

УДК 53.043

МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ТВЁРДОТЕЛЬНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ И МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**А. Г. Итальянцев¹, Ю. В. Шульга¹, Н. О. Мамкина²,
Е. И. Каплунова²**

¹ Научно-Технологический Центр «АГИТАЛ»

² Тверской государственный университет,
лаборатория магнитоэлектроники, кафедра прикладной физики

Рассматриваются принципы создания первичных магниточувствительных преобразователей на основе пьезо- и магнитоактивных материалов, технология которых была бы в достаточной степени согласована с плёночной технологией, а чувствительность и другие характеристики преобразования сопоставимы с другими типами датчиков. Представлены базовые конструкции, теоретические оценки и экспериментальные данные о разработанных и изготовленных структурах для регистрации постоянных, квазистатических и переменных низкочастотных магнитных полей.

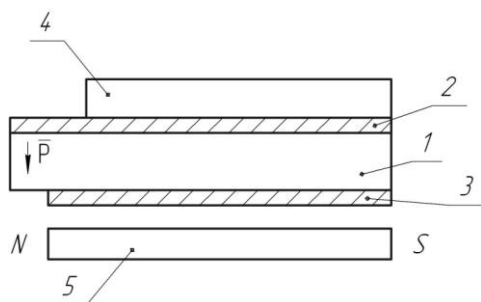
Ключевые слова: *магнитоэлектрические преобразователи, пьезо- и магнитоактивные материалы, квазистатические и низкочастотные магнитные поля, твердотельные гетероструктуры*

Введение. В рамках данной статьи рассматриваются гетероструктуры, в основе которых используются пьезо- и магнитоактивные материалы, как достаточно высокотемпературные и радиационно стойкие материалы в сравнении, например, с полупроводниками. В настоящее время существует достаточно много первичных преобразователей постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей, конструкция которых не предусматривает использование полупроводников. К таким преобразователям, например, относятся феррозондовые [1] и оптико-волоконные преобразователи [2], преобразователи на основе гальваномагнитных и квантовых резонансных эффектов [3, 4]. Однако, их конструкция, не настолько миниатюрна, чтобы они могли быть помещены в стандартные корпуса изделий микроэлектроники и использованы при штатном монтаже печатных плат. Для многих же коммерческих применений этот фактор является весьма существенным. Наиболее распространенные кремниевые магниточувствительные приборы в виде датчиков Холла и магнитотранзисторов [5–9], относятся к изделиям микроэлектроники, но

верхний предел температурного диапазона их эксплуатации ограничен 135 °С.

Известны преобразователи, принцип работы которых основан на комбинации прямого пьезоэлектрического и магнитострикционного эффектов, а также пьезоэлектрического эффекта и силы Лоренца [10–12]. Такие преобразователи могут быть выполнены в виде монокристаллических структур или в виде МЭМС из материалов, точка Кюри которых превышает 400 °С, а верхний предел рабочих температур составляет не менее 230 °С. Кроме того, при использовании пленочной технологии их конструкция может быть миниатюризирована и помещена в стандартные корпуса микросхем. Для применения именно в таких типах преобразователей могут быть использованы слоистые гетероструктуры на основе цирконат-титанат свинца пьезоэлектрической керамики, формируемые с использованием пленочной технологии. В работе представлены варианты конструкций преобразователей магнитных полей на базе гетероструктур, состоящих из слоев пьезоэлектрических, магнитострикционных и металлических материалов. Обсуждается базовая технология формирования таких гетероструктур, проблематика их получения, а также условия, при которых может быть повышена чувствительность преобразователей к магнитному полю.

Можно представить несколько вариантов твердотельных слоистых гетероструктур, изготовленных с использованием пьезокерамических и магнитоактивных материалов, на основе которых можно построить первичный преобразователь датчика постоянного или медленно изменяющегося магнитного поля. Характерная конструкция магниточувствительных структур на основе чередующихся слоев пьезоэлектрического и магнитострикционного материала представлена на рис. 1.



