

Автомобильные датчики положения.

Современные технологии и новые перспективы

Часть 4. Новые перспективы автомобильных датчиков — технологии магниторезисторов ГМР и КМР

Данная часть статьи продолжает анализ различных технологий магниторезистивных датчиков с точки зрения их пригодности для автомобильных систем и содержит описание физических основ двух перспективных направлений: технологий гигантского магниторезистивного (ГМР) и колоссального магниторезистивного (КМР) эффекта. Значительное внимание уделено аспектам внедрения измерительных принципов актуальной и коммерчески доступной на сегодняшний день технологии ГМР, имеющей реальные перспективы эффективного технического воплощения в автомобильных системах.

Светлана Сысоева

S.Sysoeva@mail.ru

Введение

В последние несколько лет рынок автомобильных датчиков претерпевает практически фундаментальные изменения — с одной стороны, непрерывно увеличивается общее количество датчиков в автомобиле, с другой стороны, требования, предъявляемые в автомобильном секторе к сенсорным технологиям, непрерывно растут.

Как результат внедрения бесконтактных технологий и принципов встроенного дизайна в датчики и системы к таким чисто автомобильным требованиям, как повышенная температурная стабильность, устойчивость к влажности и загрязнениям в автомобильной среде, высокая точность, помехоустойчивость и низкая цена, добавились требования высокой чувствительности, малого размера и широкого разброса допусков монтажа. Сложность существующих схем обработки слабого или нелинейного сигнала уже накладывает ограничения на быстродействие устройств.

По-прежнему системная цена остается наиболее важным критерием коммерческого успеха на рынке датчиков.

Всем этим требованиям отвечают бесконтактные магнитоуправляемые технологии. В широком круге задач автомобильного сектора сегодня прослеживается тенденция перехода от потенциометрических, пассивных и трансформаторных индуктивных устройств к активным магнитоуправляемым датчикам, принцип измерения которых основан на эффекте Холла, анизотропном магниторезистивном эффекте (АМР) и гигантском магниторезистивном (ГМР) эффекте. Анизотропные и гигантские магниторезистивные датчики в настоящем представляют значительный интерес для автоэлектроники, так как они более чувствительны и стабильны, чем датчики Холла. Из-за их разумной стоимости и высокого уровня первичного выходного сигнала, которые упрощают его постобработку, спрос в автомобильных системах на

ГМР-датчики увеличивается. Текущие разработки показывают наиболее значительные функциональные преимущества в реализации стандартных измерительных принципов технологии [48, 49, 73–87]. В то время как изменение в сопротивлении АМР не превышает 3%, ГМР-материалы достигают изменения в 10–20%.

Благодаря высокой чувствительности и температурной стабильности ГМР, улучшенной функциональности и помехоустойчивости, основное внимание мировых лидеров рынка автомобильных ГМР-датчиков направлено на их применение в автомобильных системах ABS, ESP, системах управления двигателем, коробкой передач и динамикой автомобиля. Высокочувствительный и температурно стабильный ГМР-элемент идеально подходит для удовлетворения требований высокотемпературной автомобильной среды ($-40...+170\text{ }^{\circ}\text{C}$), обеспечивая двухпроводной выход и способность детектирования нулевой скорости. С ASIC в интегрированной или дискретной версии ГМР-датчик может быть использован для измерения скорости или положения активного ротора (магнита) или пассивного ротора (стального) с экстраординарным воздушным зазором.

С момента его открытия до настоящего времени ГМР-эффект находится под пристальным вниманием ученых и коммерсантов. Например, технологию ГМР в датчиках скорости применяют компании SSI Technologies и Cherry Electrical Products. Компания Honeywell Sensing and Control обосновала ее применение в датчиках коленчатого вала. На применении данной технологии сфокусировано внимание компаний ChenYang, Piher — Nacesa и других. С целью решения широкого круга задач именно автомобильного спектра ГМР-технология активно изучается и развивается компанией Bosch.

Но из-за относительной новизны технологии ГМР множество устройств, разработанных и анонсированных мировыми лидерами, еще не достигли стадии массового производства.

Первый коммерчески доступный аналоговый ГМР-датчик разработан в 1995 году корпорацией NVE¹,

¹ Корпорация NVE является также крупнейшим поставщиком ГМР-изоляторов для автомобильного отделения Bosch ETAS.

которой и сейчас принадлежат лидирующие позиции в этой области. Среди производителей элементной базы в разные периоды времени отмечались значительные достижения компаний Infineon (ранее Siemens Aktiengesellschaft) [48], Hitachi, ID MOS.

В настоящее время продукция NVE включает линейку полностью интегрированных датчиков, предназначенных специально для аналоговых и частотных измерений, с интегрированными схемами коррекции и преобразования сигнала. Жизнеспособные аналоговые и цифровые ГМР-датчики компании NVE в значительной степени превосходят классические датчики Холла и АМР и успешно конкурируют с новыми технологиями датчиков Холла [14].

Поскольку технология является относительно новой, известно не так много разработок на ее основе, в том числе и автомобильных датчиков положения [78–81]. Поэтому для ее эффективного внедрения в новые отечественные датчики прежде всего должны быть поняты заложенные в технологию базовые принципы.

В настоящей статье представлено введение в принципы ГМР- и КМР-эффектов, на физическом уровне дан анализ четырех типов ГМР-датчиков для целевого определения итоговой оценки перспектив функциональной пригодности этих датчиков в качестве бесконтактных потенциометров и энкодеров, а также интегральной оценки обеспечиваемых ими системных преимуществ. Функциональное назначение обсуждается с целью сравнения с аналогичными продуктами массового производства, основанными на эффекте Холла и АМР.

Физические основы технологии ГМР

Эффект значительного изменения электрического сопротивления (10–70%), открытый в 1988 году, наблюдается под действием магнитного поля в тонкопленочных (толщиной менее 10 нм) стекловых металлических слоях ферромагнитных материалов, равно разделенных тонкими неферромагнитными слоями (рис. 21–24). Совокупность этих слоев была названа гигантскими магниторезисторами (ГМР или GMR — Giant Magneto Resistive) [48, 49, 75–77, 81–87].

Этот эффект объясняется зависимостью рассеяния электронов от их спина и поляризации спинов электронов электропроводности в ферромагнитных металлах.

Эффект основывается на увеличении сопротивления проводящих слоев меди под действием магнитного поля, если их толщина уменьшается до нескольких атомных слоев. Электроны электропроводности в меди имеют большой средний свободный путь до своего рассеяния или изменения направления вследствие столкновения с другой частицей. При минимальной толщине медного слоя длина свободного пробега электронов уменьшается, а сопротивление увеличивается.

Слои с параллельными магнитными моментами будут иметь меньшее рассеяние на межслойных интерфейсах, более длинные средние свободные пути и более низкое сопротивление. Сопротивление двух тонких ферромагнитных слоев, разделенных тонким немагнитным про-

