

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ

### A HIGH-SENSITIVITY MAGNETORESISTIVE MICROELECTRONIC SENSORS

Санкт-Петербург, St.-Petersburg  
Научно-исследовательский институт электроизмерительных приборов  
Research institute of electrical measuring instruments

Design-technological and circuit engineering methods for increasing the magnetic sensitivity and accuracy of thin-film magnetoresistive sensors of physical quantities are considered. It is shown that the use of a longitudinal magnetoresistive effect allows us to increase, approximately by an order of magnitude, a magnetic sensitivity of single-layer magnetoresistive elements and to make it comparable with the sensitivity of a more complex multi-layer sensor based on a gigantic magnetoresistive effect. The use of modulation mode of cyclic magnetization of the thin-film sensor by pulses with linearly rising edges and conversion of the quantity measured to a proportional time interval permits us to ensure the increase of accuracy and sensitivity of the magnetoresistive converter more than by an order of magnitude.

Микроэлектронные тонкопленочные магниторезистивные датчики (МРД) получают в мировой практике приборостроения все более широкое распространение при измерении магнитных, электрических, механических и других физических величин, в современных средствах записи и воспроизведения информации, неразрушающем контроле материалов и изделий, системах автоматизации, сигнализации, робототехнических комплексах и других применениях[1,2,3]. Этому способствует присущее МРД сочетание преимуществ микроминиатюризации при более высокой чувствительности по сравнению с другими микроэлектронными магниточувствительными преобразователями такими как преобразователи Холла, магнитодиоды, магнитотранзисторы и т.п.

Материалом для тонкопленочных магниторезистивных элементов служат обычно высокопроницаемые поликристаллические ферромагнетики типа пермаллоев. Удельное электрическое сопротивление таких материалов обладает свойством анизотропии в магнитном поле и зависит от угла  $\phi$  между вектором намагниченности  $M$  и вектором тока через тонкопленочный элемент. Эта, в общем случае нелинейная зависимость, имеет вид:

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \cos^2 \phi,$$

где  $\rho_0$  - изотропная составляющая удельного электрического сопротивления;  $\Delta\rho$  - анизотропия магнетосопротивления.

Для увеличения сопротивления и вольтовой чувствительности магниторезистивные элементы обычно выполняются в виде планарных резисторов, имеющих форму меандра. Объединение резисторов в мостовую схему позволяет обеспечивать температурную стабильность и работоспособность магниторезистивных датчиков в достаточно широком диапазоне температур – 60...+150°C. При относительно высокой чувствительности и малых размерах магниторезистивных элементов их применение наиболее удобно для построения датчиков как магнитных, электрических, так и механических величин, таких как угловые и линейные перемещения, скорость, число оборотов, позиционирование и т.п.

В качестве примера ниже приведены технические параметры разработанного в НИИЭП порогового МРД типа МИД-22, в котором тонкопленочная мостовая магниточувствительная схема, напыленная на ситалловую подложку с размерами 2x2 мм<sup>2</sup>, объединена в активную микросборку с бескорпусным электронным компаратором типа 521СА3-4.

Основные технические характеристики МРД типа МИД-22.

Напряжение питания, В	от +5 до +12
Магнитная индукция срабатывания, мТл	1,0
Магнитный гистерезис, мТл	0,2
Выходной сигнал	стандартные логические уровни ТТЛ
Габаритные размеры, мм	11x7x3,5

Изготовление МРД подобного типа основано на применении относительно простой технологии напыления тонких однослойных пленок. Малые поперечные размеры магниторезистивных элементов позволяют устанавливать их в непосредственной близости от

поверхности магнитных носителей информации а также вблизи миниатюрных проводников для бесконтактного измерения токов при диагностировании микроэлектронного оборудования[4] и в ряде других применений, где необходима высокая линейная разрешающая способность датчиков.

Определенный бум в разработке и реализации МРД в последние годы связан с открытием гигантского магниторезистивного эффекта (ГМР)[1,2], который базируется на применении достаточно сложной микроэлектронной технологии тонких многослойных пленок, в которых относительное изменение сопротивления под действием магнитного поля может достигать десятков процентов. Тем не менее значительный интерес прежде всего для отечественной промышленности представляет совершенствование МРД на анизотропных одно- и двухслойных пленках, требующих относительно более простых и дешевых оборудования и технологии изготовления. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтверждают перспективность этого направления развития МРД.