Р и с . 1. Схема многослойной магниточувствительной структуры с магнитострикционными, токопроводящими, пьезоэлектрическими и ферромагнитными слоями. 1 – пьезокерамический преобразователь, 2, 3 – электроды, 4 – магнитострикционный элемент, 5 – постоянный магнит

В качестве пьезокерамического преобразователя может быть использована гомогенная подложка пьезокерамики 1 с нанесенными и вожжёнными электродами 2 и 3. К верхней поверхности электрода 2 жестко присоединен слой магнитострикционного материала 4. Со стороны электрода 3 расположен постоянный магнит 5. Электрод 3 покрывает не всю поверхность пьезокерамической подложки. Это позволяет избежать короткого замыкания между электродами 2 и 3, особенно если в качестве подложки используется достаточно тонкая (< 500 мкм) пьезокерамическая подложка. Пьезокерамическая подложка поляризована по толщине, как показано на рис. 1. Магнитострикционный элемент 4 находится в магнитном поле постоянного магнита 5, направленном по длине элемента 4. Величина этого поля выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальный коэффициент линейной магнитострикции элемента 4.

Возможны два технологических подхода для изготовления такой конструкции. В первом случае, пьезокерамическую подложку 1 и магнитостриктор 4 соединяют путем высокотемпературного спекания. Во втором случае, эти слои соединены путем склейки. В первом варианте в качестве магнитостриктора может быть использована пленка феррита. В этом случае ферритовый слой изготавливают методами пленочной пьезокерамической технологии на основе мелкодисперсного порошка. Температура спекания феррита составляет порядка 1300 °С. В связи с этим в качестве материала подложки должна быть выбрана пьезокерамика с подходящей, достаточно высокой, температурой спекания, а для материала электрода 2 высокотемпературный серебро-палладиевый сплав с высоким содержанием палладия. Таким образом, структура из слоев 1, 2, 4 может быть сформирована в едином технологическом цикле изготовления многослойных гетероструктур с достаточно сложной топологией электродов. Второй электрод 3 может быть нанесен после высокотемпературного обжига структуры и поэтому может быть выполнен из серебра без добавления дорогостоящего палладия. Постоянный магнит не обязан быть жестко соединен с основной структурой. Его назначение – поместить магнитостриктор 4 в постоянное магнитное поле H_0 , при котором его коэффициент линейной магнитострикции $\lambda = \Delta l/l$ принимает максимальное значение λ_S . Для каждого вида магнитострикционного материала величина H_0 своя.

Среди ферритов наибольшее значение $\lambda_S \sim (2-25) \cdot 10^{-4}$ достигается у CoFe_2O_4 . В качестве магнитостриктора могут быть использованы также пленки Ni с $\lambda_S = 3,7 \cdot 10^{-5}$, а также никелевые сплавы. Величина напряженности подмагничивающего поля при этом составляет

$H_0 = 1500$ А/м, а соответствующая магнитная индукция $1,88 \cdot 10^{-3}$ Тл. Наиболее распространенные керамические ферриты на основе никеля и кобальта обладают λ_S , соизмеримыми с пленками Ni и его сплавами, и составляют величину $\lambda_S = 2,8 \cdot 10^{-5}$. Для достижения таких значений линейного сжатия требуется уровень подмагничивания $1,5 \cdot 10^{-3}$ Тл. Однако, эти ферриты существенно менее технологичны с точки зрения формирования магниточувствительных структур, выполненных по типу структуры на рис. 1. Несомненным достоинством ферритов является их высокое удельное сопротивление (порядка 10 МОм·см) и следовательно малые ВЧ потери на вихревых токах Фуко, если речь идет о регистрации достаточно высокочастотных полей. Однако, для медленно меняющихся магнитных полей такие потери незначительны, и ферриты не должны иметь преимущества перед металлическими магнитоотрикателями. Для всех представленных примеров магнитоотрикателей, в области слабых магнитных полей, представляющих интерес при обсуждении датчиков магнитного поля, $\lambda_S < 0$. Это означает, что при появлении внешнего, т.е. измеряемого магнитного поля, вдоль направления магнитной индукции линейный размер магнитоотрикателя 4 на рис. 1 будет уменьшаться. Поскольку в области слабых магнитных полей речь идет о магнитоотрикации, обусловленной магнитными, а не электрическими обменными взаимодействиями, объем магнитоотрикателя должен оставаться неизменным. Это означает, что толщина магнитоотрикателя 4 при появлении внешнего магнитного поля H , совпадающего по направлению с приборным встроенным полем H_0 , будет увеличиваться (рис. 2). При встречном направлении измеряемого поля H , при $H < H_0$, стрикционный элемент будет увеличивать свои планарные размеры.

