнитную связь, магнитные поля обоих ферромагнитных слоев окажутся однонаправленными, и вклад электронов, спин которых ориентирован по полю, в общий ток существенно увеличится (рис.1б). Для них структура практически окажется коротко замкнутой. Во сколько раз увеличится ток, обусловленный электронами со спином, ориентированным по магнитному полю, и уменьшится ток электронов с противоположно ориентированным спином, зависит от свойств материалов структуры. Но в любом случае увеличение тока превысит его уменьшение, и в результате суммарное сопротивление уменьшится. Если же поле убрать, чередование магнитной ориентации слоев восстановится. Пода-

ча внешнего магнитного поля перпендикулярно длине полосок не вызовет ощутимого GMR-эффекта вследствие наличия размагничивающих полей, обусловленных чрезвычайно малой шириной полосок, формирующих структуру. Важный параметр GMR-датчика – коэффициент гигантского магнито-резистивного эффекта, или выраженное в процентах отношение относительного изменения сопротивления к минимальному сопротивлению (или сопротивлению насыщения) $\Delta R/R$. Для сэндвич-структур это отношение составляет 4–9%, а магнитное поле насыщения – 30–50 Э.

Помимо простейшей сэндвич-структуры существуют многослойные структуры с многочисленными чередующимися слоями проводящих магнитных и немагнитных материалов. В таких структурах GMR-эффект выражен сильнее (обычно $\Delta R/R = 12\text{--}16\%$), чем в сэндвич-конструкции. Правда, при этом для насыщения (уменьшения сопротивления) требуется большее внешнее магнитное поле – 250 Э. Толщина слоев меньше, чем в трехслойной структуре (обычно 1,5–2 нм), и она имеет критическое значение. Лишь при определенной толщине разделительного немагнитного слоя электроны проводимости вызовут антиферромагнитную связь магнитных слоев. В противном случае связь магнитных полей слоев структуры – ферромагнитная, и GMR-эффект не возникает.

Для создания головок, способных работать при слабых магнитных полях, было предложено "фиксировать" (to pin) направление магнитного поля одного слоя сэндвич-структуры, с тем чтобы при наложении внешнего магнитного поля изменение ориентации в слое с нефиксированным магнитным полем относительно ориентации в слое с фиксированным полем приводило к ощутимому изменению сопротивления структуры. Для получения фиксированной ориентации в структуру добавляется четвертый так называемый обменный слой сильного антиферромагнетика (как правило, FeMn или NiO). Такая структура получила название спинового затвора (Spin Valve – SV) (рис.2). Направление фиксированного магнитного поля задается путем нагрева GMR-структуры до температуры, превышающей температуру блокирования магнитного материала. При такой температуре уже не существует антиферромагнитной связи между слоями ферромагнетиков. Структура охлаждается в сильном магнитном поле, фиксирующем поле слоя. Рабочая температура спинового затво-

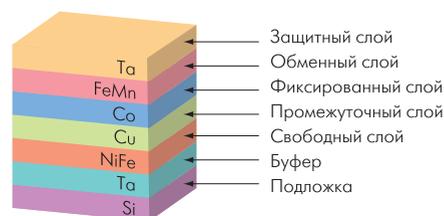


Рис.2. Структура спинового вентилля

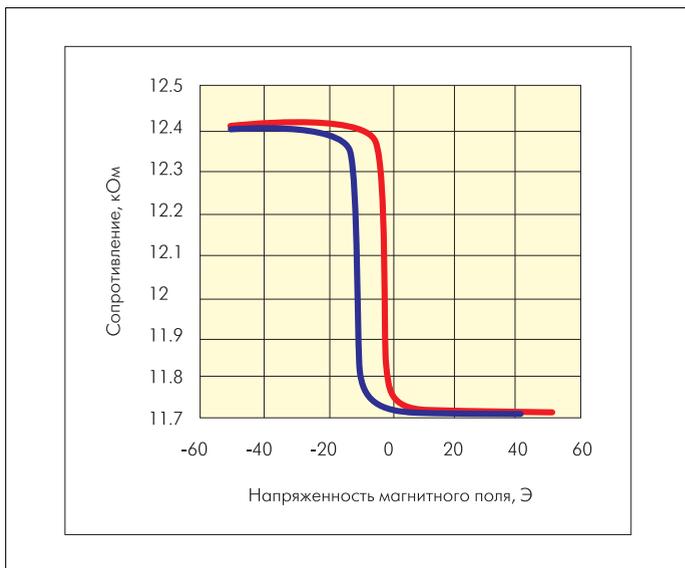


Рис.3. Зависимость сопротивления спинового вентиля от напряженности внешнего магнитного поля, направленного параллельно плоскости фиксированного слоя. Коэффициент гигантского магниторезистивного эффекта – 6%

