

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А. В. Негин, В. К. Гусев

ФГУП «ФНПЦ НИИС» им. Ю. Е. Седакова»

Магнитные элементы, благодаря таким своим свойствам и достоинствам, как широкий температурный диапазон, радиационная стойкость, возможность использования планарной интегральной технологии, совместимой с полупроводниковой технологией, занимают все больший объем в составе компонентов микроэлектроники. Их исследованием и разработкой занимаются ведущие научные центры и фирмы, среди которых IBM Corp., Motorola, Nonvolatile, Electronics, Hewlett-Packard, Digital Equipment Corp., Seagate Technology Jucorp., Honeywell, Nat. Just. Standarts and Techn, Center for Mater. for Inf. Techn, Massachusetts Just. of Techn (США); Shicon Engineering, Sony Corp., Fujitsu Ltd., Hitachi Ltd (Япония); Philips (Голландия) и др. [1].

Настоящая работа посвящена разработке топологии и технологии изготовления анизотропных магниторезистивных преобразователей (АМРП) двух вариантов на основе железоникелькобальтового сплава (Fe-Ni-Co сплава). Первый вариант АМРП разрабатывается для применения в магнитометрических системах компасного приложения, работающих в диапазоне магнитных полей ± 200 мкТл. Второй вариант разрабатывается для датчика положения ротора электродвигателя (ДПР) с порогом срабатывания ~ 20 мТл.

АМРП, применяемый для компасного приложения, представляет собой сложную многослойную структуру. Он состоит из трех функциональных и четырех изоляционных слоев, что накладывает определенные требования к технологии его изготовления как в части достижения необходимых параметров элементов функциональных слоев, так и в их совместимости с изоляционными слоями. Функциональными слоями АМРП компасного приложения являются магниторезистивный мост Уинстона, содержащий магниторезистивные полоски – магниторезистивные чувствительные элементы (МРЧЭ), и две плечные катушки индуктивности, выполняющие функции компенсации смещения моста и выведения его в состояние с наибольшей чувствительностью [2].

АМРП для ДПР является первичным преобразователем абсолютного датчика угла поворота. Надо отметить, что аналогов разрабатываемому АМРП ДПР в литературе и на различных сайтах в Internet не найдено, а поэтому разработка АМРП ДПР является оригинальной. Одним из преимуществ данного типа АМРП ДПР является получение разнополюсного выходного сигнала от кодирующего диска для уве-

личения помехозащищенности всего датчика в целом. Кроме того, защита от помех, создаваемых при работе электродвигателя, осуществляется работой АМРП в пороговом режиме, при этом срабатывание МРЧЭ происходит в полях более 20 мТл, что обеспечивает большой выходной сигнал для схемы обработки сигнала (считывающего устройства) и четкое срабатывание от кодирующих ячеек магнитного диска.

Конструкторско-технологические особенности вышеперечисленных вариантов АМРП связаны с влиянием размагничивающего фактора, обусловленного размерным эффектом в тонких пленках, на чувствительность МРЧЭ.

Для АМРП компасного приложения влияние размагничивающего фактора на МРЧЭ является негативным, т. е. необходимо, чтобы данное влияние было минимальным. В противном случае значение удельной чувствительности принимает меньшее значение и приведет к увеличению коэффициента нелинейности передаточной характеристики, что для работы в компасном приложении недопустимо.

Как известно, поле размагничивания пропорционально толщине МРЧЭ и зазору между ними и обратно пропорционально его ширине [3]. С целью уменьшения размагничивающего фактора МРЧЭ формируются из магниторезистивной пленки толщиной ~ 20 – 30 нм, а ширину МРЧЭ при проектировании выбирают больше, чем зазор между ними. В нашем случае ширина полоски МРЧЭ составляет ~ 70 мкм, а зазор между ними ~ 35 мкм.

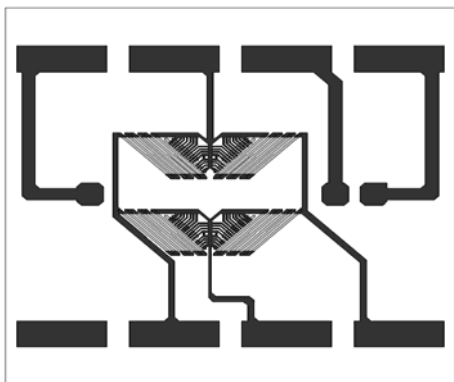
В отличие от АМРП первого варианта для АМРП ДПР этот размагничивающий фактор наоборот играет положительную роль, т. к. позволяет повысить порог срабатывания МРЧЭ. В этом случае МРЧЭ изготавливаются из магниторезистивной пленки толщиной ~ 50 – 60 нм, а зазор между МРЧЭ – не менее ширины полоски МРЧЭ. В нашем случае ширина полоски МРЧЭ и зазора между ними составила ~ 15 мкм.