Принцип работы такой магниточувствительной системы следующий. При появлении внешнего переменного магнитного поля $H(t) = H_0 \cos(\omega t)$ магнитоотрикателем меняются свои линейные размеры с частотой ω . Поскольку магнитоотрикателем жестко связан с пьезоэлектрической пластиной, в ней возникают продольные механические напряжения $\sigma(t)$ той же частоты ω . В результате на поверхности пьезоэлектрической пластины 1 в процессе прямого пьезоэлектрического эффекта возникает переменный электрический заряд с плотностью D :

$$D = d_{31} \sigma \quad (1)$$

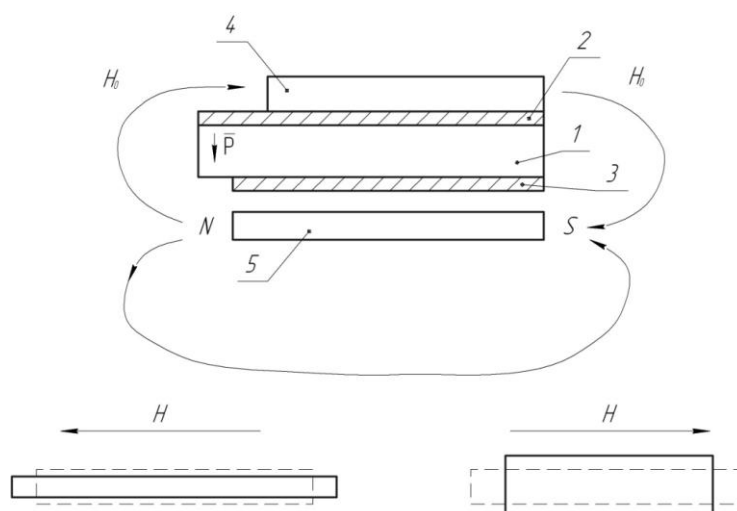


Рис. 2. Иллюстрация изменения линейных размеров магнестриктора 4 в составе магниточувствительной многослойной структуры со встроенным приборным полем подмагничивания H_0 при появлении внешнего измеряемого поля H . Пунктиром отмечены габариты магнестриктора при $H = 0$

Если частота внешнего магнитного поля H совпадет с механической резонансной частотой четырехслойной структуры ω_p , то деформация пьезокерамической пластины увеличится в R раз, где R – добротность электромагнитного преобразователя, с учетом всех его элементов, включая крепежные конструкции. Тогда выражение (1) примет вид

$$D_p = R d_{31} \sigma \quad (2)$$

Электрическая емкость плоского пьезокерамического преобразователя, как известно, $C = (1/h) \epsilon \epsilon_0 S$, а электрическое напряжение U на его электродах с учетом (2)

$$U = Q/C = R d_{31} \sigma h / \epsilon \epsilon_0 \quad (3)$$

Следует иметь в виду, что механические напряжения сжатия и растяжения в пьезокерамическом слое σ определяются соотношением толщин и жесткости пьезокерамического и магнестрикционного слоя, а также коэффициентом линейной магнестрикции λ_s . С учетом зависимости σ от этих параметров численная оценка выходного сигнала U для рассчитываемой структуры при толщинах пленочных чувствительных элементов порядка 500 мкм, при типовых параметрах

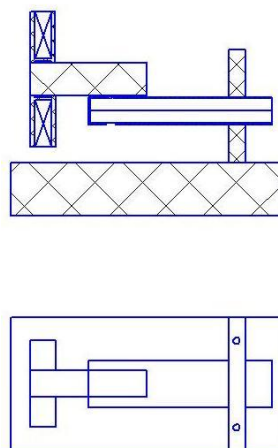
цирконат-титанат свинца керамики и для никелиевого магнитостриктора, при $B = 0,001$ Тл вдали от резонанса ($R = 1$) дает величину U порядка 15 мВ. Тогда ожидаемая крутизна преобразования в широкой полосе частот составит 15 В/Тл, что в несколько раз выше крутизны преобразования холловских структур.

Известны несколько конструкций датчиков постоянного магнитного поля, принцип действия которых основан на использовании силового воздействия контролируемого внешнего магнитного поля на элементы преобразователя датчика с переменным током [13–16]. Первичный преобразователь таких датчиков построен на основе пьезоэлектрических преобразователей той или иной конструкции. В результате взаимодействия внешнего поля с индукцией \mathbf{B} и жестко связанного с пьезоэлектрическим преобразователем источника переменного поля, порождаемого переменным током $\tilde{I} = I_0 \cos(2\pi ft)$, возникает переменное силовое воздействие на пьезоэлектрик в виде сил F или механических моментов M . Благодаря деформации пьезоэлектрического преобразователя, на его внешних электродах возникает переменное электрическое напряжение \hat{U} с частотой f . Как показано в [16], выходное напряжение в таких датчиках определяется несколькими сомножителями. Первый из них определяется материаловедческим фактором пьезоэлектрического элемента $d_{31}/\epsilon\epsilon_0$. Второй – геометрией биморфной структуры, третий и четвертый – связаны с силовым воздействием элемента с переменным током в магнитном поле на пьезоэлектрический преобразователь и геометрией силовой связи между ними.