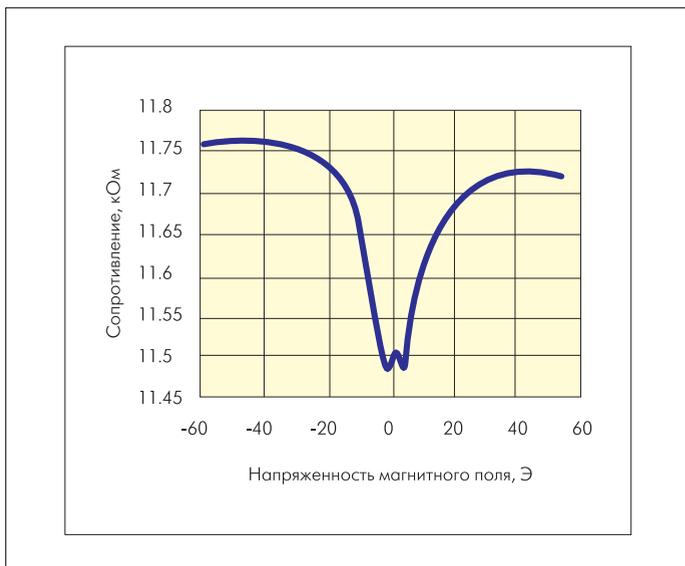


Рис.4. Зависимость сопротивления спинового вентиля от напряженности внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости фиксированного слоя. Коэффициент гигантского магниторезистивного эффекта – 2,4%

ра не может превышать блокирующую температуру, поскольку в противном случае магнитное поле слоя перестает быть фиксированным. Если внешнее магнитное поле параллельно плоскости фиксированного слоя, при изменении его ориентации сопротивление структуры изменяется с высокого на низкое (рис.3). При подаче внешнего поля перпендикулярно фиксированному полю сопротивление минимально при нулевом поле и велико как при положительном, так и отрицательном значении магнитного поля (рис.4). Для таких структур $\Delta R/R = 4\text{--}20\%$, магнитное поле насыщения – 10–80 Э.

Большая чувствительность к внешним магнитным полям получена в спин-зависимых туннельных (Spin Dependent Tunneling – STD) структурах (рис.5). В таких структурах слои

ферромагнетиков разделены тонким слоем диэлектрика, и их сопротивление определяется значением тока, туннелирующего через барьер. Значение туннельного тока, направленного перпендикулярно слоям структуры, определяется направлениями векторов магнитных полей слоев ферромагнетиков. Согласно последним данным специалистов компании Nonvolatile Electronics (NVE), США, отношение магнитосопротивления этих элементов с пленкой окиси алюминия в качестве туннельного барьера составляет 70%, а исследователи Университета Тохоку (Япония) использовали в качестве барьера пленку оксида магния и получили отношение 355%!

Напряженность магнитного поля насыщения, зависящее от материала магнитных слоев и метода обеспечения параллельной и антипараллельной ориентации, колеблется в пределах от 1,25 до 125 Э, что и обеспечивает создание чрезвычайно чувствительных магнитных датчиков. Благодаря наличию изолирующего туннелируемого слоя сопротивление этих элементов велико, и они пригодны для работы с батарейным питанием.

Главные достоинства GMR-датчиков – высокая чувствительность даже к незначительному изменению магнитного поля, малые габариты, малая потребляемая мощность, простота объединения с электронными устройствами. К тому же, благодаря интенсивному электрическому сигналу, формируемому GMR-структурой, снижается и чувствительность к помехам. Эти свойства и привели к тому, что элементы на основе гигантского магниторезистивного эффекта в первую очередь нашли применение в считывающих головках жестких дисков. Это позволило примерно за десятилетие увеличить плотность записи жестких дисков с 4,1 до 100 Гбайт/кв. дюйм. При этом до сих пор изготовители считывающих головок жестких дисков отдают предпочтение структуре спинового затвора.

Но считывающие головки не единственное применение гигантского магниторезистивного эффекта. GMR-датчики находят применение для считывания тока, детектирования линейного, вращательного перемещения или смещения объектов, регулировки момента впрыскивания топлива, определения положения рычага управления двигателем и др.

На базе тонкопленочных структур с гигантским магнитосопротивлением, осажденных на кремниевые подложки, выполняются различные элементы датчиков – резисторы, резисторные пары, или полумосты, мосты Уитстона. Для увеличения удельного сопротивления и минимизации потребляемой мощности GMR-резисторы, как правило, выполняются в виде серпантина. В типичном датчике четыре GMR-резистора формируют мост Уитстона, выходное напряжение которого пропорционально внешнему магнитному полю. Температурный коэффициент всех резисторов, изготовленных из одного и того же материала, одинаков. Два резистора моста представляют собой активные элементы датчика, один из двух оставшихся резисторов присоединяется к источнику питания, а другой – к общему потенциалу. Поверх этих "пассивных" резисторов, выполняю-

