

УДК 681.586.785

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ МАГНЕТОМЕТР НА ОСНОВЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

В.Н. Серов[@], к.т.н., доцент
Л.Ю. Фетисов, к.ф.-м.н., доцент
Ю.К. Фетисов, д.ф.-м.н., профессор
Е.И. Шестаков, аспирант

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: serov@mirea.ru

Разработан высокочувствительный магнетометр на основе магнитоэлектрического датчика магнитных полей нового типа. Датчик представляет собой структуру, содержащую механически связанные слои ферромагнетика и пьезоэлектрика, помещенную в электромагнитную катушку. Магнитоэлектрический эффект возникает в результате комбинации магнитострикции ферромагнитного слоя и пьезоэффекта в пьезоэлектрическом слое. При воздействии на структуру поля накачки h с частотой f и измеряемого постоянного поля H она генерирует гармоники напряжения с частотами f , $2f$, $3f$ и т.д. Амплитуды 1-ой и 3-ей гармоник линейно зависят от H , что и использовано для измерения поля. Исследованы полевые, частотные и амплитудные характеристики датчика. Описаны электронные схемы, реализующие обработку сигналов датчика. Изготовлен макет магнетометра с батарейным питанием, работающий в диапазоне полей 0.1–200 мЭ и обеспечивающий точность измерений 0.1 мЭ. Магнетометр может составить конкуренцию феррозондовым датчикам и найти применение в геофизике, системах навигации, дефектоскопии и медицине.

Ключевые слова: магнетометр, датчик магнитных полей, магнитоэлектрический эффект, магнитострикция, пьезоэффект, синхронное детектирование, измерительные устройства с автономным питанием.

HIGH-SENSITIVITY MAGNETOMETER BASED ON A MAGNETOELECTRIC SENSOR

V.N. Serov[@],
L.Y. Fetisov,
Y.K. Fetisov,
E.I. Shestakov

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia

[@]Corresponding author e-mail: serov@mirea.ru

A high-sensitivity magnetometer based on new type magnetoelectric sensor was fabricated. The sensor contains a composite structure of ferromagnetic and piezoelectric layers placed

inside an electromagnetic coil. Magnetoelectric effect in the structure arises due to combination of magnetostriction of the ferromagnetic layer and piezoelectricity of the piezoelectric layer. Under simultaneous action of pumping magnetic field with frequency f and dc field to be measured, the structure generates voltage harmonics with frequencies f , $2f$, $3f$. Amplitudes of the 1st and the 3^d harmonics are linear functions of H , which is used for measurements. The field, frequency, and amplitude characteristics of the sensor were investigated. The electronics circuits used for signals processing are described. The battery powered proto-type of the magnetometer operates in the 0.1–200 mOe magnetic field range with accuracy of 0.1 mOe. The proposed magnetoelectric magnetometer may compete with fluxgate magnetometers and find applications in geophysics, navigation, defectoscopy, and medicine.

Keywords: magnetometer, magnetic field sensor, magnetoelectric effect, magnetostriction, piezoelectric effect, phase-locking, autonomous measuring devices.

Введение

В настоящее время приборы для измерения магнитного поля (магнетометры) широко применяются в таких областях науки и техники, как физика, геофизика, медицина, неразрушающая дефектоскопия, системы обеспечения безопасности [1–3]. В магнетометрах применяются различные типы датчиков магнитных полей, которые, в зависимости от величины измеряемого поля, можно условно разделить на четыре основных типа:

1. Для измерения сильных полей ($B \sim 0.1$ мТл – 1 Тл) применяют датчики на основе силы Лоренца (датчики Холла [4], микроэлектромеханические [5], пьезоэлектрические датчики [6]);
2. Для измерения средних полей ($B \sim 1$ мкТл – 1 мТл) более подходят магниторезистивные (гигантское, анизотропное и туннельное магнетосопротивления [7]) и магнитоимпедансные [8] датчики;
3. Для измерения слабых полей ($B \sim 0.1$ нТл – 10 мкТл) широкое распространение получили fluxgate-магнетометры, использующие перемагничивание ферромагнетика в переменном поле [9, 10]; сверхслабые магнитные поля ($B \sim 1$ фТл – 1 нТл) измеряют с помощью сверхпроводящих магнетометров, использующих эффект Джозефсона;
4. Для измерения переменных полей величиной $B \sim 10$ фТл – 1 мТл широко применяют датчики на основе явления электромагнитной индукции [11].

В последние годы активно исследуют датчики на основе магнитоэлектрического (МЭ) эффекта в композитных структурах, содержащих механически связанные ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои [12–15]. МЭ-эффект в таких структурах позволяет осуществить прямое преобразование магнитного поля в электрический сигнал и возникает из-за комбинации магнитострикции ФМ-слоя и пьезоэффекта в ПЭ-слое. При помещении структуры в слабое измеряемое переменное магнитное поле h и дополнительное постоянное поле смещения H возникает магнитострикционная деформация ФМ-слоя. Она передается ПЭ-слою, который, вследствие пьезоэлектрического эффекта, генерирует переменное напряжение u . Амплитуда напряжения линейно растет с увеличением измеряемого поля $u \sim h$. С использованием структур, содержащих ФМ-слои с высокой магнитострикцией λ (металлы Ni, Co, сплавы FeCo, FeGa, Terfenol-D, ферриты) и ПЭ-слои с большим пьезомодулем d (керамика цирконата-титаната свинца, монокри-

сталлы магниониобата–танталата свинца, пьезоволоконные композиты), созданы датчики, регистрирующие минимальные поля до $\sim 10^{-9}$ Тл (т.е. до $\sim 10^{-5}$ Э) [14] с частотами от десятков Гц до десятков кГц.

В настоящей работе впервые создан и исследован магнетометр для измерения слабых постоянных магнитных полей на основе МЭ-датчика нового типа, который использует эффект генерации гармоник напряжения ФМ–ПЭ-структурой при одновременном воздействии на нее переменного магнитного поля накачки h большой амплитуды с частотой f и слабого измеряемого постоянного поля H [17]. Принцип работы магнетометра на основе МЭ-датчика наиболее близок к принципу работы магнетометров на основе феррозондовых (ФЗ) датчиков [9–11]. Поэтому характеристики МЭ-датчика сравниваются в основном с характеристиками ФЗ датчиков.