Новизна данной работы заключается в разработке АМРП, обладающих более высокой чувствительностью и радиационной стойкостью по сравнению с элементами Холла и требующих для изготовления более высокого уровня технологии, а именно нанотехнологии, так как МРЧЭ, основанные на явлении анизотропного магниторезистивного эффекта (АМРЭ), содержат слои толщиной до нескольких десятков нанометров. Кроме того, отличительной особенностью данной работы является то, что она

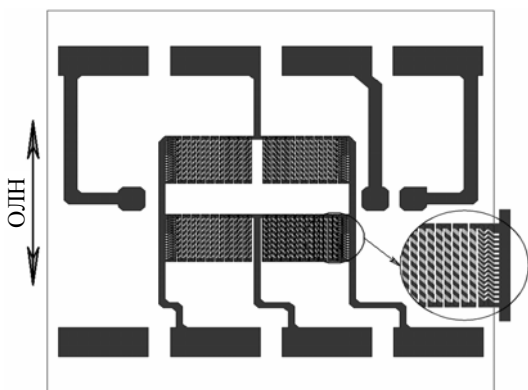
относится к области функциональной электроники (спинтроники), а поэтому вопросы конструктива и технологии изготовления должны рассматриваться совместно.

АМРП компасного приложения

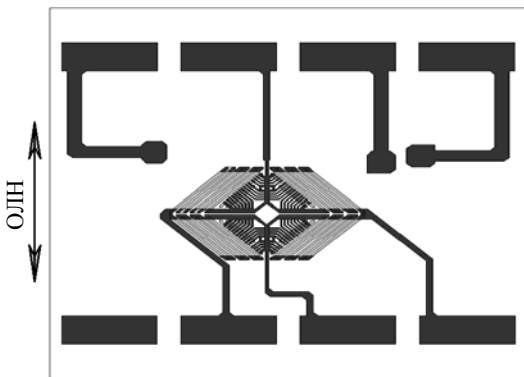
В качестве базовой модели по созданию АМРП компасного приложения был взят датчик НМС 1021 фирмы Honeywell [4]. Первым функциональным сломом является мост Уинстона. Топология разработанных мостов Уинстона представлена на рис. 1.



а



б



в

Рис. 1. Варианты топологии мостов Уинстона: а – мост Уинстона в виде «веера»; б – мост Уинстона с ПБ; в – мост Уинстона в виде «ромба»

Мост Уинстона представляет собой четыре группы отдельно стоящих МРЧЭ в виде полосок, соединенных между собой перемычками из проводящего немагнитного материала, образующих мандр – плечо моста Уинстона. Плечи моста Уинстона соединены с контактными площадками (КП) и между собой проводниками, изготовленными из того же материала, что и перемычки.

Приведенные на рис. 1 варианты топологии мостов различаются способом смещения рабочего диапазона в линейную часть передаточной характеристики.

Топология (рис. 1,а,в) обеспечивает смещение за счет ориентации МРЧЭ под углом 45° к оси легкого намагничивания (ОЛН).

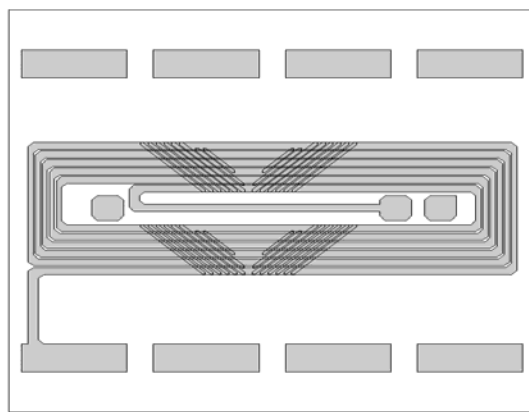
Топология (рис. 1,б) отличается тем, что МРЧЭ ориентированы вдоль ОЛН, а смещение задается путем нанесения замыкающих перемычек, сформированных на магниторезистивных полосках под углом 45° к ОЛН – полюсов Барбера (ПБ).