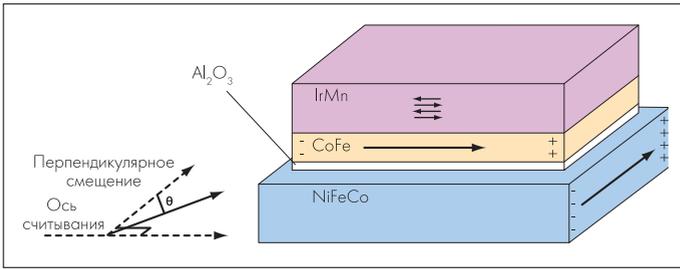


Рис.5. Структура STD-элемента. Направление магнитного поля слоя CoFe фиксировано слоем антиферромагнетика IrMn. Ориентация магнитного поля слоя NiFeCo устанавливается в соответствии с ориентацией внешнего магнитного поля

щих функции опорных элементов, наносятся небольшие экраны из пермаллоя толщиной ~100 нм, защищающие их от воздействия прилагаемого магнитного поля. Поверхностное сопротивление всех четырех резисторов одинаковое. Изменение сопротивления активных GMR-резисторов такого моста на 10% вызывает изменение его выходного напряжения на 5%.

Для увеличения чувствительности датчика в ряде случаев используются дополнительные структуры из пермаллоя, выполняющие функцию концентраторов магнитного потока. Активные резисторы помещаются в зазор между концентраторами (рис.6). Отношение размера зазора между концентраторами к длине одного из них примерно определяет насколько напряженность магнитного поля, воздействующего на эти резисторы, больше напряженности приложенного поля. Концентраторы могут выполнять и роль экранов, если разместить два других резистора под ними. Чувствительность моста можно варьировать, изменяя зазор между концентраторами и их длину. Применение концентраторов позволяет на основе GMR-структуры с полем насыщения 300 Э создавать датчики с полем насыщения 15, 50 и 100 Э. Размер датчика компании NVE на основе моста Уитстона с концентраторами и с общим сопротивлением 5 кОм, смонтированного в восьмивыводной корпус SIOC, составляет 6×4,9 мм.

Поскольку спинтронные датчики – резисторные элементы, потребляемая ими мощность при непрерывной подаче питания велика. Так, ток моста на основе датчиков с общим сопротивлением 5 кОм при подаче напряжения 2,8 В превышает 500 мкА, что недопустимо для компонентов систем с батарейным питанием. Для минимизации потребляемой

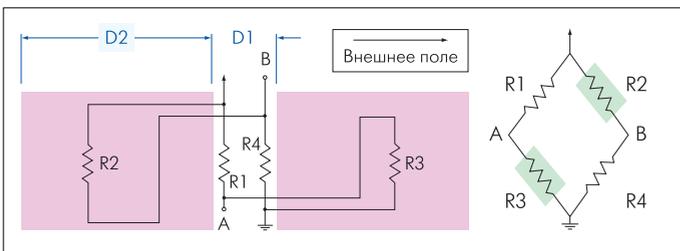


Рис.6. Датчик на основе моста Уитстона с GMR-резисторами. D1 – ширина зазора между концентраторами; D2 – длина концентратора. Опорные резисторы R2 и R3 расположены под концентраторами

мощности производится выборка сигнала датчика с малым коэффициентом заполнения. А так как время отклика спинтронных датчиков мало благодаря отсутствию движущихся деталей, время выборки может составлять 10 мкс и даже менее. В этом случае средний ток датчика не превышает 0,1 мА, и его мощность пренебрежимо мала по сравнению с мощностью, потребляемой схемой управления.

Спинтронные датчики на основе моста Уитстона, работающие в режиме гистерезиса (в отсутствие тока смещения) или линейном режиме (при токе смещения ~40 мА), могут выполняться и на STD-структурах. Режим гистерезиса устанавливается в случаях, когда при превышении напряженности магнитного поля определенного уровня, скажем ±1 Э, требуется существенное изменение сигнала. Линейный режим идеален для регистрации небольших изменений магнитного поля. Датчики на STD-структурах имеют следующие параметры:

| | |
|---|-----------------|
| Диапазон линейности..... | ±0,5 Э |
| Выходной сигнал относительно полярности поля..... | двухполярный |
| Чувствительность по напряжению..... | ~10–100 мВ/В/Э |
| Уровень собственных шумов на высокой частоте..... | ~10–100 мкЭ/√Гц |
| Шум на частоте 1 Гц..... | ~1–10 мкЭ/√Гц |
| Поле насыщения..... | ±1 Э |
| Сопротивление моста..... | 5–50 кОм |
| Потребляемая мощность, мин..... | 2–20 мВт |
| Усиление потока..... | 10x |
| Размер кристалла..... | 1,65×2,14 мм |
| Диапазон рабочих температур..... | -40...185°C |
| Рабочее напряжение, макс..... | 15 В |

Существует множество областей применения GMR-датчиков. В промышленном оборудовании они используются для обнаружения намагниченных объектов, отверстий в пластинах ферромагнетиков, регистрации присутствия или отсутствия проводящих элементов, наличия в них дефектов, наличия оксида железа в черной краске банкнот, для нахождения подземных проводящих труб и даже непроводящих водяных труб, для измерения электрического тока. В медицине они используются для контроля магнитных полей, возбуждаемых физиологическими функциями организма, контроля положения тела, особенно головы, для получения биопроб и измерения ДНК или концентрации антител в крови пациента.