В первых разделах статьи описаны конструкция и принцип работы нового МЭ-датчика, приведены измеренные полевые и частотные характеристики датчика. Далее описана структурная схема и электронные схемы магнетометра. В заключительной части работы приведены параметры разработанного магнетометра, перечислены отличия и преимущества МЭ-магнетометров по сравнению с ФЗ-магнетометрами.

Конструкция магнитоэлектронного датчика

Конструкция МЭ-датчика схематически изображена на рис. 1а, а внешний вид изготовленного макета – на рис. 1б. Основным элементом датчика является структура, содержащая ФМ-слой и механически связанный с ним ПЭ-слой. Структура помещена в электромагнитную катушку, которая подключена к источнику тока $I(f)$ и создает переменное магнитное поле накачки $h \cos(2\pi ft)$ достаточно большой амплитуды h с частотой f . Измеряемое постоянное поле H приложено параллельно к плоскости структуры и возбуждающему полю h . Генерируемое вследствие МЭ-эффекта выходное напряжение $u(f)$ снимается с обкладок ПЭ-слоя структуры.

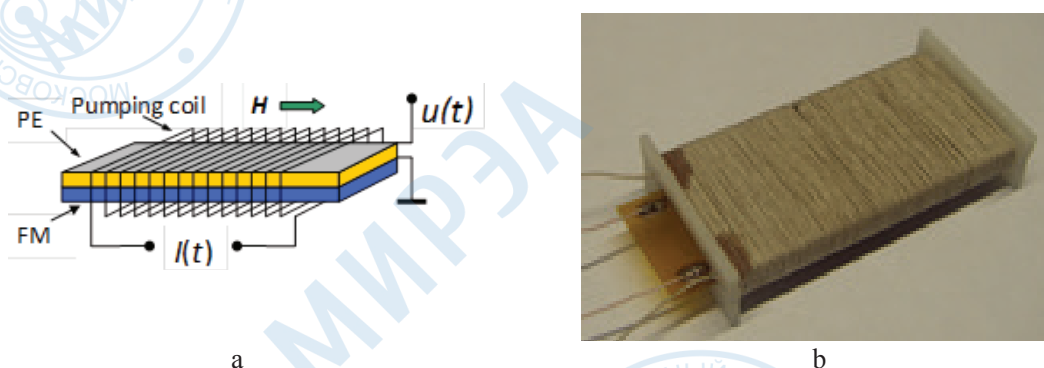


Рис. 1. Схематическая конструкция (а) и внешний вид (б) макета МЭ-датчика.

Макет МЭ-датчика содержит два ФМ-слоя, между которыми был расположен ПЭ-слой. Симметричная конструкция позволила избавиться от возникновения изгибных колебаний структуры при ее магнитострикционной деформации. В качестве материала для ФМ-слоев (каждый размерами 10×40 мм и толщиной 25 мкм) использована лента из аморфного ферромагнитного сплава состава FeBSiC (Metglas 2605S1A Magnetic Alloy)

[19]. Metglas имеет достаточно высокую магнитострикцию насыщения $\lambda_s \approx 20 \cdot 10^{-6}$ в малых полях насыщения $H_s \approx 30$ Э, наибольшие по величине пьезомагнитные коэффициенты $\lambda^{(1)}$, $\lambda^{(2)}$ и $\lambda^{(3)}$ среди используемых в МЭ-структурах материалов и малый гистерезис $H_r < 0.2$ Ое. В качестве ПЭ-слоя использовали пьезоволоконный композитный (PFC) преобразователь (M4010-P1, Smart Materials) размерами 10×40 мм и толщиной 0.3 мм [20]. Преобразователь содержит набор волокон из цирконата-титаната свинца (PZT-волокна) прямоугольного сечения, расположенных между встречно-штыревыми преобразователями с периодом 1 мм. Емкость и сопротивление PFC на частоте 1 кГц равнялись, соответственно, $C = 0.96$ нФ и $R = 10.8$ МОм. Волокна композита поляризованы в продольном направлении, и при деформации работал пьезомодуль $d_{33} = 460 \cdot 10^{-12}$ С/Н. Использование PFC, вместо поперечно поляризованной пластины из PZT керамики, позволило существенно повысить эффективность МЭ-взаимодействия. Слои структуры соединены с помощью клея «Loctite». Структура помещена в катушку с поперечным сечением 20×1 мм и длиной 40 мм.

Измерения характеристик макета МЭ-датчика проводили на стандартном измерительном оборудовании. Генератор Agilent 33210A, подключенный к катушке, обеспечивал магнитное поле накачки $h \cos(2\pi ft)$ с частотой $f = 10$ Гц – 100 кГц и амплитудой до $h = 6$ Ое. Постоянное поле $H = 0$ –40 Э создавали с помощью катушек Гельмгольца диаметром 200 мм, подключенных к прецизионному регулируемому источнику постоянного тока TDK-Lambda. Спектр частот напряжения, генерируемого датчиком, регистрировали с помощью низкочастотного спектроанализатора SR770 фирмы Stanford Research.

Принцип работы магнитоэлектрического датчика

Принцип работы МЭ-датчика поясняет рис. 2. На рис. 2а изображена типичная зависимость $\lambda(H)$ магнитострикции ФМ-слоя от постоянного поля H . Магнитострикция насыщается на уровне λ_s в поле H_s . Зависимость $\lambda(H)$ имеет симметричный относительно инверсии направления поля H вид.

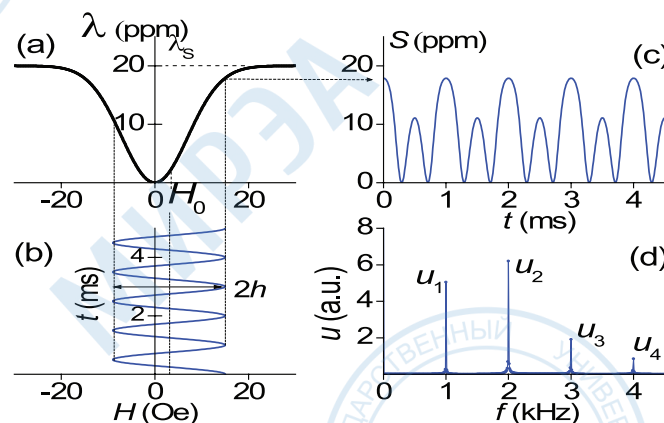


Рис. 2. Графики, поясняющие принцип работы МЭ-датчика:

- (а) зависимость магнитострикции ФМ-слоя от поля H ;
- (б) поле накачки $h(t)$ и постоянное поле H_0 ;
- (с) зависимость деформации ФМ-слоя S от времени t ;
- (д) спектр частот генерируемого напряжения $u(f)$.