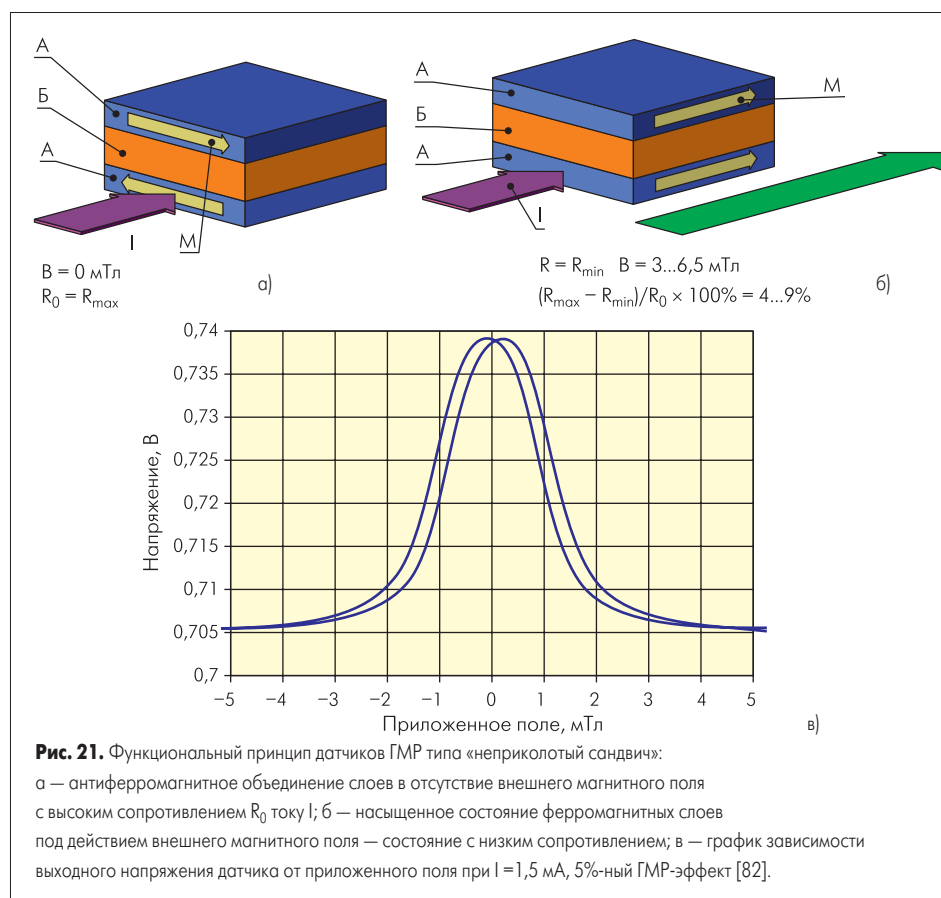


Рис. 21. Функциональный принцип датчиков ГМР типа «неприколотый сэндвич»:

а — антиферромагнитное объединение слоев в отсутствие внешнего магнитного поля с высоким сопротивлением R_0 току I ; б — насыщенное состояние ферромагнитных слоев под действием внешнего магнитного поля — состояние с низким сопротивлением; в — график зависимости выходного напряжения датчика от приложенного поля при $I = 1,5 \text{ мА}$, 5%-ый ГМР-эффект [82].

водящим слоем, может быть увеличено до максимального значения инвертированием моментов M ферромагнитных слоев от параллельных к антипараллельным (параллельным, но имеющим противоположное направление).

Чтобы повернуть магнитные слои ГМР-«сэндвича» в антипараллельное состояние, используется магнитное поле тока. Со слоями правильно подобранной толщины регулируемые ферромагнитные слои в отсутствие поля образуют антиферромагнитное объединение (рис. 21а).

Электроны электропроводности, спин-поляризованные в одном ферромагнитном слое, рассеиваются, так как происходит взаимодействие (интерфейс) с регулируемым ферромагнитным слоем с антипараллельными спинами электропроводных электронов. Слои с антипараллельными магнитными моментами будут иметь большее рассеяние на интерфейсах и короткий средний свободный путь электронов. Частое рассеяние создает высокое сопротивление.

Если внешнее магнитное поле B преодолевает антиферромагнитное объединение и достигается параллельность моментов M в регулируемых ферромагнитных слоях (насыщение), зависимое от спина рассеяние электронов электропроводности уменьшается, а вместе с ним уменьшается сопротивление (рис. 21б). Размер уменьшения в сопротивлении может составлять 10–20% и будет выше в мультислойных ГМР-материалах.

Для спин-зависимого рассеяния важно, чтобы обеспечивалось значительное общее сопротивление. Для этого слои должны быть тоньше, чем средний свободный путь электронов. Для многих ферромагнетиков средний свободный путь электронов составляет десятки нанометров, поэтому слои должны быть тон-

ше, чем 10 нм (100 Å) [49, 75]. Получение таких слоев стало возможным с развитием тонкопленочных технологий.

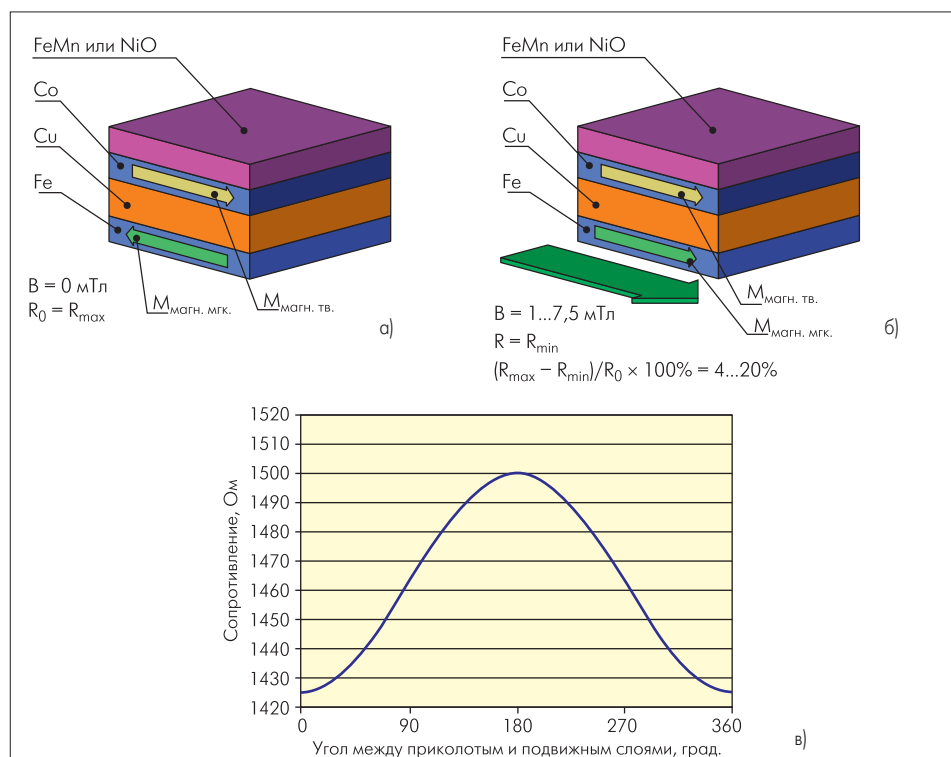
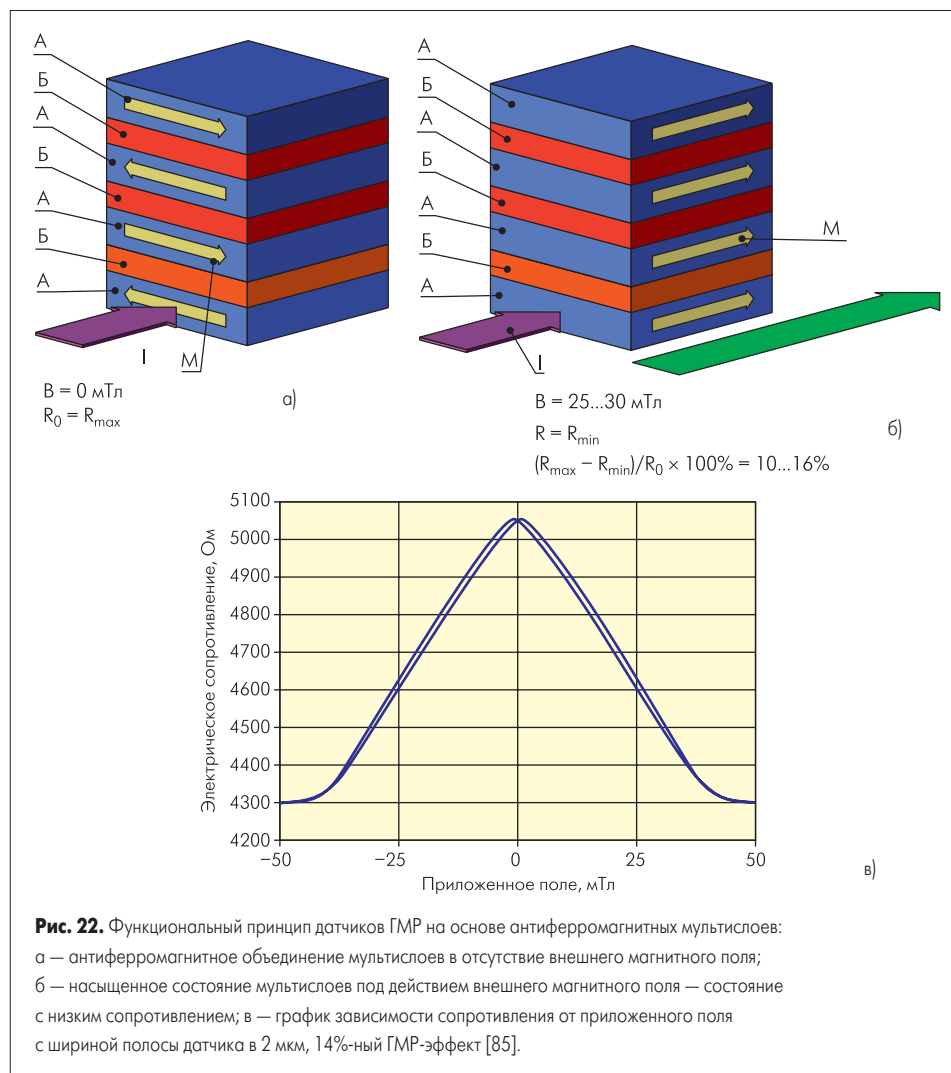
Существуют различные методы получения антипараллельного магнитного выравнивания в тонких мультислоях:

- «неприколотые сэндвичи»;
- антиферромагнитные мультислои;
- спин-клапанные структуры («сэндвичи» и мультислои);
- спин-зависимое туннелирование.