Каковы же последние достижения в области GMR-датчиков?

GMR-ДАТЧИКИ

GMR/MEMS-датчик ускорения

Как видно, GMR-структуры изготавливаются методами нанотехнологии. Поэтому не удивительны работы по объединению их с микро- и наноконструкциями. И здесь интерес представляет GMR/MEMS-датчик ускорения, разработанный

специалистами Лаборатории реактивных двигателей Калифорнийского института технологии, Космического центра Линдона Джонсона, Университета Райса и Исследовательского центра Лэнгли. До сих пор датчики ускорения в основном выполняются на основе электромеханических, пьезоэлектрических, пьезорезистивных и емкостных элементов. Данных о GMR-датчиках ускорения пока мало.

Рассматриваемый GMR/MEMS-датчик ускорения содержит мембрану из нитрида кремния толщиной 0,5 мкм, формируемую объемной обработкой кремниевой подложки; магнитно-твердую тонкую пленку, напыленную поверх мембраны, и GMR-элемент, изготовленный путем вакуумного напыления пленок на вторую кремниевую подложку. При сборке GMR/MEMS-датчика оба кристалла соединяются методом анодной сварки. Датчик определяет ускорение, регистрируя изменение магнитного поля, вызванное смещением мембраны с магнитно-твердой пленкой.

Типичная структура GMR-элемента – Si-SiO₂-Ta-Cu-Co-Fe-Ni-Ta. Слой кобальта между проводящим слоем меди и пермаллоя предотвращает смешение меди и пермаллоя, наблюдаемое при температуре датчика менее 200°C. Толщина слоев GMR-структуры составляла 30–40 нм. В качестве материала магнитно-твердой пленки использовался CoCrTaPt, FePt или CoPt.

Угловые датчики

Технология гигантского магнитосопротивления нашла коммерческое применение во многом благодаря небольшой американской компании NVE, первые разработки которой проводились в рамках программы перспективной технологии (Advanced Technology Program – ATP) Национального института по стандартам и технологиям (National Institute of Standards and Technology – NIST). При поддержке NIST специалистами компании NVE на базе GMR-резистора со структурой спинового вентиля создан датчик, регистрирующий угловое положение в пределах 360° [4]. Структура SV-датчика, как указывалось ранее, благодаря возможности получения большого выходного сигнала, малым размерам и простоте освоения массового производства нашла широкое применение в головках считывания. Это и послужило стимулом к созданию другого типа магнитного датчика, а именно углового датчика, не требующего физического контакта для формирования входного сигнала и отличающегося высокой износостойкостью.

Спиновой затвор имел структуру Ta-NiFeCo-CoFe-Cu-CoFe-Ru-CoFe-CrMnPt. Напряженность магнитного поля фиксированного слоя с трехслойной синтетической антиферромагнитной структурой (Synthetic Antiferromagnet – SAF) состава CoFe-Ru-CoFe превышала 500 Э (максимальное значение, используемое при испытаниях). Такое значение обусловлено нулевым конечным магнитным моментом в результате сильной встречно-параллельной связи между двумя слоями CoFe одинаковой толщины через тонкий слой рутения. Об-

менный слой, обеспечивающий фиксированную ориентацию магнитного поля SAF-структуры, – CrMnPt – отличался высокими температурой блокировки и термической стабильностью после отжига при температуре 250°C в течение часа. В качестве мягкого магнитного материала со свободно ориентированным полем, не вызывающего деградацию GMR-датчика, использовалась двухслойная структура NiFeCo-CoFe. Коэрцитивная сила вдоль оси легкого намагничивания поля этого слоя составляла ~4 Э.

Сопротивление SV-резистора R зависит от угла θ между свободно ориентированным и фиксированным магнитными полями: $R/R_p = 1 + 1/2GMR(1 - \cos\theta)$, где R_p – минимальное сопротивление структуры при параллельной ориентации обоих полей и GMR – максимальный коэффициент гигантского магниторезистивного эффекта. При подаче внешнего магнитного поля, напряженность которого больше, чем у поля насыщения слоя со свободной ориентацией, и меньше, чем у фиксированного поля, свободное поле ориентируется соответственно внешнему магнитному полю. Таким образом, значение магнитосопротивления будет определяться косинусом угла θ . Но изменение сопротивления точно определяется в диапазоне от 0 до 180°. Для получения датчика углового положения на диапазон 360° необходим второй резистор со структурой спинового вентиля и с задержкой сигнала относительно первого на 90°. Сопротивление одного будет определять $\cos\theta$, сопротивление второго – $\sin\theta$.