Разница в топологии мостов Уинстона вызывает необходимость проектирования катушек индуктивности «set/reset» с разной топологией для обеспечения поля насыщения при малом рабочем токе.

Катушка индуктивности «set/reset» служит для подачи короткого установочного импульса тока величиной $2 \dots 5$ А и длительностью $1 \dots 2$ мкс для формирования магнитного поля вдоль ОЛН (для ориентации магнитных доменов МРЧЭ в направлении легкой оси). Эта процедура возвращает АМРП в режим максимальной чувствительности.

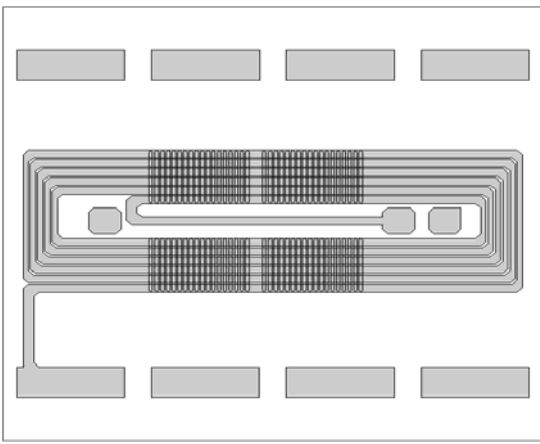
На рис. 2 показаны катушки индуктивности «set/reset» со взаимным расположением магниторезистивных полосок (МРЧЭ).

В вариантах (а) и (б) рис. 2 задействованы две стороны, а в варианте (в) – одна сторона плоской прямоугольной катушки индуктивности «set/reset».

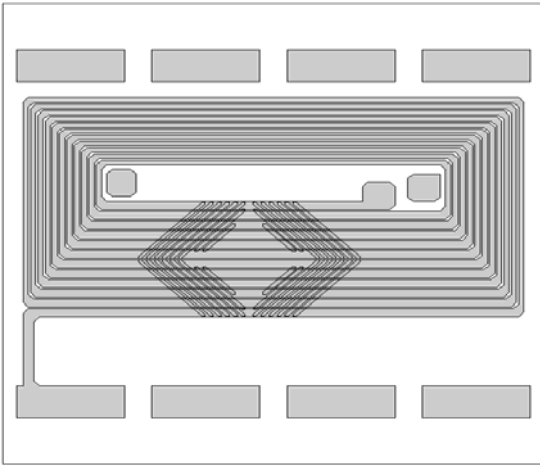


а

Рис. 2. Разновидности катушек индуктивности «set/reset» и расположение магниторезистивных полосок (МРЧЭ) относительно витков катушки индуктивности: а – катушка индуктивности «set/reset» для моста Уинстона в виде «веера»; б – катушка индуктивности «set/reset» для моста Уинстона с ПБ; в – катушка индуктивности «set/reset» для моста Уинстона в виде «ромба»