ГМР-материал «неприколотый сэндвич» (неприколотый спин-клапан) состоит из двух слоев толщиной в 4–6 нм магнитомягких сплавов железа, никеля и кобальта, разделенных проводящим немагнитным слоем в 3–5 нм из материала типа меди [49, 75–77, 82–84].

Если внутренний слой B немагнитного материала расположен между слоями A с магнитными моментами M , противоположными вследствие антиферромагнитного объединения сопротивление R_0 току I в отсутствие внешнего магнитного поля является высоким (рис. 21а). Внешнее магнитное поле B разрушает антиферромагнитное объединение и магнитные моменты слоев выравниваются с полем (рис. 21б).

Для использования в датчиках ГМР-материал формируется в виде узких полос. Антипараллельное состояние достигается за счет магнитного поля тока вдоль длины полосы плотностью несколько мА/мкм. Внешнее поле в 3–4 кА/м, достаточное для преодоления поля тока и приложенное вдоль длины полосы, поворачивает магнитные моменты обоих слоев параллельно собственному направлению. Влияние знака безразлично — положительное и отрицательное поле, параллельное длине полосы, будет образовывать одно и то же изменение в сопротивлении.



Внешнее поле, приложенное перпендикулярно полосе (именно такое используется для получения эффекта АМР), в ГМР-материалах будет производить малый эффект.

Процентное изменение в сопротивлении (значение, обычно ассоциируемое с ГМР-эффектом), нормализованное относительно насыщенного или минимального сопротивления R «сэндвич»-материала составляет 4–9%; насыщение наступает уже при 3–6,5 мТл приложенного поля (рис. 21в) [82].

Антиферромагнитные мультислои представляют собой множество повторений чередующихся ферромагнитных и проводящих слоев, за счет чего проявления ГМР-эффекта увеличиваются (рис. 22). Каждый ферромагнитный слой имеет магнитный момент, антипараллельный моментам крайних ферромагнитных слоев, — необходимое условие максимального спин-зависимого рассеяния. Большое поле разрушает антиферромагнитное объединение и выравнивает моменты параллельно во всех слоях (состояние низкого сопротивления).

Толщина неферромагнитных слоев обычно меньше, чем в «сэндвич»-материале — 1,5–2,0 нм. Только для определенных толщин поляризованные электроны электропроводности вызывают антиферромагнитное объединение между слоями.

Если же проводящий слой имеет несогласованную толщину, тот же самый механизм антиферромагнитного объединения может вызывать, напротив, ферромагнитное объединение между слоями и отсутствие ГМР-эффекта.

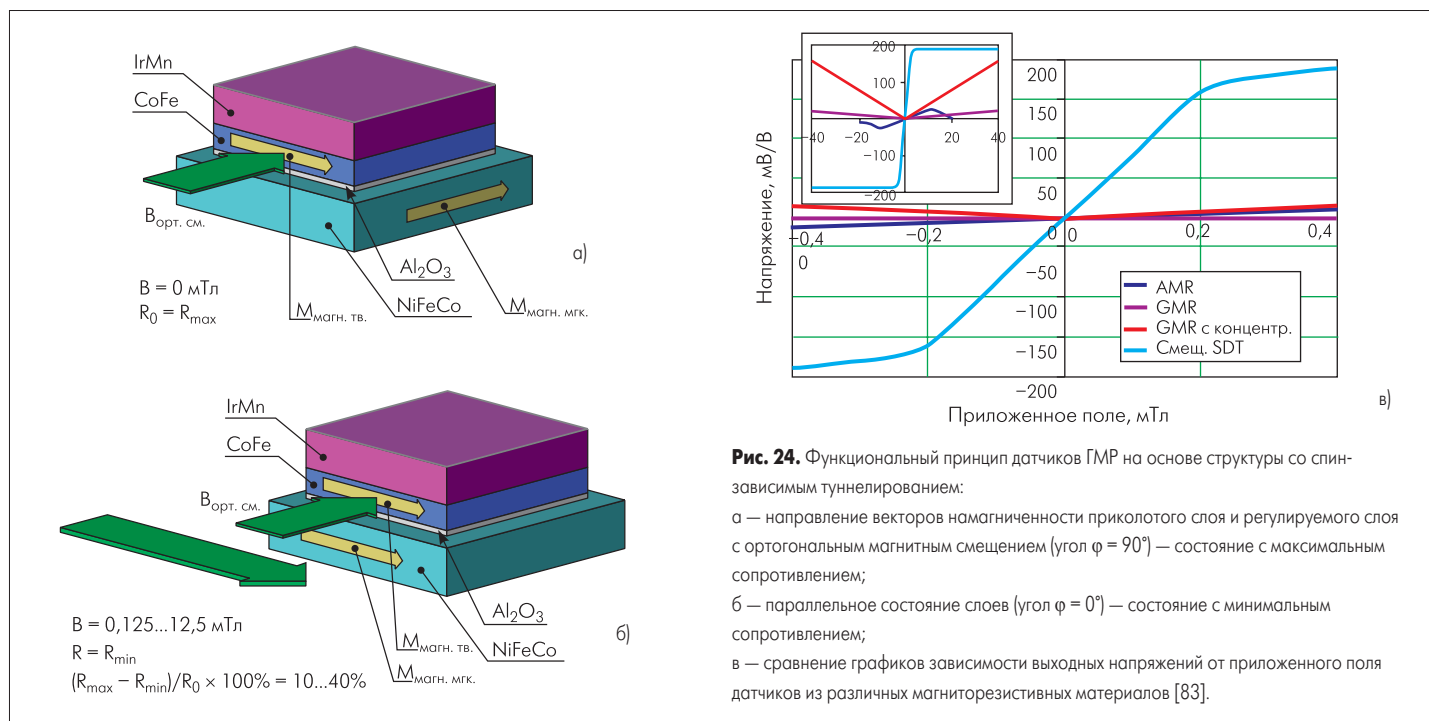
Наибольшее значение ГМР-эффекта в мультислоях составляет 12–16%. Для получения эффекта насыщения требуется много большее внешнее поле (порядка 25 мТл), чем для «сэндвич»-материала, но многослойные ГМР-материалы имеют лучшую линейность и меньший гистерезис.

Спин-клапаны, или антиферромагнитные «приколотые» спин-клапаны отличаются от «неприколотых спин-клапанов», или «сэндвичей», описанных выше, наличием дополнительного слоя антиферромагнитного материала, размещенного сверху или снизу структуры. Антиферромагнитный материал типа FeMn или NiO объединяется с регулируемым ферромагнитным слоем и «прикалывает» его момент в фиксированном направлении. Магнитный момент другого ферромагнитного слоя может свободно вращаться (рис. 23).

Для этих материалов уже не требуется поле тока для создания сильного антиферромагнитного объединения с регулируемыми слоями.

Поскольку изменение намагниченности в свободном слое существует вследствие вращения, а не направленного движения доменов, гистерезис является сниженным. ГМР-эффект составляет 4–20%, насыщающие поля — 1–7,5 мТл.