Для компенсации теплового дрейфа, неизбежного при работе прибора в реальных условиях, как правило, датчик измерения углового положения на основе SV-резисторов выполняется в виде двух полумостов Уитстона. Полное сопротивление одного полумоста в такой схеме равно значениям включенных последовательно сопротивлений SV-резисторов, причем сопротивление одного плеча полумоста зависит от $-\sin\theta$, а сопротивление второго плеча – от $\sin\theta$. Аналогично, сопротивление второго полумоста равно значениям включенных последовательно сопротивлений спиновых затворов, зависящих от $-\cos\theta$ и $\cos\theta$. Напряжение на такой мост подается от одного источника питания на постоянное или переменное напряжение. А выходные сигналы полумостов выводятся самостоятельно (рис.7), а не как дифференциальный сигнал двух узлов, как обычно в GMR-датчиках на основе моста Уитстона.

В угловом датчике совместно с GMR-элементом используется дискообразный постоянный магнит, поле которого параллельно его плоскости. Магнит крепится на вращающемся валу и располагается вблизи датчика (рис.8). Как указывалось ранее, при вращении магнита сопротивление GMR-элемента является функцией косинуса или синуса угла между вращающимся постоянным магнитом и неподвижным датчиком.

GMR-элемент на основе моста Уитстона с SV-резисторами монтировался в безвыводной корпус размером 3×3×0,9 мм.

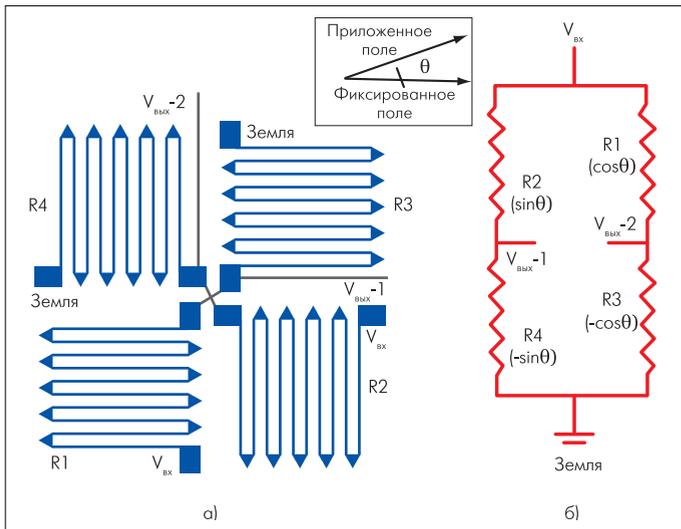


Рис.7. Конфигурация (а) и схема (б) углового датчика

Номинальное сопротивление каждого из резисторов, изготовленных на одном кристалле, равно 1,5 кОм. Испытания датчика показали, что точность измерения углового положения составляет $\sim 1^\circ$, диапазон рабочих температур – $-40 \dots 150^\circ\text{C}$. Датчик найдет применение в промышленных и автомобильных системах.

В 2007 году компания Infineon – крупнейший производитель микросхем датчиков для автомобильных систем безопасности – сообщила о создании микросхемы углового датчика на основе спиновых вентилей модели TLE 5010 [5]. Микросхема датчика измерения углового положения в пределах 360° содержит два моста Уитстона для измерения значений косинуса и синуса угла между приложенным магнитным полем (постоянного магнита) и полем свободного слоя GMR-элемента. Кроме того, в нее входят температурный датчик для точного расчета угла в диапазоне температур от -40 до 150°C , два АЦП для получения данных в цифровом виде, фильтры, несколько стабилизаторов напряжения, каждый со своим детектором пониженного напряжения и перенапряжения, а также встроенная схема управления и предварительной обработки сигналов (рис.9). Значение углового положения точно рассчитывает внешний восьмиразрядный микроконтроллер, присоединяемый к микросхеме датчика через последовательный SSC-интерфейс со скоростью передачи данных 2 Мбит/с. К SSC-интерфейсу мик-

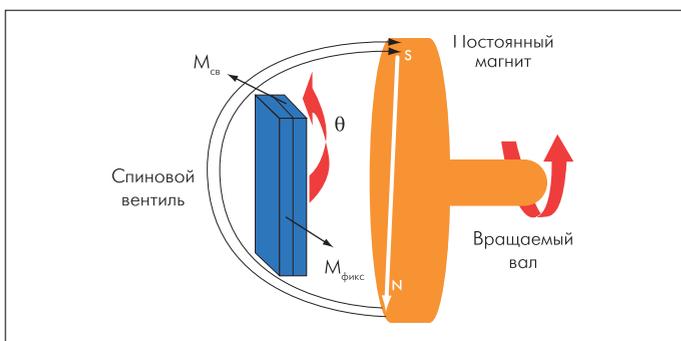


Рис.8. Конструкция углового датчика с постоянным магнитом.