При приложении к структуре поля накачки $h \cos(2\pi ft)$ в ФМ-слое возникает переменная однополярная деформация $S(t)$ (рис. 2b), период которой меньше в два раза. Если дополнительно приложить к структуре слабое измеряемое постоянное поле H_0 , то нелинейность магнитострикции приводит к отличию величины соседних максимумов на зависимости $S(t)$ и искажению их формы. Эта деформация передается ПЭ-слою структуры, и он генерирует напряжение $u(t)$ примерно такой же формы. Фурье-преобразование от функции $u(t)$ дает спектр частот выходного напряжения, показанный на рис. 2с. Спектр содержит низшую гармонику с частотой накачки f и амплитудой u_1 и высшие гармоники с частотами $2f$, $3f$, $4f$ и т.д. и амплитудами u_2 , u_3 , u_4 , соответственно.

Типичные временные формы и спектры частот напряжения, генерируемого композитной МЭ-структурой при воздействии накачки $h = 5$ Ое с частотой $f = 1$ кГц без постоянного поля и в присутствии постоянного поля, показаны на рис. 3. Видно, что при $H = 0$ структура генерирует только четные гармоники напряжения с частотами $2f$ и $4f$ и амплитудами u_2 и u_4 , соответственно. Если $H = 1$ Э, форма генерируемого сигнала искажается и в спектре появляются также нечетные гармоники напряжения с частотами f , $3f$ и амплитудами u_1 и u_3 , соответственно. Как будет показано далее, при малых h , $H \ll H_s$ амплитуды первой u_1 и третьей u_3 гармоник линейно растут с увеличением H , что можно использовать для измерения постоянного поля. Из рис. 3d следует, что амплитуда 1-ой гармоники на порядок больше амплитуды 3-ей гармоники. Поэтому в настоящей работе при создании магнетометра использовали 1-ю гармонику напряжения.

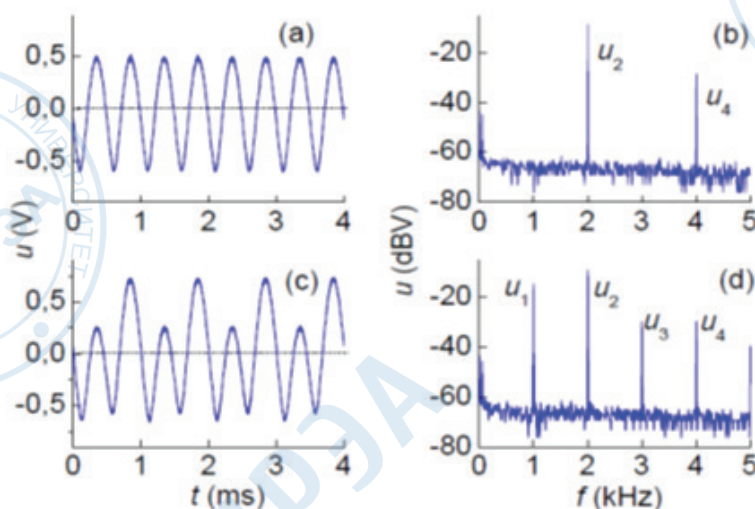


Рис. 3. Формы (а, с) и спектры частот (b, d) напряжения, генерируемого датчиком при поле $h = 5$ Э с частотой $f = 1$ кГц: (а) и (b) – при $H = 0$, (с) и (d) – при $H = 1$ Ое.

Полевые характеристики магнитоэлектрического датчика

Полевые характеристики МЭ-датчика, измеренные при частоте накачки $f = 1$ кГц, приведены на рис. 4. Согласно зависимости амплитуды гармоники u_1 от постоянного поля H для различных полей накачки h (рис. 4а), с увеличением H амплитуда гармоники u_1 для всех h вначале линейно растет, достигает максимума в поле $H_m \sim 4-7$ Ое, а затем монотонно падает при насыщении ФМ-слоя. При малых $h \ll H$ поле H_m соответствует полю максимума пьезомагнитного коэффициента ФМ-слоя структуры. С ростом амплитуды накачки h величина генерируемого структурой напряжения u_1 при одном и том же H

существенно возрастает. Из рис. 4а видно также, что с увеличением поля накачки h диапазон рабочих полей МЭ-датчика, т.е. область примерно линейной зависимости $u_1(H)$ от нуля до $\sim H^*$, расширяется, и чувствительность датчика, т.е. наклон зависимости $S = u_1/H$ в области малых полей, растет. Очевидно и то, что для датчика с ФМ-слоями из Metglas при амплитуде поля накачки $h = 5$ Э верхняя граница рабочего диапазона измеряемых полей составляет $H^* \sim 4$ Э, и чувствительность датчика, определенная по наклону кривой, равняется $S \approx 0.25-0.28$ В/Э.

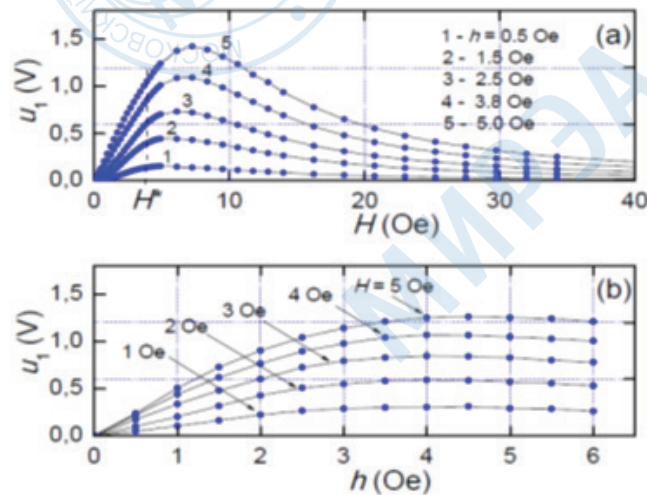


Рис. 4. Полевые характеристики МЭ-датчика:

(а) зависимость амплитуды 1-ой гармоники u_1 от постоянного поля H при различных полях накачки h , Ое; (б) зависимость амплитуды 1-ой гармоники u_1 от поля накачки h при различных постоянных полях H , Э.