Именно на основе этой технологии были разработаны автомобильные датчики углового положения Siemens Aktiengesellschaft [48]. ГМР-структура Infineon создана на основе одиннадцати слоев толщиной менее 25 нм. Немагнитная медь разделяет слои железа и кобальта, формируя антиферромагнитное объ-



единение, покрытое двумя слоями магнитомягкого железа. Технология, реализованная ранее в ГМР-резисторах B6, C6, давала изменение в сопротивлении $\Delta R/R_0$ порядка 4% и в практических задачах измерения положения предполагала большие воздушные зазоры (до 25 мм).

Спин-клапанные структуры идеально подходят для измерения углов; специально для этих задач NVE выпускает аналоговые спин-клапанные датчики AAV, коммерчески доступные в настоящий момент.

Кроме автоэлектроники, спин-клапаны ГМР представляют значительный интерес для области их использования в магнитных считывающих головках высокоплотных носителей данных (например, жестких дисков).

Структуры со спин-зависимым туннелированием (SDT — Spin-dependent tunneling) являются самым недавним расширением ГМР-материалов. В отличие от структур типа «неприколотый сэндвич», SDT-структуры для разделения двух магнитных слоев используют тонкий изолирующий слой (рис. 21, 24) [83, 84]. Электропроводность существует вследствие квантового туннелирования через изолятор. Величина тока туннелирования между двумя магнитными слоями модулируется углом между векторами намагничивания в двух слоях.

Используемый рабочий принцип может быть проиллюстрирован рис. 24, на котором показана SDT-структура, описанная специалистами корпорации NVE [84]. Верхний слой стекла — антиферромагнит IrMn «прикалывает» магнитный слой CoFe. Слой Al_2O_3 является изолятором, намагничивание донного слоя NiFeCo подвержено действию магнитного поля.

Дополнение ортогонального смещающего поля $B_{\text{орт. см.}}$, перпендикулярного направлению намагничивания приколотого слоя, уменьшает гистерезис и образует биполярный датчик (рис. 24в) [83]. В отсутствие приложенного поля B направление намагниченности свободного слоя перпендикулярно направлению намагниченности приколотого

слоя. Поле вдоль чувствительной оси, параллельное намагничиванию приколотого слоя, уменьшает угол непараллельности слоев и, следовательно, сопротивление. Поля, действующие в противоположном направлении, увеличивают угол и сопротивление.

Экстремально малые SDT-устройства с размерами в несколько микрон и высоким сопротивлением могут производиться по технологии фотолитографии, допускающей очень плотное корпусирование датчиков на малых площадях.

Хотя эти материалы еще исследуются, уже наблюдались величины ГМР-эффекта в 10–40% [84]. Поле насыщения зависит от состава магнитных слоев и метода достижения параллельного и антипараллельного выравнивания — оно может находиться в диапазоне 0,1–10 кА/м, что означает возможность создания высокочувствительных датчиков с очень высоким сопротивлением, но малым энергопотреблением, подходящих в том числе для работы от батарей.

Колоссальное магнитосопротивление

Предметом изучения ученых на сегодняшний день являются также колоссальные магниторезистивные (КМР) материалы (CMR — colossal magnetoresistive materials). Магнитные свойства класса материалов смешанных оксидов марганца и лантана, а также некоторых других недавно вызвали огромный интерес из-за экстраординарного увеличения удельной электропроводности этих систем вследствие ферромагнитного выравнивания магнитных моментов при уменьшении температуры или действия магнитного поля.

КМР-эффект наблюдается при определенных условиях в смешанных оксидах в условиях магнитоуправляемого перехода «полупроводник — металл» под действием магнитного поля в высоких полях (несколько Тл). Существует предположение о том, что КМР-эффект возникает на основе перехода «металл — изолятор» в процессе изменения низкотемпературного ферро-

магнитного металлического состояния до состояния парамагнитного изолятора, что связано с образованием наномасштабных поляронов — структурно комбинированных спин-поляризованных нанобластей размером порядка 1 нм.

Величина изменения в сопротивлении оценивается в 10^3 – $10^6\%$. Имеются сведения о существовании КМР-материалов, работающих при комнатной температуре, а также о возникновении шумов в КМР-материалах, которые должны приниматься во внимание.

Различные сведения о продвижении исследований КМР-материалов сейчас можно найти только в материалах научно-технических конференций и текстах диссертаций. Поскольку настоящая статья все же имеет своей основной целью рассмотрение коммерчески актуальных и наиболее успешных автомобильных датчиков, более подробно физика КМР-материалов в текущей публикации рассматриваться не будет.

Тем не менее, поскольку КМР-материалы представляют интерес как для использования в автомобильных датчиках на основе моста Уитстона, так и для разработки следующего поколения головок чтения-записи магнитных данных, возникает объективная необходимость приближения понимания фундаментальных свойств КМР-материалов и базисных понятий КМР-датчиков.

ГМР-технологии, материалы и элементная база датчиков NVE

Для производства элементной базы компания NVE использует собственные ГМР-материалы на основе мультислоев никеля, железа, кобальта и меди. Различные сплавы этих материалов депонируются в чередующиеся слои толщинами 15–40 Å для меди (15 Å — это пять атомических слоев или 1,5 нм; один атомный слой меди имеет толщину 3 Å) и 20–50 Å для ферромагнетиков. Линейка стандартных аналоговых датчиков создана на основе техники моста Уитстона с применением различных концентраторов в гибридных ИС [85–87].

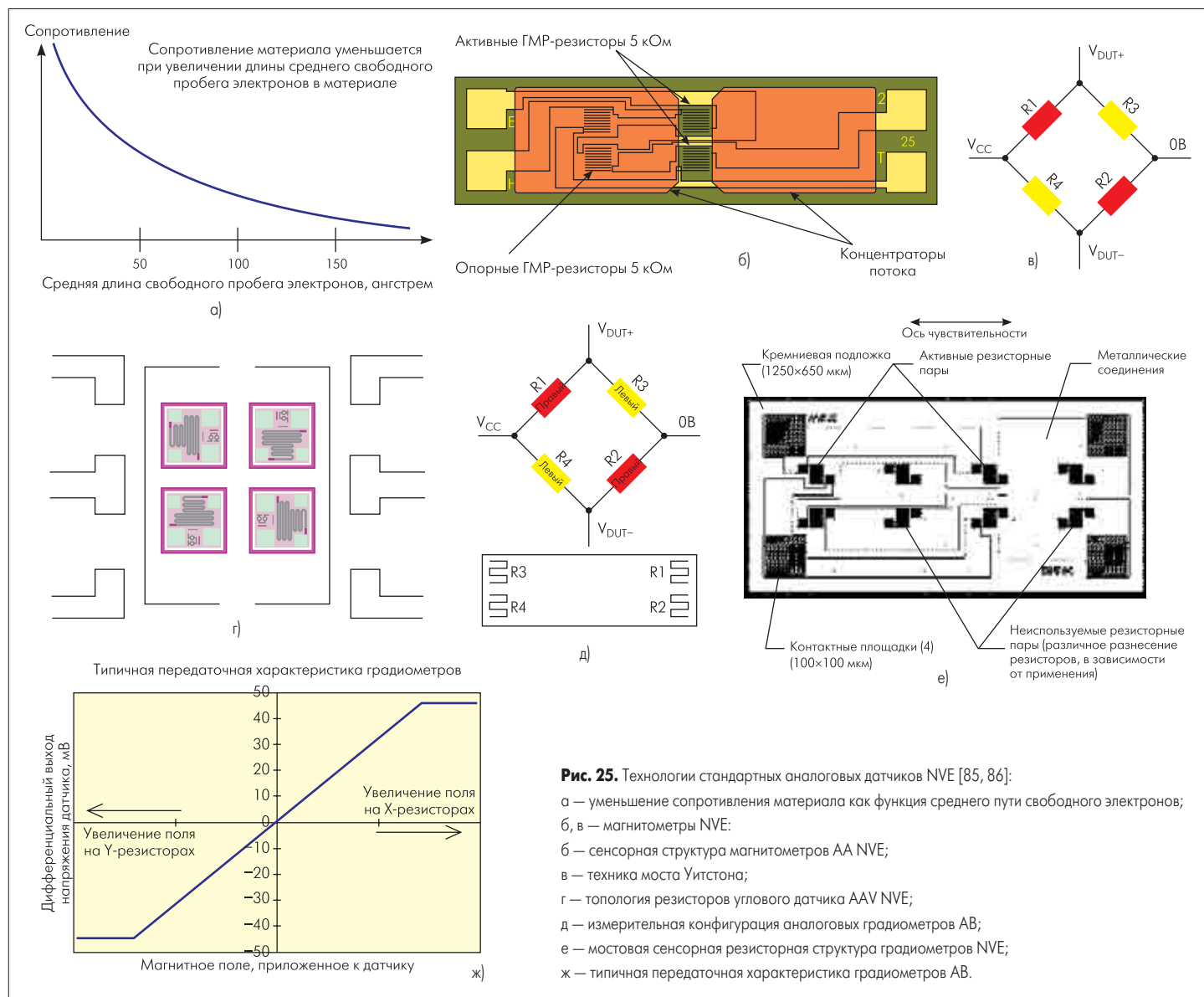


Рис. 25. Технологии стандартных аналоговых датчиков NVE [85, 86]:

- а — уменьшение сопротивления материала как функция среднего пути свободного электронов;
 б, в — магнитометры NVE;
 б — сенсорная структура магнитометров AA NVE;
 в — техника моста Уитстона;
 г — топология резисторов углового датчика AAV NVE;
 д — измерительная конфигурация аналоговых градиометров AB;
 е — мостовая сенсорная резисторная структура градиометров NVE;
 ж — типичная передаточная характеристика градиометров AB.