роконтроллера могут подключаться несколько микросхем TLE 5010. Команда синхронизации присоединенной микросхемы пересылается микроконтроллером.

Структура SV-резисторов формируется с высокой точностью поверх микросхемы, выполненной по 0,25-мкм КМОП-технологии.

Предназначена микросхема для систем определения угла поворота автомобиля, бесщеточных двигателей, поворотных переключателей, универсальных автомобильных устройств определения углового положения. Срок службы углового датчика, по предварительным данным компании Infineon, составляет 15 лет.

Магнитные датчики для средств получения биопроб

Развитие технологии спинтроники позволило усовершенствовать средства получения биопроб. Уже в начале 2005 года на рынке медицинского оборудования появились малогабаритные магнитные датчики, объединенные с микросхемами и способные работать при комнатной температуре (в отличие от современных устройств на основе сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков). Одно из самых перспективных направлений развития таких элементов – создание спинтронных биодатчиков типа лаборатории на кристалле для систем биомедицинского анализа.

В основе метода биоанализа с помощью магнитных датчиков лежит возможность присоединения магнитных меток к определенному исследуемому веществу с помощью специфического биохимического соединения. Вещество с присоединенными метками захватывается GMR-датчиком, который затем подсчитывает число меток. Пример такой системы – разработанная учеными Университета штата Айова совместно со специалистами компании NVE микроструйная система с интегрированным GMR-датчиком, регистрирующим скорость потока и размеры капель ферромагнитной жидкости объемом в несколько пиколитров (10^{-12} л), а также частоту их образования [6].

Интегрированная платформа на базе кремниевой микросхемы включала три набора датчиков, каждый из которых представляет собой мост Уитстона с SV-датчиками размером 20×4 мкм. Спиновый вентиль имел структуру Ta/NiFeCo/Ta/NiFeCo/CoFe/Cu(25Å)/CoFe/CrPtMn. Считывающие резисторы моста располагались непосредственно под каналом шириной 13 мкм и глубиной 18 мкм. Через канал пропусклась струя (длиной 5 мкм) микропробы, содержащей $\sim 5 \cdot 10^8$ магнитных наночастиц размером 10 нм. Опорные GMR-датчики моста были защищены слоем диэлектрического полимера марки Cycoltene компании Dow Chemical. Основание микроструйного канала отделялось от GMR датчика слоем нитрида кремния толщиной 300 нм. В полимерной крышке системы микрообработкой формировался канал шириной 30 мкм и глубиной 25 мкм, располагае-