Для увеличения чувствительности и расширения диапазона измерения в сторону слабых магнитных полей было предложено применение так называемого “продольного” магниторезистивного эффекта в тонких магнитоодноосных пленках [5]. В таких МРД направление вектора измеряемого магнитного поля ориентируется параллельно длинной стороне пленочного элемента и линии тока в нем, а ось легкого намагничивания (ОЛН) в технологическом процессе напыления пленки ориентируется перпендикулярно продольной оси элемента и линии тока  $I$ , как показано на рис.1.

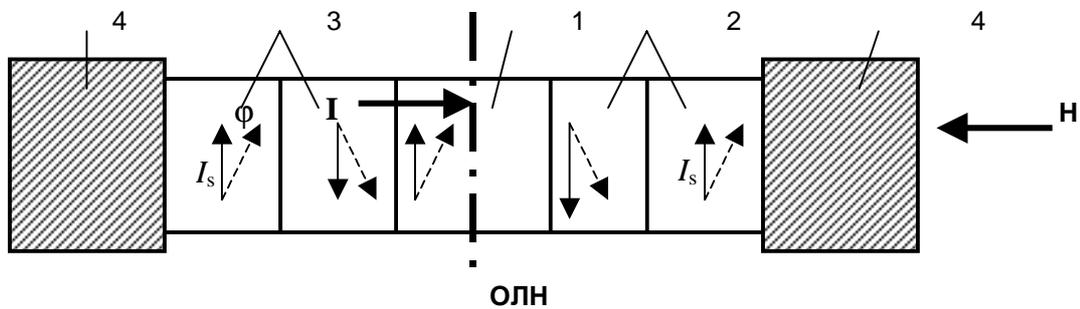


Рис. 1 Магниторезистивный элемент - Magnetoresistive element

При действии магнитного поля  $H$  векторы намагниченности  $I_s$  в доменах 1,2,3 поворачиваются на некоторый угол  $\varphi$ , что приводит к изменению сопротивления электрическому току  $I$  между контактными площадками 4 благодаря эффекту анизотропии магнетосопротивления пленки. Таким способом при более высокой магнитной проницаемости пленочного элемента в продольном направлении удастся примерно на порядок повысить магнитную чувствительность и снизить поле насыщения до 3- 5 Э.

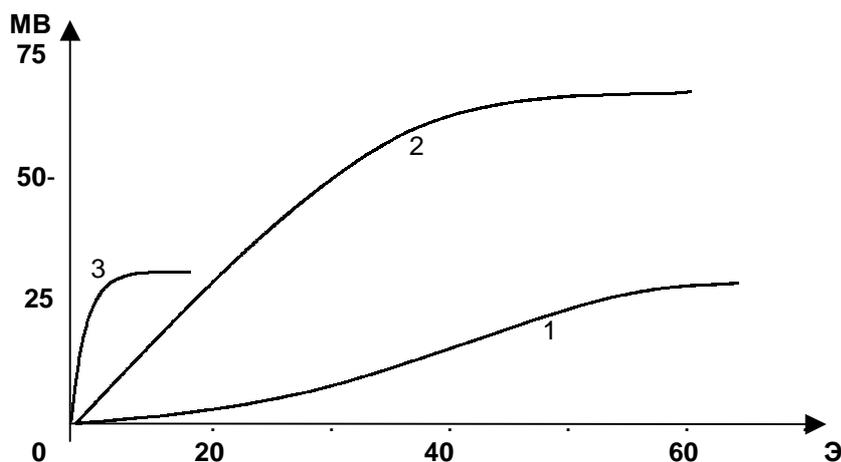


Рис.2 Характеристики МРД - Characteristics of the MRS

Это подтверждают приведенные на рис.2 экспериментальные зависимости выходного сигнала однослойного МРД на основе традиционного поперечного магниторезистивного эффекта (кривая1), МРД на основе “продольного” эффекта при аналогичных размерах (кривая3) и многослойного МРД, реализующего эффект ГМР, (кривая2).