Принцип работы эффекта показан на рис. 21–22. Типичное для ГМР-материалов NVE соотношение между изменением сопротивления и толщиной слоев, определяющих длину среднего свободного пробега электронов, показано на рис. 25а. В присутствии внешнего магнитного поля изменение электрического сопротивления оценивается в 10–15%.

«Сандвичные» и мультислойные ГМР-материалы NVE основываются на антиферромагнитном объединении между слоями, следовательно они не подвержены влиянию сильных полей и необратимому разрушению, в отличие от материалов других производителей, ГМР-эффект в которых обеспечивается удержанием одного из магнитных слоев намагниченным в определенном направлении, в то время как моменты других слоев вращаются. Внешнее магнитное поле порядка 20 мТл уже может нарушить этот «приколотый» слой, а это вызывает необратимое разрушение сенсорного элемента.

Утверждение о нечувствительности материала к разрушающим полям справедливо и для нового углового датчика AAV NVE с «приколотым» слоем (см. далее), работа которого может быть расстроена при воздействии большого поля, но только при температурах выше 240 °С.

Материал датчиков ГМР является чувствительным к магнитному полю, параллельному плоскости ИС, так же, как и в случае с АМР-датчиками. Выходная характеристика является омниполярной, что означает то же самое изменение в сопротивлении и для положительного, и для отрицательного поля. Это свойство имеет преимущество в энкодерах (удвоение разрешения).

В дополнение, сильные магнитные поля не будут вызывать флиппинг ГМР-датчиков или обращение их выхода, возможное у датчиков АМР.

Выход ГМР является также нечувствительным к частоте изменения параметров механической системы (угловой скорости). Датчик ГМР образует выход даже с постоянным полем (нулевая скорость), что особенно важно для систем с таймированием.

Типичные материалы NVE обеспечивают 98-процентный линейный выход в 10–70% диапазона полной шкалы, значительный ГМР-эффект (13–16%), стабильный температурный коэффициент (0,15%/°С) и диапазон рабочих температур до +150 °С (и выше — до 225 °С) в магнитном диапазоне 0...±30 мТл.

NVE постоянно развивает производство новых ГМР-материалов. Усовершенствования в новых материалах направлены на удвоение

чувствительности, снижение гистерезиса (вдвое) и повышение рабочих температур до +225 °С.

Серии аналоговых ГМР-датчиков NVE AA и AB (табл. 6–9) с их уникальными возможностями магнитного считывания, высокой чувствительностью к приложенному магнитному полю, температурной стабильностью, малым энергопотреблением и малыми размерами подходят для использования в широком диапазоне аналоговых задач — как для создания автомобильных датчиков положения, скорости, измерителей тока, так и для использования в промышленных системах, а также для создания низковольтных батарейных датчиков карманной аппаратуры или имплантируемых медицинских устройств.

Датчики серии AA отличаются наличием концентраторов магнитного потока, которые обеспечивают выходной сигнал, чувствительный к направлению поля. Эти датчики чувствительны только в одном направлении в плоскости ИС, с косинусоидальным масштабированным спадом чувствительности при повороте датчика в сторону от чувствительного направления.

Змеевидные 5–10-килоомные резисторы шириной около 2 мкм размещаются на площадях порядка сотен мкм² в ИС размерами 350×1400 мкм. Крайне малая ширина делает

Таблица 6. Общая техническая характеристика материалов GMP NVE

ГМР-материал	ГМР-эффект, %	Насыщающее поле, мТл	Рабочий температурный диапазон, °C	Гистерезис	Использование в датчиках
ML	12...16	25...45	–40...150	Средний	AA, AB, AD
HTM	8...10	6...10		Высокий	AAH, ABH, ADH
LHNTM	8...10	16...20	–40...200	Низкий	ABL
SV	4...5	2...3		Низкий	AAV

резисторы чувствительными только к компонентам магнитного поля, приложенного вдоль их длины. Магнитные экраны перекрывают два из четырех опорных резисторов в мосте Уитстона, защищая их от приложенного поля (рис. 25б).

Данные устройства обеспечивают омниполярный выход. Все датчики выполнены в конфигурации моста Уитстона (рис. 25в), для того чтобы обеспечивать температурную компенсацию, и выпускаются в двух типах корпусов — SOIC8 и MSOP8 (сенсоры также доступны в форме основы подложки по специальному заказу).

Существует три стандартных семейства аналоговых датчиков серии AA NVE: AA, AAH и AAL, каждое из которых создано на основе материалов с различными показателями ГМР-эффекта, значениями гистерезиса и насыщения (см. табл. 6) [85–87].

С начала 2004 года NVE выпускаются датчики угла серии AAV на основе спин-клапанного ГМР-материала SV, специально предназначенные для выполнения точных (до 1°) и повторяемых угловых измерений. Датчики обеспечивают ратиметричный квадратурный синусно-косинусный выход с амплитудой, пропорциональной напряжению питания в диапазоне 0,1–12 В, и работают в диапазоне –40...+150 °C. Устройства выпускаются в ультраминиатюрном корпусе PLLP6 (3×3×0,9 мм).

AAV001-11 и AAV002-11 являются массивами четырех резисторов, повернутых в корпусе с интервалом в 90°. AAV001-11 характеризуется наличием независимых резисторов с номинальным сопротивлением в 1,5 кОм, которые могут быть соединены вместе, чтобы сформировать два полумоста, или использоваться как независимые резисторы. AAV002-11 имеет мостовое соединение непосредственно в корпусе. Выход любого из датчиков AAV может быть сконфигурирован, чтобы представить синусную и косинусную функции магнитного поля, действующего на датчик.

Сенсорные элементы содержат два ферромагнитных слоя: приколотый, или слой с фиксированным направлением, и подвижный, или свободный слой.

Конечный пользователь должен приложить насыщающее магнитное поле (3–20 мТл) в плоскости датчика. Подвижный слой будет выравниваться с приложенным магнитным полем. Когда приложенное поле изменяет направление, угол между подвижным и приколотым слоями также изменяется, образуя в результате изменение сопротивления устройств (рис. 26г).