На рис. 4б изображены зависимости амплитуды первой гармоники u_1 от поля накачки h для различных значений постоянного поля H . Как явствует из этого рисунка, для всех H в интервале 1–6 Э напряжение u_1 сначала линейно растет с увеличением h , затем достигает максимума при $h \approx 4-5$ Э, а далее начинает монотонно спадать. В области полей максимума первой гармоники u_1 амплитуда второй гармоники u_2 обращается в нуль. При дальнейшем увеличении накачки $h > 5$ Э амплитуда второй и всех высших гармоник, генерируемых структурой, резко растут. Отсюда можно заключить, что существует оптимальное поле накачки, при котором чувствительность датчика максимальна. Для описанного датчика с ФМ-слоями из Metglas оптимальная величина поля накачки составляла $h_{\text{opt}} \approx 4-5$ Э, а чувствительность при этом поле, как видно из рис. 4б, достигала максимума $S \approx 0.25$ В/Э. Отметим, что величина оптимального поля накачки оказалась в несколько раз меньше поля насыщения H_s ФМ-слоя.

Частотные характеристики магнитоэлектрического датчика

Частотные характеристики МЭ-датчика приведены на рис. 5. На рис. 5а изображены (в логарифмическом масштабе по осям) спектры частот напряжения на выходе, снятые при частоте поля накачки $f = 1$ кГц и различных условиях: кривая 1 (синяя) – частотная зависимость напряжения собственных шумов структуры при $h = 0$ и $H = 0$; кривая 2 (красная) – спектр частот напряжения при поле накачке $h = 5$ Э в отсутствие постоянного поля $H = 0$; кривая 3 (черная) – спектр частот напряжения при поле накачки $h = 5$ Э

в постоянном поле $H = 1$ Э. Все зависимости получали в естественных лабораторных условиях без дополнительной магнитной экранировки. При измерениях ось структуры ориентировали перпендикулярно горизонтальной составляющей поля Земли.

Частотная зависимость напряжения шумов $u_{ns}(f)$ является важной характеристикой МЭ-датчика, поскольку именно шумы определяют величину минимального измеряемого поля. Видно (кривая 1 на рис. 5а), что напряжение шумов $u_{ns}(f)$ монотонно падает с ростом частоты. На частоте 0.1 кГц оно составляет $u_{ns} \approx 330$ мкВ, что соответствует спектральной плотности напряжения шума $SPD = u_{ns} / \sqrt{\Delta f} \approx 60$ мкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, где Δf – ширина полосы. На частоте 1-ой гармоники $f = 1$ кГц $u_{ns} \approx 22$ мкВ ($SPD \sim 5$ мкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$) и уменьшается до $u_{ns} \approx 4.3$ мкВ ($SPD \sim 0.8$ мкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$) в области частот $f \approx 10$ кГц. Рост шумов при $f > 10$ кГц обусловлен наличием низкодобротного акустического резонанса структуры вблизи частоты ~ 22 кГц (не показан на графике). Оптимистическая оценка спектральной плотности магнитных шумов МЭ-датчика вблизи частоты 10 кГц с учетом его чувствительности дает величину $SPD/S \approx 3.2$ мкОе/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что сравнимо с лучшими данными для МЭ-датчиков переменных полей.

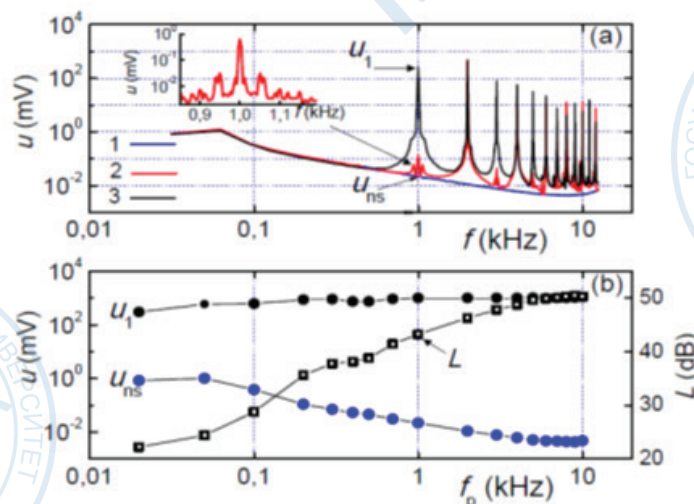


Рис. 5. Частотные характеристики МЭ-датчика:

- (а) спектры частот напряжения на выходе МЭ-датчика при частоте поля накачки $f = 1$ кГц и различных условиях: 1 – $h = 0$, $H = 0$; 2 – $h = 5$ Э, $H = 0$; 3 – $h = 5$ Э, $H = 4$ Э;
- (б) зависимость напряжения шума u_{ns} , амплитуды сигнала u_1 при $H = 4$ Э и динамического диапазона L от частоты накачки f_p .

При включении поля накачки h (кривая 2 на рис. 5а) в спектре появляются четные гармоники напряжения вблизи частот $2f$, $4f$ и т.д. В области низких частот $f < 1$ кГц и между четными гармониками шум остается примерно на прежнем уровне. Кроме того, появляются дополнительные пики вблизи частот нечетных гармоник f , $3f$ и т.д. На вставке рис. 5а в более крупном масштабе показана тонкая структура пика вблизи частоты первой гармоники f , измеренная с частотным разрешением $\Delta f = 3.9$ Гц. Видно, что пик имеет достаточно широкий «пьедестал» и четко выделенный сигнал на частоте первой гармоники 1 кГц с боковыми сателлитами, отстоящими на частоту ~ 50 Гц. Сигнал на частоте 1-ой гармоники и боковые сателлиты отражают присутствие неконтролируемого слабого постоянного поля и переменных полей с частотой 50 Гц, равной частоте промышленного тока.