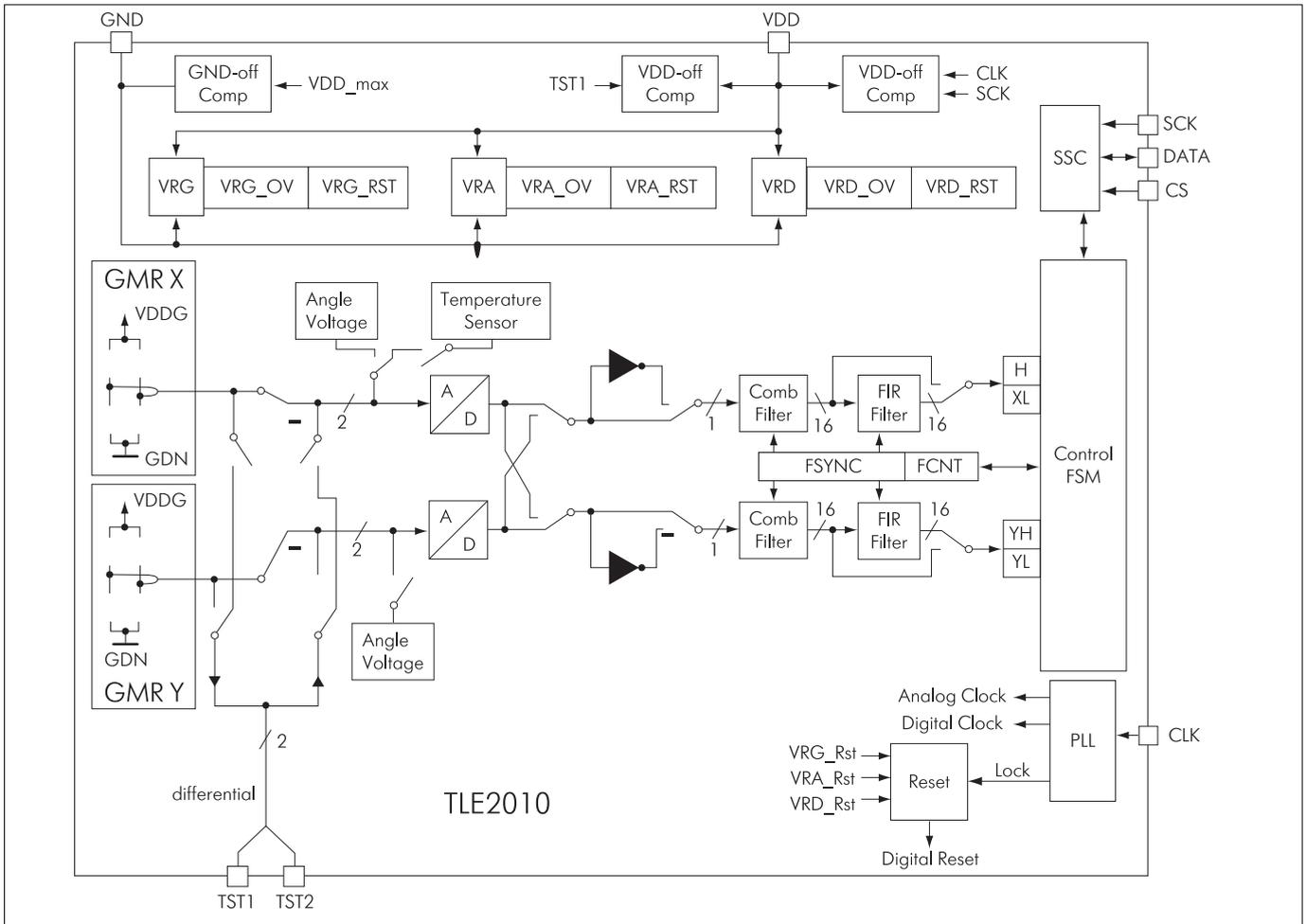


Рис.9. Блок-схема углового датчика TLE5010. VRG – стабилизатор напряжения GMR-элементов

мый перпендикулярно микроструйному каналу. В результате в области пересечения двух каналов возможен переход струи из одного канала в другой. Готовая система лаборатории на кристалле монтировалась на печатную плату, и к ее входным отверстиям подсоединялись впрыскивающие микрокапилляры. В области перекрытия двух каналов возникал чередующийся поток несмешивающихся жидкостей с различными наночастицами. Система помещалась между полюсами миниатюрного электромагнита, поле которого параллельно "чувствительной" оси GMR-элемента (ось, перпендикулярная продольной оси GM-элементов). Магниторезистивная чувствительность SV-датчиков составляла 0,077%/Э. Скорость потока определялась путем корреляции сигналов двух мостов. Ее расчетное значение было равно $19,0 \pm 0,4$ мм/с, что хорошо согласуется со скоростью накачки насоса – 21 ± 2 мм/с.

Таким образом, была показана возможность применения GMR-датчиков для обнаружения и анализа различных биохимических проб. Точность биохимического анализа лаборатории на кристалле высокая. Но достигается она за счет более сложной конструкции датчика.

На Международной конференции по твердотельным схемам 2007 года (International Solid-State Circuits

Conference – ISSCC) представители Стэнфордского университета сообщили о разработке высокоплотной матрицы GMR-датчика, интегрированной со стандартной КМОП-микросхемой [7]. Прибор предназначен для обнаружения гибридализации ДНК и может применяться в обычных врачебных кабинетах, а не больших централизованных лабораториях. В предлагаемом методе иммобилизованные на поверхности GMR-датчиков рецепторы отлавливают изучаемые ДНК, после чего в систему лаборатории на кристалле вводятся магнитные наночастицы со специальным покрытием, используемым для выявления ДНК при нерадиоактивной гибридализации in-situ (на месте). Эти частицы захватываются гибридованными ДНК, и GMR-элементы фиксируют вызванное наночастицами изменение магнитного поля.

БикМОП-микросхема с интегрированным GMR-датчиком на основе SV-резисторов изготовлена по 0,25-мкм технологии с шестислойной металлизацией. Помимо 1008 сенсорных элементов, занимающих площадь 1 мм^2 , микросхема содержит высокоскоростные каналы считывания данных, полученных при детектировании ДНК (рис.10). Для повышения чувствительности детектора к образцам с низкой концентрацией биологического вещества каждую точ-



ку исследуемого вещества регистрируют до 64 минимальных элементов датчика, благодаря чему время обнаружения молекулы ДНК составляет всего 5 мин. GMR-биодатчики разделены на 16 подмассивов размером 120×120 мкм каждый, что сопоставимо с размерами современных систем анализа ДНК. Для сокращения времени считывания каждого элемента датчика в микросхеме использована мультиплексная передача с частотным и временным уплотнением каналов.

Учеными Университета Канавава (Япония) и Университета Месси (Новая Зеландия) разработан игольчатый SV-GMR-датчик для определения объемной/весовой плотности магнитной жидкости, вводимой в тело пациента при гипертермическом лечении раковых заболеваний [8]. Размер чувствительной области датчика составляет 75×40 мкм. Плотность магнитной жидкости определяется путем сравнения значений напряженности внешнего магнитного поля и измеренного поля магнитной жидкости тела. При токе SV GMR-датчика 0,5 мА чувствительность датчика составляет ~ 10 мкВ/мТ. Для получения однородного внешнего магнитного потока использована система Гельмгольца с тремя парами спиралей.