Четыре индивидуальных сенсорных резистора установлены в корпус, каждый с прико-

Таблица 7. Сравнительные технические данные аналоговых магнитометров GMP NVE

ГМР-датчик	Насыщающее поле, мТл	Напряжение питания, В	Линейный диапазон, Э	Магнитная чувствительность (при униполярной работе), мВ/Э	Максимальная нелинейность (при униполярной работе), %	Максимальный гистерезис (при униполярной работе), %	Мостовое смещение, мВ/В	Типичное сопротивление, кОм	Выходное напряжение, мВ/В (при максимальном поле)	Рабочая частота, МГц	Температурный коэффициент сопротивления, %/°C	Температурный коэффициент чувствительности при постоянном токе, %/°C	Температурный коэффициент чувствительности при переменном напряжении, %/°C	Рабочая температура, °C	Корпусирование
AA002-02	1,5		1,5...10,5	3...4,2											SOIC8
AA003-02	2		2,0...14	2...3,2											SOIC8
AA004-00	5		5,0...35	0,9...1,3											MSOP8
AA004-02	5	<1...25	5,0...35	0,9...1,3	2	4	±4	5 ±1	60	0...>1	0,14	0,03	–0,1	–50...+125	SOIC8
AA005-02	10		10,0...70	0,45...0,65											SOIC8
AA006-00	5		5,0...35	0,9...1,3				30 ±6							MSOP8
AA006-02	5		5,0...35	0,9...1,3											SOIC8
AAH002-02	0,6	<1...25	0,6...3,0	11...18,0	4	15	±4	2 ±0,4	40	0...>1	0,3	–0,28	–0,40	–50...+150	SOIC8
AAH004-00	1,5		1,5...7,5	3,2...4,8	4	15									MSOP8
AAL002-02	1,5	<1...25	1,5...10,5	3,0...4,2	2	2	±4	5,5 ±1	45	0...>1	0,3	–0,28	–0,40	–50...+150	SOIC8

Таблица 8. Сравнительные технические данные аналоговых градиометров GMP NVE (с расстоянием между элементами 0,5 мм)

ГМР-датчик	Насыщающее поле, мТл	Напряжение питания, В	Линейный диапазон, Э	Резисторная чувствительность, %/Э	Максимальная нелинейность (при униполярной работе), %	Максимальный гистерезис (при униполярной работе), %	Типичное сопротивление, кОм	Мостовое смещение, мВ/В	Выходное напряжение, мВ/В (при максимальном поле)	Рабочая частота, МГц	Температурный коэффициент сопротивления, %/°C	Температурный коэффициент чувствительности при постоянном токе, %/°C	Температурный коэффициент чувствительности при переменном напряжении, %/°C	Рабочая температура, °C	Корпусирование
AB001-02	25	<1...±12,5	20...175	0,02...0,03	2	4	2,5 ±0,5	±4	120	0...>1	0,14	0,03	–0,1	–50...+125	SOIC8
AB001-00	25		20...175	0,02...0,03	2	4									MSOP8
ABH001-02	7	<1...±12,5	5...40	0,06...0,12	4	15	1,2 ±0,25	±4	80	0...>1	0,3	–0,28	–0,4	–50...+150	SOIC8
ABH001-00	7		5...40	0,06...0,12	4	15									MSOP8

Таблица 9. Некоторые технические данные аналоговых угловых датчиков GMP NVE

ГМР-датчик	Насыщающее поле, мТл	Напряжение питания, В	Резисторная чувствительность, %/Э	Максимальная угловая ошибка, °	Типичное сопротивление, кОм	Мостовое смещение, мВ/В	Рабочая частота, МГц	Температурный коэффициент сопротивления, %/°C	Температурный коэффициент чувствительности при постоянном токе, %/°C	Температурный коэффициент чувствительности при переменном напряжении, %/°C	Рабочая температура, °C	Корпусирование
AAV001-11	3...20	12 max	4,5...7	2	1,5 ±0,3	±10	0...>1	+0,3	–0,16	–0,24	–50...+150	PLLP6
AAV002-11												

лотым слоем, повернутым на 90° относительно предшествующего сенсора. Эти резисторы могут быть соединены в конфигурацию двух полумостов, чтобы обеспечивать синусный и косинусный выход, или считываться индивидуально, чтобы обеспечивать абсолютную индикацию угла между приколотым и подвижным слоем (рис. 25г).

Датчики серии АВ — дифференциальные датчики, или градиометры, имеющие преимущество высокоуровневых выходных характеристик. Два стандартных семейства датчиков АВ и АВН имеют рабочие характеристики, подобные АА и ААН, но с биполярными линейными выходными характеристиками дифференциального датчика (рис. 25, д, е, ж). Две пары неэкранированных ГМР-резисторов, физически разнесенных вдоль направления чувствительности ИС, подходят для аналоговых задач детектирования направления и малых градиентов в больших и малых магнитных полях.

Датчики линейного положения

Благодаря своей высокой чувствительности ГМР-датчики магнитного поля могут эффективно обеспечивать информацию о положении [85–87]. Для определения линейного положения, например, подвески или гидравлических и пневматических цилиндров, используются простые конфигурации «датчик — магнит» (рис. 26, а, б, в). На рис. 26а перемещение вдоль оси Y изменяет B_x — величину поля, детектируемую датчиком, чувствительное направление которого лежит в оси X. Рис. 26б–в иллюстрируют направленные перемещения и чувствительную ось вдоль оси X. Необходимо отметить, что из-за нелинейной характеристики магнитных полей, образованных дипольными постоянными магнитами, диапазон линейного выхода может быть ограничен.

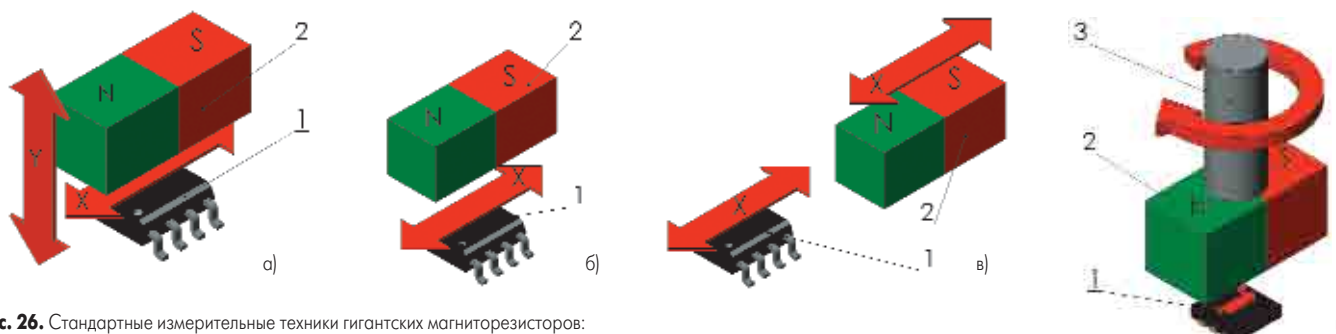


Рис. 26. Стандартные измерительные техники гигантских магниторезисторов:

а, б, в — конфигурации линейных ГМР-датчиков;

г — схема угловых измерений с AAV00х-хх: 1 — ИС ГМР-датчика; 2 — магнит — цель; 3 — вал.

Датчики углового положения

До разработки датчиков AAV базовые принципы ГМР-датчиков NVE в детектировании угловых систем были ориентированы преимущественно на реализацию схемы с обратным магнитным смещением, обычно применяемой для измерения скорости (коробка передач, АБС) или определения положения вала в системах с таймированием (коленчатый или распределительный вал).

ГМР-датчики углового положения конструируются на основе метода, изложенного выше при описании базового рабочего принципа датчиков серии AAV и во многом идентичного АМР-датчикам. В системах измерения угла магнит на цели вращается перед датчиком, размещенным с нулевым углом между подвижным слоем и приколотым слоем на нулевой контрольной оси (Y или X) (рис. 26г) [85–87]. Когда магнит-цель вращается, угол внешнего поля ϕ изменяется относительно направления намагничивания приколотого слоя.

Угловым датчик ГМР чувствителен только к направлению поля, а не к его величине. Высокая чувствительность и малый размер сенсорного элемента, способность работы в системах с постоянной скоростью обеспечивают широкие рабочие пределы в системах измерения как положения, так и скорости, что особенно важно для разработки автомобильных систем с малыми магнитами и большими градиентами полей. ГМР-датчики вырабатывают высокие уровни первичных сигналов, устойчивые к высокочастотной вибрации. За счет вышеперечисленных достоинств могут быть значительно уменьшены системные издержки в производстве датчиков для автоэлектроники, так как могут быть использованы обычные сравнительно недорогие ферритовые магниты или магниты типа Алнико.

Датчики положения дрессельной заслонки и педали

Виртуальный макет датчика положения дроссельной заслонки для автомобилей ВАЗ, разработанный с применением AAV002-11 на основе изложенных выше принципов, показан на рис. 27. Этот датчик внешне идентичен АМР-датчику, но имеет существенное функциональное отличие (см. проект реализации принципиальной электрической схемы, приведенной на рис. 27б с коррекцией выходного мостового сигнала интерфейсной ИС ZMD31050 [89]).

В качестве нулевой оси датчика, совпадающей с легкой осью магнита, будет выбрана ортогональная ось, направление которой указано на ИС стрелкой.