При включении постоянного поля $H = 1$ Э (кривая 3 на рис. 5а) в спектре частот появляется основной сигнал на частоте 1-ой гармоники, амплитуда которого достигает $u_1 \approx 249$ мВ. Величина сигнала позволяет оценить чувствительность к постоянному магнитному полю $S \approx 0.25$ В/Э. Аналогичные измерения выполнены для различных частот накачки в диапазоне $f_p = 50$ Гц – 10 кГц при фиксированной амплитуде поля накачки $h \approx 5$ Э. На рис. 5b показаны зависимости напряжения шума u_{ns} и напряжения сигнала u_1 на частоте первой гармоники при максимальном значении измеряемого поля $H = 4$ Э от частоты накачки f_p . Видно, что с увеличением f_p напряжение u_{ns} магнитных шумов структуры монотонно падает. Напряжение полезного сигнала u_1 остается примерно постоянным при изменении частоты накачки и спадает только в области малых частот $f_p < 100$ Гц из-за конечной проводимости пьезоэлектрика.

Используя частотную зависимость напряжения шума $u_{ns}(f)$ в отсутствие поля накачки и зная чувствительность S , можно найти величину минимального детектируемого поля $H_{min} = u_{ns}/S$ и максимально достижимую ширину динамического диапазона $L = 10 \cdot \log(H_{max}/H_{min})$ при каждой частоте накачки. Как следует из рис. 5b, для описанного макета при возрастании f_p от 0.1 кГц до 10 кГц величина H_{min} монотонно уменьшается от $\sim 1.5 \cdot 10^{-3}$ до $\sim 1.7 \cdot 10^{-5}$ Э, а динамический диапазон расширяется от ~ 33 до ~ 53 дБ. Шумы датчика описанного типа требуют более детальных исследований.

Характеристики магнитоэлектрического датчика в слабых полях

Характеристики МЭ-датчика в области слабых полей представлены на рис. 6. На рис. 6а мы видим зависимость напряжения u_1 от постоянного поля при $H < 1.5$ Э для оптимальной частоты $f_p = 1$ кГц и амплитуды $h = 5$ Э поля накачки. Измерения проводили без магнитной экранировки. Для устранения влияния магнитного поля Земли при измерениях продольную ось структуры ориентировали перпендикулярно полю Земли. Видно, что зависимость практически линейна в области слабых полей, величина сигнала не меняется при инверсии направления поля H . В пределах точности измерений при увеличении и последующем уменьшении поля H гистерезис не наблюдался. Чувствительность при данной накачке, определенная из графика, составляла $S = (0.249 \pm 0.002)$ В/Ое. Величина минимального измеряемого поля, при котором сигнал с датчика уменьшался до уровня шума, составляла $H_{min} \approx 1$ мЭ.

Чувствительность структуры к ориентации постоянного магнитного поля на примере поля Земли отражена на рис. 6б. При измерениях структуру располагали в горизонтальной плоскости в магнитном поле Земли таким образом, что угол $\delta = 90^\circ$ соответствовал ориентации продольной оси структуры вдоль направления горизонтальной компоненты поля Земли $H_z = 200$ мЭ. При вращении датчика в поле Земли амплитуда первой гармоники u_1 падала от 49 мВ до уровня шума. Для сравнения: по правой вертикальной оси графика отложена рассчитанная величина проекции поля Земли на продольную ось структуры $H = H_z \cos(\delta)$. Измерения в спектральной области позволяют определить только величину проекции поля на продольную ось структуры, но не ее знак. Вместе с тем при использовании синхронного детектирования для выделения сигнала первой гармоники фаза напряжения меняется на π при ориентациях структуры $\delta = 0^\circ$ и 180° . Это позволяет однозначно определять направление поля.

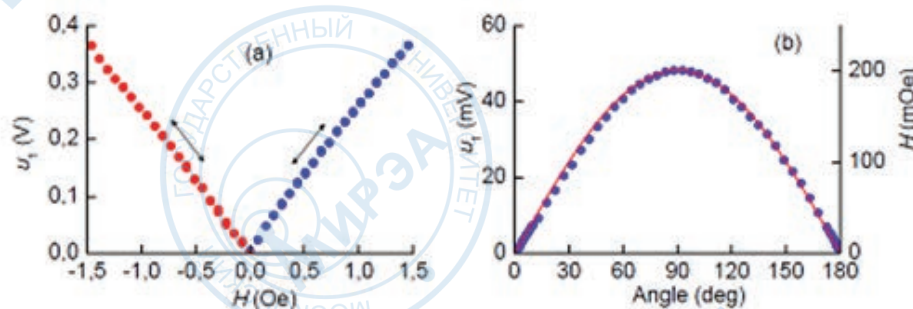


Рис. 6. Характеристики МЭ-датчика в области слабых полей при поле накачки $f_p = 1$ кГц и $h \approx 5$ Э: (а) зависимость сигнала МЭ-датчика от постоянного поля H ; (б) зависимость горизонтальной составляющей магнитного поля Земли от направления.

Структурная схема магнетометра

Проведенные исследования показали принципиальную возможность создания компактного магнетометра с батарейным питанием на основе МЭ-датчика постоянных полей. Для решения этой технической задачи нами разработаны электронные схемы обработки сигналов, которые реализуют практически те же функции, что и стандартные электроизмерительные приборы, но в гораздо более компактном виде. Предложенная структурная схема магнетометра приведена на рис. 7.

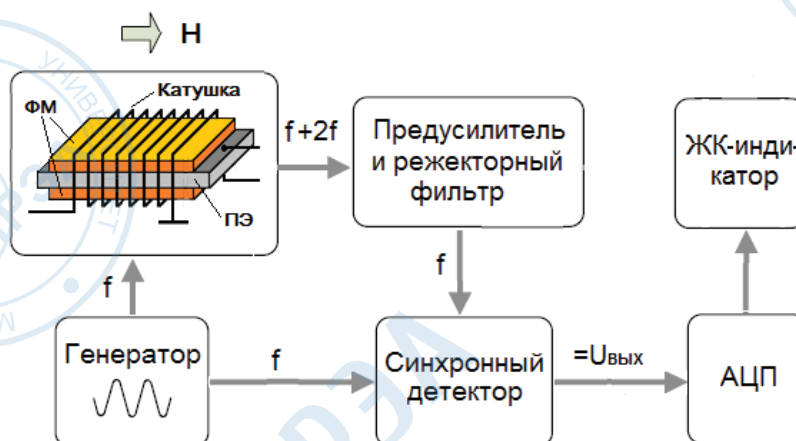


Рис. 7. Структурная схема магнетометра.