Однако повышение чувствительности датчиков при работе в слабых магнитных полях усиливается неблагоприятное воздействие гистерезисных явлений, которые возрастают с уменьшением толщины пленки. Поэтому в тех применениях МРД на основе продольного эффекта, где требования к нежелательному влиянию гистерезиса жесткие, необходимо увеличивать толщину пленки свыше 0,2-0,5 мкм для снижения коэрцитивной силы до значений порядка 0,2-0,3Э.

Проведенные исследования показывают, что эффективное снижение коэрцитивной силы более тонких пленок до значений порядка 0,1 Э может быть достигнуто при использовании в МРД элементов с двумя ферромагнитными слоями, разделенными тонкой немагнитной прослойкой для исключения обменного взаимодействия эти слоев. При этом все преимущества продольного магниторезистивного эффекта полностью сохраняются.

Для исключения неоднозначности в определении магнитного поля из-за влияния гистерезиса в многослойных МРД на основе ГМР используются специальные планарные катушки для подачи импульсов размагничивающего тока перед каждым измерением [ 2]. Это однако ведет к усложнению МРД, увеличению его габаритов и энергопотребления, а в ряде случаев этот режим недопустим по условиям применения.

В МРД на основе продольного эффекта с низким значением поля насыщения для исключения влияния гистерезиса с одновременным увеличением чувствительности и линейности предложен модуляционный режим циклического перемагничивания пленки импульсами с линейно нарастающими фронтами [6], как показано на временной диаграмме рис.3.

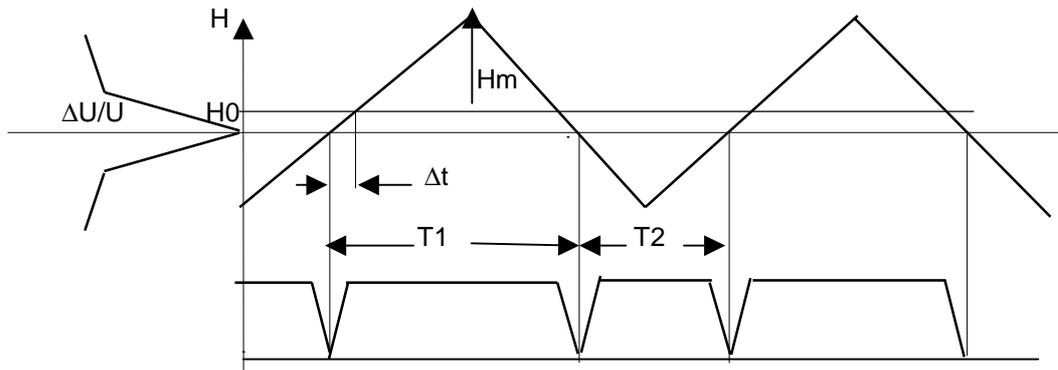


Рис.3 Временная диаграмма МРД - Time diagram MRS

В качестве информационных параметров выходного сигнала МРД в данном режиме может использоваться временной сдвиг  $\Delta t$  или разность длительностей полуциклов  $T_1 - T_2$ , пропорциональных измеряемому полю  $H_0$ :

$$T^1 - T^2 = 4\Delta T = H^0 T / H_m$$

При циклическом перемагничивании пленки по предельной петле гистерезиса обеспечивается однозначность повторения временных соотношений выходного сигнала, которые при неизменной коэрцитивной силе, стабильной амплитуде  $H_m$  и периоде  $T$  частоты треугольных импульсов становятся зависимыми только от действующего на МРД измеряемого поля  $H_0$ . Погрешность нелинейности коэффициента преобразования МРД при этом определяется только линейностью фронтов модулирующего поля и может быть обеспечена порядка 0,1 % и менее.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dieny B. Giant magnetoresistance in spin-valve multilayers //J. Magn. Materials.1994. v.136.
2. Васильева Н.П., Касаткин С.И., Муравьев А.М. Тонкопленочные магниторезистивные датчики магнитного поля и области их применения //Датчики и системы.1999. N1. с.29-36.
3. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника.- М.: ДМК, 2001.
4. Яковлев Н.И. Бесконтактные электроизмерительные приборы для диагностирования электронной аппаратуры.- Л.: Энергоатомиздат, 1990.
5. А.с. 1708067 Магниторезистивный преобразователь // Изобретения.1991.N 35.
6. А.с.1774296 Устройство для измерения магнитного поля // Изобретения 1992 N 41.