Коммерчески доступная элементная база АМР-датчиков для этой конструкции состоит из двух представителей семейства AAV (см. табл. 9).

На рис. 28 показан проект автомобильного датчика положения педали, использующий те же измерительные принципы ГМР-эффекта, реализованные в несколько иной механической конструкции (эта конструкция с применением датчика Холла параллельных полей AS5040 AustriaMicrosystems находится в стадии патентования; ее детальное описание будет дано в следующей части статьи). Практическая реализация схмотехнической части устройства на основе ГМР-эффекта предполагает использование элементной базы, аналогичной ZMD31050 или MAX1455 [89–91].

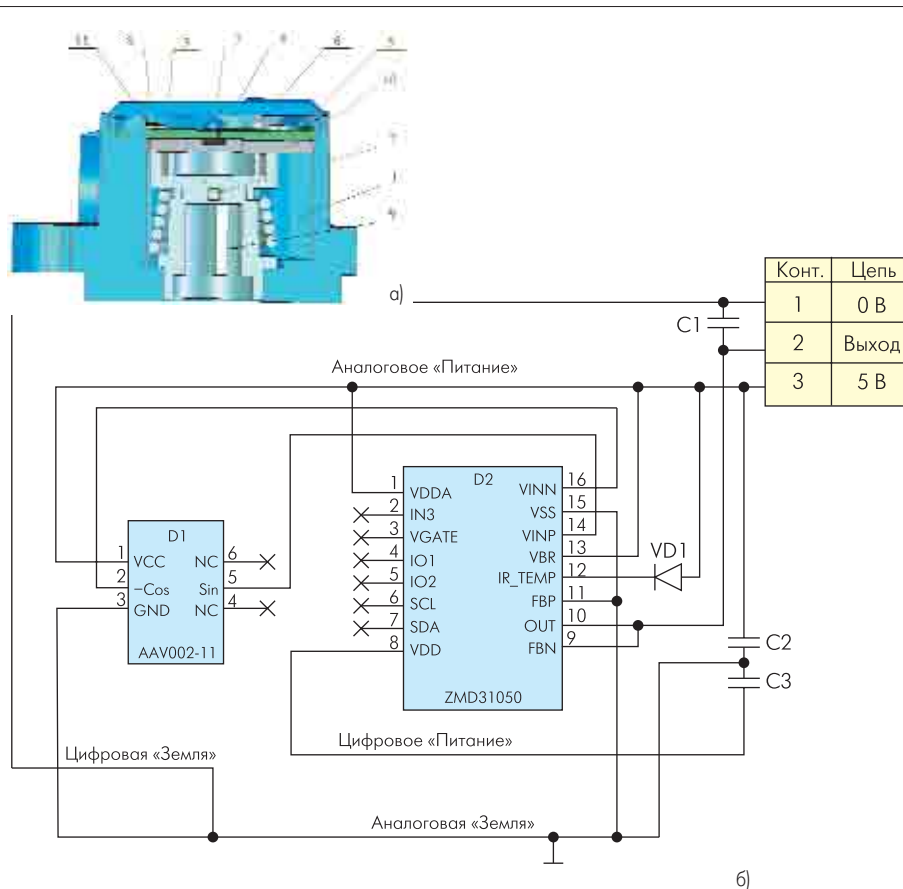


Рис. 27. Проект датчика положения дроссельной заслонки с угловым ГМР-датчиком (AAV002-11 NVE):

а — конструкция датчика в разрезе в его симметричном угловом положении

(ИС ZMD31050 и компоненты схемы условно не показаны, так как их расположение безразлично):

1 — корпус датчика; 2 — роторный узел (сборочная единица, включающая также поз. 9 и 7;

выполняется на основе деталей, жестко связанных между собой); 3 — кольцевой постоянный магнит;

4 — ГМР-датчик (AAV002-11 NVE); 5 — печатная плата; 6 — контакты разъема; 7 — пружина кручения;

8 — крышка датчика; 9 — установочная втулка роторного узла 2;

10 — ограничитель осевых перемещений — вспомогательная крышка, закрепляемая на винтах;

11 — крепеж ограничителя;

б — принципиальная электрическая схема датчика с AAV002-11, ZMD31050 и дискретными компонентами.

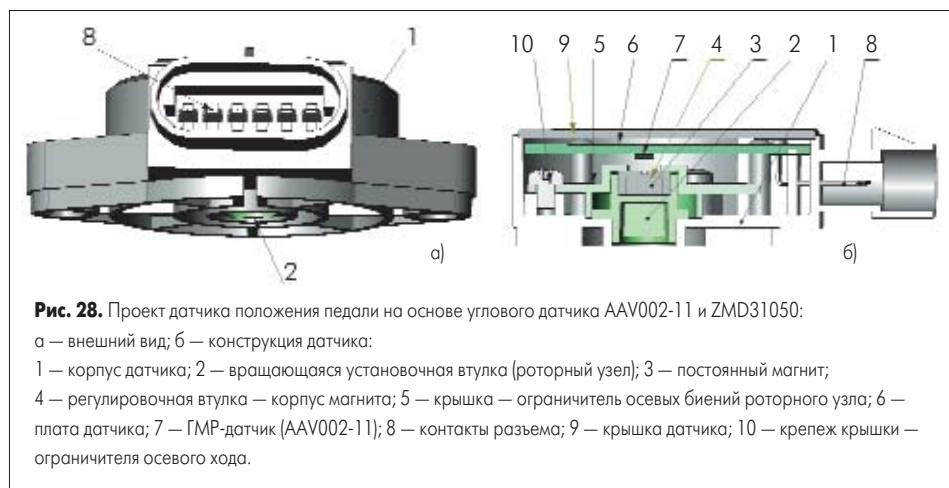


Рис. 28. Проект датчика положения педали на основе углового датчика AAV002-11 и ZMD31050:

а — внешний вид; б — конструкция датчика:

1 — корпус датчика; 2 — вращающаяся установочная втулка (роторный узел); 3 — постоянный магнит; 4 — регулировочная втулка — корпус магнита; 5 — крышка — ограничитель осевых биений роторного узла; 6 — плата датчика; 7 — ГМР-датчик (AAV002-11); 8 — контакты разъема; 9 — крышка датчика; 10 — крепеж крышки — ограничителя осевого хода.

Особенности схемотехники ГМР

Для создания ГМР-датчиков магнитного поля могут быть использованы как конфигурация моста Уитстона, так и простые ГМР-резисторы и ГМР-полумосты, а также включение активных элементов полумоста во внешний мост.

Как упоминалось выше, стандартной техникой NVE является комбинация моста Уитстона. Эти датчики входят в две категории: датчики поля (без обрабатывающей электроники) и интегрированные датчики, применяющие обработку сигнала.

Специальной техникой в магнитометрах является пассивное усиление с различными сочетаниями концентраторов и экранов. Концентраторы в виде дополнительных пермалловых структур на подложке увеличивают магнитное поле приблизительно с учетом соотношения длины концентраторов и зазора между ними. Чувствительность ГМР-мостовых датчиков может регулироваться изменением геометрии с коэффициентом 2–100.

В магнитометрах два активных ГМР-резистора, размещенных в зазоре между двумя концентраторами магнитного потока, подвержены действию внешнего поля; два других резистора под концентраторами магнитного потока являются экранированными. Униполярный выход моста, пропорциональный напряженности поля, может быть прямо подан на вход линейного усилителя или компаратора.

В градиометрах, рассчитанных на применение схемы с обратным смещением, техника экранирования не применяется, поэтому все 4 резистора являются активными; диагональные резисторы, попарно физически разнесенные в датчике, определяют градиенты полей. В этом случае выход моста может быть биполярным (рис. 25ж).

Поскольку все резисторы в схеме моста Уитстона производятся из того же самого материала, они имеют тот же самый температурный коэффициент. Мостовой выход является удвоенным в сравнении с выходом моста с одним активным резистором.

Для предусиления мостового выхода ГМР-датчика разработаны специальные методы на основе одного, двух операционных или трех (с дополнительным дифференциальным) усилителей. Еще лучшие результаты постобработки мостового сигнала могут быть получены на основе недорогих и эффективных ин-

струментальных усилителей типа AD620 Analog Devices или INA118 Burr Brown, обеспечивающих значительные преимущества в уменьшении шумов, числа компонентов, размера и других характеристик, например частотных свойств, по сравнению с операционными усилителями [85, 87].