Схема содержит следующие основные блоки: МЭ-датчик поля, задающий генератор, предусилитель с режекторным фильтром, синхронный детектор, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и жидкокристаллический (ЖК) индикатор. Генератор синусоидальных колебаний предназначен для питания электромагнитной катушки, которая должна создавать магнитное поле накачки $h(f)$ с частотой $f = 1$ кГц и амплитудой до 4 Э. Генерируемое МЭ-датчиком напряжение поступает на предусилитель с симметричным высокоомным входом. Спектр выходного сигнала датчика содержит, как показано ранее (рис. 2), полезную первую гармонику с частотой 1 кГц и бесполезную вторую гармонику достаточно большой амплитуды. Чтобы вторая гармоника не перегружала усилительный

тракт, на входе предусилителя поставлен режекторный фильтр на частоту второй гармоники. Для выделения амплитуды сигнала 1-ой гармоники использован синхронный детектор. Постоянное напряжение с выхода синхронного детектора поступает на аналого-цифровой преобразователь и далее на ЖК-индикатор, служащий для отображения результата измерений. Ниже приведено краткое описание электронных схем основных блоков магнетометра.

Электронные схемы магнетометра

На рис. 8 приведена принципиальная схема задающего генератора, выполненного также на основе двух интегральных микросхем (ИМС) AD8642 и полностью дифференциального усилителя THS4521. ИМС AD8642 представляет собой прецизионный микропотребляющий сдвоенный операционный усилитель. Частота задающего генератора плавно регулируется около значения 1 кГц сдвоенным потенциометром 16 кОм. Для уменьшения нелинейных искажений берется небольшая часть выходного напряжения с одной половины ИМС и усиливается другой половиной до необходимой величины порядка 2 В. Выходной каскад на ИМС THS4521 с симметричным выходом работает непосредственно на электромагнитную катушку МЭ-датчика, обеспечивая в ней значительный ток до 35 мА. Сигнал с вывода 5 микросхемы подается также на Вх.3 компаратора синхронного детектора.

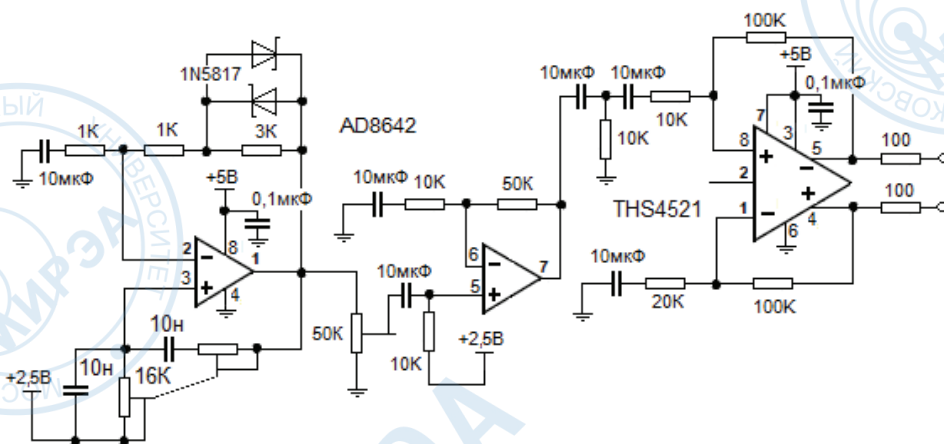


Рис. 8. Принципиальная схема задающего генератора.

На рис. 9 дана принципиальная схема предусилителя с режекторным фильтром. Предусилитель выполнен на двух ИМС AD620 и AD8642, которые способны работать с однополярным питанием. AD620 – это недорогой, обладающий высокой точностью инструментальный малошумящий усилитель, который требует одного внешнего резистора между выводами 1, 8 для задания коэффициента усиления. ИМС выпускается в 8-выводном корпусе SOIC, занимающем меньше места по сравнению с дискретными решениями, и имеет меньшее энергопотребление: потребляемый ток всего 1.3 мА, благодаря чему ИМС хорошо подходит для систем с питанием от батарей. Минимальный входной шум по напряжению 9 нВ/√Гц обеспечивается на рабочей частоте предусилителя 1 кГц. Для обеспечения работы с однополярным питанием постоянный уровень напряжения всех ИМС сдвигается на 2.5 В с помощью линейного стабилизатора ИМС LM4040. Коэф-

коэффициент усиления предусилителя устанавливается в соответствии с отношением сопротивления 50 кОм к сопротивлению внешнего резистора между выводами 1, 8 ИМС. В рассматриваемом случае $K_u = 3.5$.

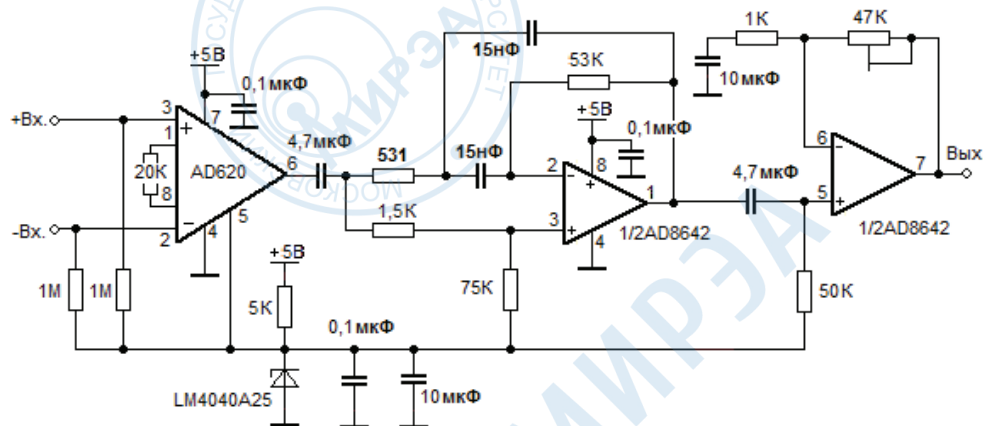


Рис. 9. Принципиальная схема предусилителя с режекторным фильтром.