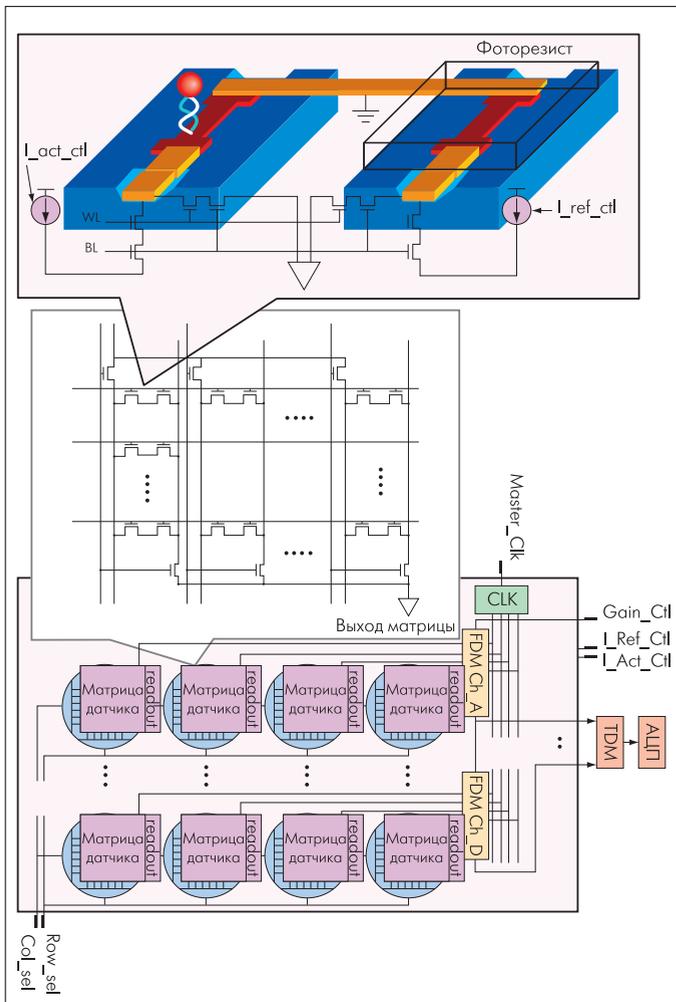


Рис. 10. Структура (а) и схема (б) микросхемы GMR-биодатчика

Разработанная биомикросхема путем изменения структуры поверхности может использоваться и для выявления других биореакций, например при анализе протеина.

Ученые, открывшие GMR-эффект, прекрасно понимали, что в современном высокотехнологичном мире всякий принципиально новый материал рано или поздно найдет свое практическое применение. И сегодня GMR-датчики, представленные на коммерческом рынке, позволяют проверять денежные купюры и классифицировать транспортные средства на расстоянии до нескольких метров. Новая STD-технология позволяет расширять области применения твердотельных датчиков и успешно заменять ими электромеханические устройства большего размера с большим энергопотреблением. Развитие технологии гигантского магнитосопротивления уже привело к созданию магниторезистивной оперативной памяти (Magnetoresistive RAM – MRAM) – одного из кандидатов на замену современных ДЗУ, флэш-памяти и даже СОЗУ. Но это уже другая история. А история развития GMR-датчиков – прекрасный пример того, как неожиданное открытие может повлиять на развитие современных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И. Нобелевская премия по физике – 2007. – <http://elementy.ru/news/430612>.
2. GMR Sensors Data Book. April 2003 – http://www.cs.cmu.edu/~sensing-sensors/readings/GMR_sensor_catalog.pdf.
3. Schneider R.W., Smith C.H. Low Magnetic Field Sensing with GMR Sensors. – <http://www.nve.com/Downloads/lowfield.pdf>
4. Wang D. et al. 360 Degree angle sensor using spin valve materials with SAF structure. – www.nve.com/Downloads/TransMag2005f.pdf.
5. Infineon Incorporates Nobel Prize-Winning Technology into its Sensors. – <http://www.infineon.com/cms/en/corporate/press/news/releases/2007/INFAIM200712-027.html>
6. Pekas N. et al. Giant magnetoresistive monitoring of magnetic picodroplets in an integrated microfluidic system.
7. Shu-Jen Yan, Liang Xu, Heng Yu, et al. CMOS Integrated DNA Microarray Based on GMR Sensors/ – www.his.com/~iedm/general/28_2.pdf
8. Gooneratne C.P., Mukhopadhyaya S.C., Yamada S. An SV-GMR Needle Sensor-Based Estimation of Volume Density of Magnetic Fluid inside Human Body. – www.hindawi.com/GetArticle.aspx?doi=10.1155/2008/890293