На рис. 3 представлена одна из возможных схем построения магниточувствительного преобразователя, действующего на рассматриваемом принципе. В этой конструкции в качестве токопровода с переменным током использован многовитковый контур из тонкой металлической проволоки. Первичный преобразователь датчика состоит из биморфного пьезокерамического элемента (биморфа) и жестко связанной с ним катушки индуктивности с ферритовым сердечником. Плоскость многовиткового контура в конструкции, рассматриваемой в данном отчете, располагается перпендикулярно плоскости биморфной пластины (рис. 3).

Биморф, как известно, представляет собой гетерогенную структуру в виде двух пьезокерамических пластин (слоев) и трех электродов, один из которых расположен между пьезокерамическими слоями, а два других находятся на внешних поверхностях структуры. На поверхности биморфа жестко закреплен ферритовый элемент, шириной равной ширине биморфа, и выходящий с одной стороны за пределы

длины биморфной пластины. Вся гетероструктура закреплена в виде консоли в держателе. Длина свободного конца биморфа равна L , ширина h , а общая толщина t . Материал держателя выбирается таким образом, чтобы наилучшим образом обеспечить отражение поперечной волны при колебаниях биморфа.



Р и с . 3. Схема первичного преобразователя постоянного магнитного поля в электрический сигнал на основе шестислойной гетероструктуры, включающей электропроводящие, пьезоэлектрические и ферритовый слои

Выступающий за пределы биморфа ферритовый элемент служит держателем и сердечником для многовиткового токопровода, расположенного в плоскости, перпендикулярной плоскости биморфа.

Принцип действия преобразователя следующий. Через токопровод в виде многовиткового контура с числом витков N с помощью генератора тока пропускают переменный ток I . При появлении измеряемого внешнего постоянного магнитного поля с магнитной индукцией B в плоскости контура (рис. 4), на каждый виток с током, в соответствии с законом Ампера действует вращательный момент $M_1 = IBs$, где s – площадь единичного витка и суммарный момент $M = M_1N$.

Поскольку через контур пропускается переменный ток, то момент M за период дважды изменяет направление и под действием момента M биморфный преобразователь длиной L испытывает гармонические механические колебания с частотой переменного тока, преобразуя их, в соответствии с прямым пьезоэлектрическим эффектом, в выходной электрический сигнал в виде напряжения $U_{\text{вых}}$.

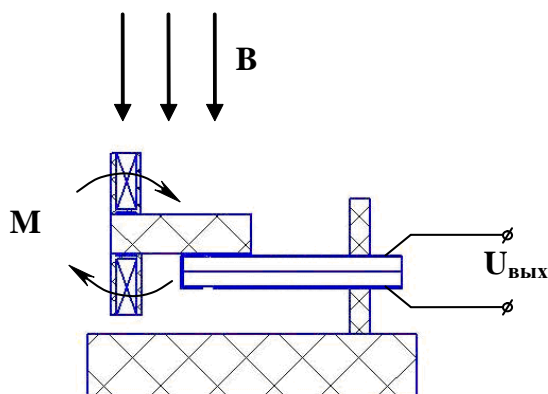


Рис. 4. Иллюстрация к принципу работы многослойной гетероструктуры в составе преобразователя постоянного магнитного поля в электрический сигнал

В квазистатическом приближении величина выходного электрического напряжения в такой структуре определяется выражением [16]

$$U = \frac{1}{4L} \frac{d_{31}}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{h^2}{J_z} \int_0^L M(x) dx, \quad (4)$$

где $M(x)$ – момент в сечении биморфной структуры с координатой x , $J_z = bh^3/12$ – момент прямоугольного сечения биморфа шириной b и толщиной h . В данной конструкции момент силового воздействия $M(x) = M = const$. Величина этого момента определяется площадью контура $S = Ns$, где N – число витков, s – площадь единичного витка, амплитудой переменного тока в контуре I , магнитной проницаемостью пространства контура μ_1 , добротностью системы R и магнитной индукцией измеряемого поля B . Таким образом,

$$M = INs\mu_1RB \quad (5)$$

Подставляя (5) и выражение для J_z в (4), окончательно имеем выходное информационное напряжение датчика

$$U = 3 \frac{d_{31}}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{1}{bh} INs\mu_1RB \quad (6)$$

Выражение для чувствительности рассматриваемого первичного преобразователя на резонансной частоте составляет $k = U/\mu_0 H$.