Режекторный фильтр выполнен на основе сдвоенного операционного усилителя ИМС AD8642. При этом его настройка на вторую гармонику осуществляется не подгонкой резисторов, а плавной регулировкой частоты задающего генератора в небольшом диапазоне около рабочей частоты 1 кГц . Моделирование предусилителя в программной среде TINA-TI и последующие экспериментальные измерения показали, что режекция второй гармоники при указанной настройке составляет величину порядка -30 дБ . При этом практически не нарушаются фазовые соотношения для сигнала первой гармоники, что важно для последующей операции синхронного детектирования. Окончательная регулировка амплитуды выходного сигнала предусилителя осуществляется переменным резистором 47 кОм .

На рис. 10 изображена схема синхронного детектора, основу которого составляет ИМС AD630, представляющая собой балансный модулятор - демодулятор высокой точности. Данная ИМС содержит два усилительных канала: неинвертирующий (А) и инвертирующий (В). Каналы переключаются синхронно под действием сигнала накачки, подаваемого на компаратор по Вх. 3. Малое время установления компаратора позволяет минимизировать и не учитывать искажения, вызываемые переключением каналов на рабочей частоте датчика $f = 1\text{ кГц}$. Фактически ИМС AD630 производит двухполупериодное выпрямление синусоидального сигнала и тем самым выделяет информацию о его амплитуде. Однако при малых уровнях входных сигналов суммарная аддитивная погрешность ИМС, определяемая напряжением смещения $U_{\text{см}}$ и входными токами $I_{\text{вх}}$, приводит к потере чувствительности синхронного детектора. Для ИМС AD630 $U_{\text{см}} = 500\text{ мкВ}$ и $I_{\text{вх}} = 300\text{ нА}$. В наихудшем случае результирующая аддитивная ошибка двух каналов при внешних резисторах сопротивлением порядка нескольких кОм может составлять величину порядка $10\text{--}15\text{ мВ}$. Для повышения точности в схеме на рис. 10 использовали подачу детектируемого сигнала на входы усилительных каналов ИМС (1 и 16) через отдельные разделительные RC-цепи (по входам Вх.1 и Вх.2). При этом включение и точный подбор номиналов дополнительных внешних резисторов R_1^* и R_2^* , позволяет отдельно минимизировать

аддитивные погрешности усилительных каналов. Экспериментальным подбором этих резисторов удалось снизить напряжение ошибки обоих каналов до уровня ~ 1 мВ.

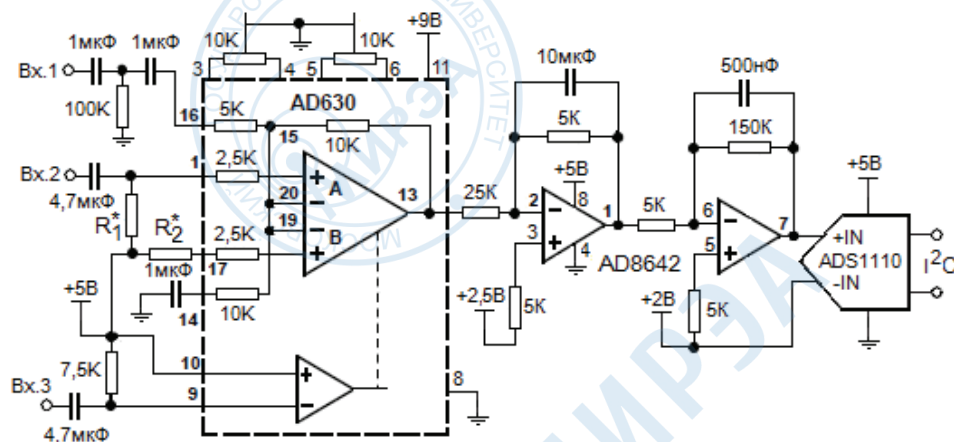


Рис. 10. Принципиальная схема синхронного детектора с АЦП.

Отметим, что схема синхронного детектора на рис. 10 работает с однополярным источником питания $+9$ В, а все опорные напряжения получены с помощью ИМС стабилизаторов от данного источника. Это необходимое условие при разработке переносной малогабаритной измерительной аппаратуры с батарейным питанием. На выходе AD630 включен активный фильтр нижних частот с частотой среза 1.5 Гц. ФНЧ также выполнен на ИМС AD8642. Первый ОУ этой ИМС использован для необходимого сдвига уровня постоянного напряжения от $+5$ В на выходе AD630 до $+2$ В на входе АЦП. При этом происходит потеря усиления на величину -15 дБ. Второй ОУ компенсирует потери в усилении и обеспечивает общее усиление ФНЧ в полосе пропускания $+15$ дБ. Выходной АЦП с дифференциальными входами позволяет устранить опорное напряжение $+2$ В и выделить знакопеременный полезный сигнал датчика.

В качестве АЦП использовали 16-ти-битный $\Sigma\Delta$ -преобразователь ИМС ADS1110 с внутренним опорным напряжением 2.048 В, интерфейсом I2C и ультранизким потреблением. Данный АЦП обеспечивает с необходимой точностью четыре значащих десятичных разряда результата измерений. Преобразование измеряемого напряжения в измеряемое магнитное поле осуществляется соответствующим изменением тока в электромагнитной катушке МЭ-датчика. Отметим также, что основными требованиями к используемому ЖК индикатору является низкое энергопотребление и наличие интерфейса I2C. Отметим, что все рассмотренные электронные схемы реализованы на двусторонних печатных платах, изготовленных заводским способом в ООО «Микролит».

Конструкция и характеристики магнетометра

Нами изготовлен макет МЭ-магнетометра, фотография которого приведена на рис. 11. Датчик вместе с предусилителем выполнен в виде выносного блока и подсоединен к измерительному блоку, где помещены описанные выше электронные схемы и источник питания, с помощью кабеля. Технические параметры магнетометра (см. таблицу) позволяют использовать его, например, для измерения локальных значений магнитного поля Земли или полей рассеяния слабых постоянных магнитов.