Необходимо отметить, что шумовая характеристика ($1/f$) ГМР-датчиков NVE приблизительно на порядок выше величины шума для тонкопленочных резисторов [85, 87, 88]. Фактическая причина возникновения шума в настоящий момент исследуется [88]. Показано, что шум пропорционален плотности квадрата тока. Термический шум должен учитываться начиная с 10 кГц частоты изменения параметров механической системы.

При измерении слабых полей шумы ограничивают минимальный обнаруживаемый сигнал. Для измерения низких полей NVE рекомендует схему модуляции-демодуляции сигнала с циклическим сдвиговым регистром паразитного фазового сдвига [85, 87].

«Умные» датчики с сенсорными элементами и ассоциированной электроникой усиления и обработки сигнала в ИС являются направлением дальнейшего развития ГМР-датчиков. ГМР-материалы могут интегрироваться с полупроводниковыми структурами BiCMOS и биполярными основными слоями. Только из-за их специфической топографии должны быть зарезервированы большие области без основных транзисторов и соединений ГМР-резисторов.

К текущему набору функций, интегрируемых в датчик, относятся регулятор напряжения или источники тока для сенсорного элемента, пороговое детектирование для получения переключаемого выхода, усилители, логические функции, в том числе схема деления на два, и различные опции типа выхода, например двухпроводной ШИМ-датчик с двумя токовыми уровнями.

Преобразование аналогового сигнала в цифровой или токовый выход в ИС датчика является средством для минимизации электронных шумов. Обычные цифровые и ШИМ-выходы обеспечивают более стабильный сигнал, чем нелинейный аналоговый выход. Гистерезис в материале тогда может быть полезным, поскольку некоторый гистерезис обычно встраивается в компараторы для предотвращения дребезга (джиттера) выхода вследствие шумов.

В чисто линейных аналоговых системах гистерезис может быть высоким (для датчиков АА при униполярной работе гистерезис достигает 4%, а при биполярной работе — 20%, вследствие чего возникают проблемы: получение неповторяемого выхода, образование смещения и т. д.). Тем не менее высокий уровень первичного выходного сигнала предполагает меньшие усилия по его компенсации.

Электроника, размещенная на плате близко к месту генерации сигнала в ИС датчика, также является средством усиления низкоуровневых сигналов до значительных напряжений и подавления помех. Функционирование обрабатывающей электроники мостового сигнала осуществляется на основе стандартных принципов, описанных во второй и третьей частях настоящей публикации. Новое поколение интегральных внешних сигналообработчиков моста [89–91] разрабатывается с целью объединения большого числа функций, реализуемых в одном корпусе, и сводит к минимуму число внешних компонентов схемы и усилия разработчиков.

Заключение

Датчики являются существенными компонентами автомобильных электронных систем управления. Объемы их использования неуклонно возрастают, так же как и требования, предъявляемые к их надежности, точности, чувствительности и стабильности, порождая эволюцию в новых сенсорных технологиях, применяемых на автомобильном рынке для бесконтактного детектирования абсолютного положения, расстояния, линейной и угловой скорости, а также управления. Гигантские магниторезисторы обеспечивают экономически эффективное решение для широкого круга именно этих задач. Потенциометры GMR ASIC характеризуются применением CMOS-технологии с возможностью получения различных типов готовых выходов.

Текущее состояние современной элементной базы электронной технологии ГМР, подходящей для разработки новых датчиков абсолютного положения, отражено в таблицах 7–9.

Гигантские магниторезисторы формируют только одно из нескольких направлений перспективных типов датчиков, широко внедряемых сегодня; тем не менее только они обеспечивают уникальные технические преимущества.

В то время как стандартные магнитоуправляемые датчики Холла реагируют на напряженность магнитного поля, датчики ГМР реагируют главным образом на ориентацию поля и его направление. Таким образом, потенциальные эффекты вариаций воздушных зазоров, присутствующих между датчиком и магнитом, являются в данном случае незначительными. Несмотря на влияние шумов, верхняя рабочая частота датчиков значительна (10 кГц) и достаточна для большинства автомобильных систем.

Это означает, что технология ГМР объективно предназначена для создания конструкций новых потенциометров с большим сроком службы в жестком эксплуатацион-

ном режиме, например в условиях вибрации и ускорения, типичных для автомобильного сектора.

Таким образом, ГМР-детекторы абсолютно го положения демонстрируют значительные преимущества не только перед контактными потенциометрами с точки зрения их более высокого срока службы, отсутствия износа и, следовательно, более низкой стоимости, но и перед стандартными магнитоуправляемыми и магниторезистивными бесконтактными датчиками ввиду их собственной высокой чувствительности, температурной стабильности, малого энергопотребления, нечувствительности к допускам монтажа и, как следствие, малой и неуклонно снижаемой общей системной стоимости.

Литература

73. Vogelgesang B., Bauer Ch., Rettig R. Performance of GMR-elements in sensors for automotive application. Robert Bosch GmbH. www.amaa.de/pdfs/013.pdf
74. Strassberg D. Automotive-sensor technology drives nonautomotive embedded designs. EDN, 05 Sep. 2002. <http://www.edn.com/article/CA240929.html>
75. Smith C. H., Schneider R. W. Low Magnetic Field Sensing with GMR Sensors. Part I: The Theory of Solid-State Magnetic Sensing. Nonvolatile Electronics, Inc. <http://www.sensorsmag.com/articles/0999/76/index.htm>
76. Smith C. H., Schneider R. W. Low Magnetic Field Sensing with GMR Sensors. Part II. Nonvolatile Electronics, Inc. <http://www.sensorsmag.com/articles/1099/84/index.htm>
77. New Generation of Giant Magnetoresistance Sensors. Components in Electronics, December 2004. <http://www.nve.com/spec/techinfo.php>
78. Magnetic sensor having adjusted specific resistance distribution of first magnetic layer of free magnetic layer of multi-layered ferri-structure. US Patent 6 831 817. 14.12.2004. (Alps Electric Co., Ltd.)
79. Device for detecting the angular position of an object using a magnetoresistive sensor. US Patent 5 650 721. 22.06.1997. (Siemens Aktiengesellschaft)
80. Seat occupant sensing system. US Patent 5 971 432. 26.10.1999. (Breed Automotive Technology, Inc.)
81. Voltage proportional replication device using magnetoresistive sensing elements. US Patent 5 512 818. 30.04.1996. (AT&T Corp.)
82. Smith C. H., Schneider R. W. Low-Field Magnetic Sensing with GMR Sensors. Presented at Sensors EXPO-Baltimore, May 1999. Nonvolatile Electronics, Inc. <http://www.nve.com/spec/techinfo.php>
83. Smith C. H., Schneider R. W. GMR and SDT Sensors and Arrays for Low-Field Magnetic Applications. Nonvolatile Electronics, Inc. <http://www.nve.com/advtech.php>
84. Smith C. H., Schneider R. W. Chip-Size Magnetic Sensor Arrays. Prepared for Sensors EXPO. 21 May 2002. NVE Corp. <http://www.nve.com/advtech.php>
85. GMR Sensors Catalog. NVE Corp. 2005. <http://www.nve.com/spec/PDFs/catalog.pdf>
86. AA and AB-Series Analog Sensors. http://www.nve.com/spec/PDFs/analog_catalog.pdf
87. Engineering and application notes. Giant magnetoresistive (GMR) sensors. NVE Corp. www.nve.com/spec/PDFs/apps.pdf
88. Petta J. R., Ladd Th. and Weissman M. B. Nonlinear AC Response and Noise of a Giant Magnetoresistive Sensor. IEEE Transactions On Magnetism. Vol. 36. No. 4. July 2000. http://people.deas.harvard.edu/~petta/IEEETMag_36_2057_2000.pdf
89. ZMD31050 Advanced Differential Sensor Signal Conditioner. Datasheet Preliminary. http://www.zmd.de/pdf/ZMD31050Datasheet_Rev0.7.pdf
90. Integrated Analog Signal-Conditioning IC Handles Harsh Environments. Bindra Ashok. ED Online ID #4734. 18 September 2000. <http://www.elecdesign.com/Articles/Print.cfm?AD=1&ArticleID=4734>
91. Low-Cost Automotive Sensor Signal Conditioner MAX1455. 19-2088. Rev 1. 10.2001. <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX1455.pdf>