Полагая $d_{31} = 180 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, $I = 0.3$ А, $S = sN = 10 \cdot 10^{-6}$ м²
100 витков = 10^{-3} м², $\varepsilon = 1800$, $b = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 300 \cdot 10^{-6}$ м, исходя из (6)
получим (в единицах В/Тл)

$$k = 6,8 \mu_1 R \quad (7)$$

В реальной ситуации для представленной на рис. 4 конструкции $\mu_1 = 2 \dots 3$, $R = 10 \dots 20$ и тогда ожидаемая абсолютная крутизна преобразования k порядка 200 В/Тл, а относительная чувствительность, нормированная на потребляемый ток преобразователя $k_{\text{отн}} \approx 600$ В/Тл·А, что многократно превосходит миниатюризированные конструкции.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Список литературы

1. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хореев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Средства измерений параметров магнитного поля. М.: Энергия, 1979. 320 С.
2. Roumenin C.S. Solid State Magnetic Sensors // Handbook of Sensors and Actuators. Netherlands. 1999. V. 2. 340 P.
3. Czichos H., Saito T., Smith L. Springer Handbook of Materials Measurement Methods // Springer Science. 2006. 356 P.
4. Norton H.A. Sensor and Analyzer Handbook. London: Prentice Hall, 1982.
5. Popovic R.S. Hall effect Devices // Bristol: Adam Hilger, 1991. 220 P.
6. Патент РФ № 2337371. Способ регистрации магнитной индукции и магнитного поля / Итальянцев А.Г. 10.11.2006.
7. Крыканов И.М., Коплик А.Б., Фетисов Ю.К., Чашин Д.В. Датчик постоянного магнитного поля на основе пьезоэлектрического кольца // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, вып.18. С. 19–25.
8. Фетисов Ю.К., Чашин Д.В., Лебедев С.В., Сегала А.Г., Итальянцев А.Г., Горнев Е.С. Пьезоэлектрический датчик магнитного поля на основе планарной биморфной структуры // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 4. С. 45–48.
9. ISI Web of Science <http://www.webofknowledge.com>.
10. Newnham R.E., Skinner D.P and Cross L.E. Connectivity and Piezoelectric-Pyroelectric Composites // Mat. Res. Bull. 1978. V. 13. P. 525–536.
11. Pan E., Wang R. Effects of geometric size and mechanical boundary conditions on magnetoelectric coupling in multiferroic composites // J. Phys. D. Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 245503.
12. Итальянцев А.Г., Шульга Ю.В., Фетисов Ю.А., Чашин Д.В. Датчик постоянного магнитного поля на основе пьезоэлектрического преобразователя и многовиткового контура с током // Микро- и наносистемная техника. 2012 (в печати).

MAGNETOSENSITIVE SOLID STATE HETEROSTRUCTURES ON THE BASIS OF PIEZOCERAMIC AND MAGNETOSTRICTIVE ELEMENTS

A. G. Italyantsev¹, Yu. V. Shulga¹, N. O. Mamkina², E. I. Kaplunova²

¹ Scientific Technological Centre «AGITAL»

² Tver State University

Laboratory of Magnetolectronics, Chair of Applied Physics

Construction principles of primary magnetosensitive transducers on the basis of piezo- and magnetically active materials compatible with the thin-film technology while preserving the sensitivity and other transformation parameters comparative with other types of sensors are considered. The underlying constructions, theoretical predictions and experimental data of the developed and prepared structures for the registration of constant, quasistatic and low frequency magnetic fields are presented.

Keywords: *magnetolectronic transducers, piezo- and magnetically active materials, solid state heterostructure, quasistatic and low frequency magnetic fields*

Об авторах:

ИТАЛЬЯНЦЕВ Александр Георгиевич – доктор физико-математических наук, профессор, начальник отдела функциональной электроники НИИМЭ (Научно-исследовательский институт молекулярной электроники), 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр.1; *e-mail*: yshulga@sitronics.com;

ШУЛЬГА Юлия Викторовна – главный специалист ОФЭ (отдел функциональной электроники) НИИМЭ;

МАМКИНА Наталья Олеговна – аспирантка кафедры прикладной физики ТвГУ, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33;

КАПЛУНОВА Елена Ивановна – студентка кафедры прикладной физики ТвГУ.