Технические параметры магнетометра

Диапазон измеряемых полей H :	0.1 - 200 мЭ
с делителем 1:10	1 - 2000 мЭ
Разрешение по полю ΔH :	0.1 мЭ
Индикация направления поля:	есть
Погрешность измерения: (от измеряемого поля)	1%
Питание:	от батареи 9 В
Потребляемый ток:	< 30 мА
Время непрерывной работы: с аккумулятором «Крона»:	40 час
Габариты прибора:	14 x 10 x 3 см ³
Размеры датчика:	2 x 1.2 x 8 см ³
Масса магнетометра/датчика:	150/25 г
USB выход на компьютер:	есть

Рис. 11. Макет магнетометра с МЭ-датчиком и его технические характеристики.

В заключение отметим основные сходства, отличия и преимущества описанного магнетометра на основе МЭ-датчика по сравнению с ФЗ-магнетометром [9, 10], принцип действия и конструкции которого наиболее близки к описанному устройству:

- чувствительным к магнитному полю элементом МЭ-датчика и ФЗ-датчика является ферромагнитный слой. Однако МЭ-датчик использует нелинейную зависимость магнитострикции ФМ-слоя от поля $\lambda(H)$, в то время как ФЗ-датчик использует нелинейную зависимость намагниченности ФМ-слоя от поля $M(H)$;

- в обоих датчиках для возбуждения ФМ-слоя используется катушка, создающая переменное магнитное поле накачки, однако в МЭ-датчике для регистрации сигнала используется ПЭ-слой, тогда как в ФЗ-датчике сигнал регистрируется с помощью объемной катушки. Конструкция МЭ-датчика проще и легче может быть реализована методами планарной технологии;

- регистрация полезного сигнала в обоих датчиках проводится в спектральной области: в МЭ-датчике на 1-ой или 3-ей гармониках сигнала накачки, а в ФЗ-датчике – на 2-ой гармонике сигнала накачки;

- величины минимального измеряемого поля для МЭ-датчика и ФЗ-датчика, использующих ФМ-слой из одного и того же материала, примерно одинаковы. Эта величина определяется собственными шумами ФМ-слоя при перемагничивании в переменном поле накачки и лежит в области полей $H_{\min} \sim 1$ мЭ. Требуются более детальные исследования шумовых характеристик МЭ-датчиков;

- верхняя граница диапазона рабочих полей МЭ-датчика и ФЗ-датчика также примерно одинакова: она определяется полем насыщения используемого ФМ-слоя и может составлять $H_m \sim 1 - 102$ Э. При использовании ФМ-материалов с большим H_s необходимо увеличивать и поле накачки h , что приведет к росту потребляемой мощности;

- чувствительности МЭ-датчика и ФЗ-датчика сравнимы по порядку величины, но чувствительность МЭ-датчика может быть существенно увеличена за счет использования акустического резонанса композитной структуры [18]. При совпадении частоты поля накачки с частотой изгибных или планарных колебаний структуры величина деформаций и амплитуда генерируемого ПЭ-слоем напряжения возрастают в добротность Q раз. Изготовив ПЭ-слой из монокристаллического материала с высокой акустической добротностью (лангитат, кварц, нитрид алюминия), можно увеличить чувствительность

МЭ датчика в $Q \sim 10^2\text{--}10^3$ раз вплоть до $S \sim 102$ В/Э. Такая возможность отсутствует в ФЗ-датчиках.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках госзадания на 2014-2016 гг.: проектная часть – проект № 3.76.2014/К, базовая часть – «Организация проведения научных исследований».

Литература:

1. Lenz J., Edelstein A.S. Magnetic sensors and their applications // IEEE Sensors J. 2006. V.6. P. 631–649.
2. Diaz-Michelena M. Small magnetic sensors for space applications // Sensors. 2009. V. 9. P. 2271–2288.
3. Tumanski S., Modern magnetic field sensors – a review // Przegląd Elektrotechniczny. 2013. V. R 89. P. 1–12.
4. Hall Effect Sensing and Application, In: Sensing and Control, Honeywell Inc., P. 1–100.
5. Tadigadapa S., Mateti K. Piezoelectric MEMS sensors: State-of-the-art and perspectives // Meas. Sci. Technol. 2009. V. 20. P. 092001.
6. Fetisov Y.K. Piezoelectric resonance sensors of DC magnetic fields // IEEE Sensors. 2014. V. 14. P. 1817–1821.
7. Freitas P.P., Ferreira R., Cardoso S., Cardoso F. Magnetoresistive sensors // J. Phys.: Con-dense. Matter. 2007. V. 19. P. 165221.
8. Mahdi A.E., Panina L., Mapps D. Some new horizons in magnetic sensing: High-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials // Sens. Actuators. 2003. V. A105 . P. 271–285.
9. Primdahl F. The fluxgate magnetometer // J. Pjys. E: Instr. 1979. V. 12. P. 241–253.
10. Ripka P. Advances in fluxgate sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 2003. V. 106. P. 8–14.
11. Tumanski S. Induction coil sensors – a review // Meas. Sci. Techn. 2007. V. 18. P. 31–46.
12. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspectives, status, and future directions // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 031101.
- 13 Scott J.F. Applications of magnetoelectrics // J. Materials Chemistry. 2012. V. 22. P. 4567.
- 14 Wang Y., Li J., Viehland D. Magnetoelectrics for magnetic sensors applications: Status, challenges and perspectives // Materials Today. 2014. V. 17. P. 269–275.
15. Vopson M., Fundamentals of Multiferroic Materials and Their Possible Applications // Crit. Rev. in Solid State and Materials Sci. 2014. P. 1–28. DOI: 10.1080/10408436.2014.992584.
16. Kamentsev K.E., Fetisov Y.K., Srinivasan. G. Ultra-low frequency magnetoelectric effect in a multilayer ferrite-piezoelectric structure // Technical Physics. 2007. V. 52. P. 727–733.
17. Kamentsev K.E., Fetisov Y.K., Srinivasan G. Low-frequency nonlinear magnetoelectric effects in a ferrite-piezoelectric multilayer // APL. 2006. V. 89. P. 142510.
18. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K., Stashkevich A.A. High-sensitivity dc field magnetometer using nonlinear resonance magnetoelectric effect // JMMM. 2016. V. 405. P. 244–248.
19. http://www.metglas.com/products/magnetic_materials.
20. <http://www.smart-material.com/MFC-product-main.html>