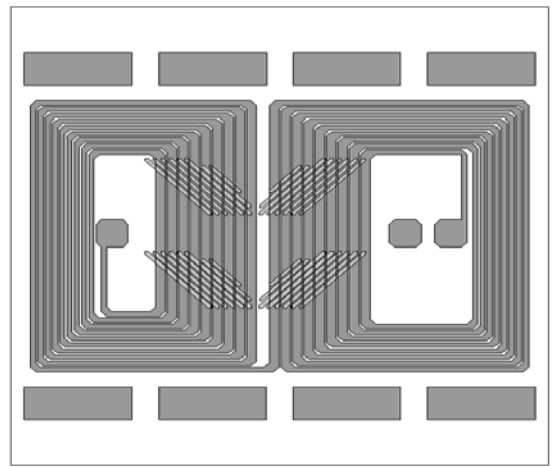


б

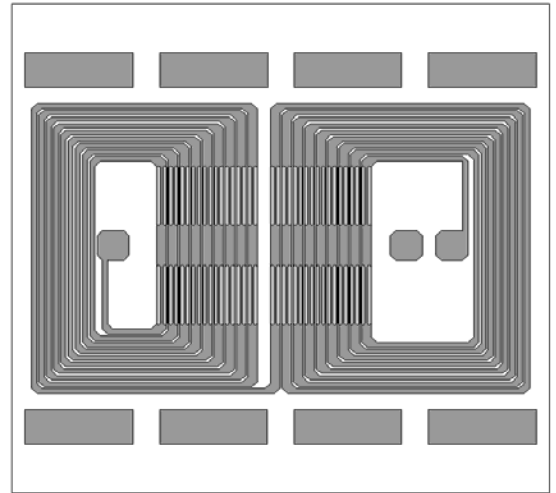


в

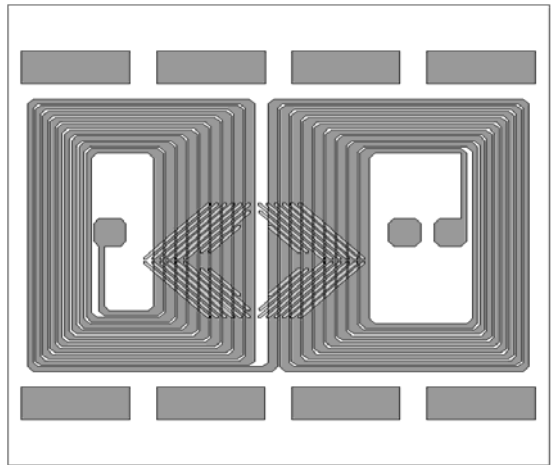
Окончание рис. 2



а



б



в

Также катушка индуктивности «set/reset» выполняет еще одну важную функцию – это инвертирование передаточной характеристики АМРП путем ее зеркального отображения относительно двух смещений, что позволяет линеаризовать передаточную характеристику.

Процесс линеаризации включает три шага [2]:

- формируется установочный импульс тока I_{set} , что обеспечивает «set» условие. При этом измеряется и запоминается выходное напряжение моста $U_{вых(set)}$;

- формируется установочный импульс тока $I_{reset} = -I_{set}$, что обеспечивает «reset» условие. При этом измеряется и запоминается выходной сигнал $U_{вых(reset)}$.

- выходной сигнал вычисляется по формуле

$$U_{вых} = [U_{вых(set)} - U_{вых(reset)}] / 2, \quad (1)$$

при этом исключаются начальное смещение и температурные эффекты как самого магниторезистивного моста Уинстона, так и внешней схемы обработки сигнала.

На рис. 3 показана катушка индуктивности «offset» со взаимным расположением магниторезистивных полосок (МРЧЭ).

Рис. 3. Катушка индуктивности «offset» и расположение магниторезистивных полосок (МРЧЭ) относительно витков катушки индуктивности: а – катушка индуктивности «offset» для моста Уинстона в виде «веера»; б – катушка индуктивности «offset» для моста Уинстона с ПБ; в – катушка индуктивности «offset» для моста Уинстона в виде «ромба»

Основное назначение катушки индуктивности «offset» – компенсация любого внешнего магнитного поля. Эта процедура очень полезна, когда необходимо устранить искажения магнитного поля крупными металлическими предметами. Например, снизить влияние корпуса автомобиля на магнитное поле Земли в компасных приложениях.

На рис. 4 схематически показано совмещение всех трех функциональных элементов на одной подложке (на примере моста Уинстона с ПБ).

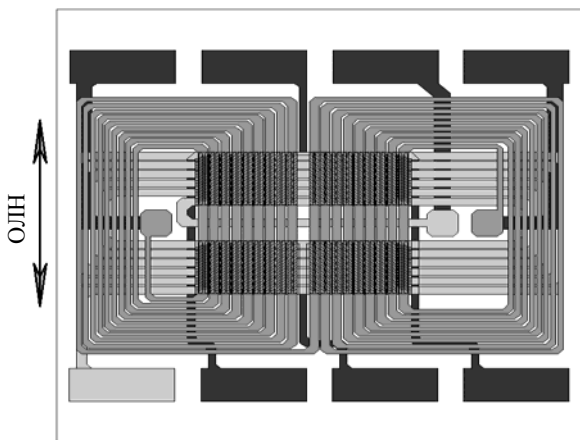


Рис. 4. Целостная конструкция АМРП

Из рис. 4 видно, что контактные площадки от всех трех функциональных элементов через межуровневые соединения выведены на периферию АМРП.

Такая конструкция обеспечивает удобство монтажа АМРП на плату схемы обработки сигнала.

Важным моментом в реализации такой конструкции является создание надежных межуровневых соединений.

Был разработан способ изготовления АМРП с так называемым каскадным способом формирования межуровневых соединений. Сущность способа заключается в следующем.

Изготовление многоуровневых тонкопленочных АМРП компасного приложения включает поочередное вакуумное нанесение на подложку магниторезистивной структуры и проводниковых слоев с последующим созданием рисунка схемы методом фотолитографии, нанесение изоляционных слоев и формирование в них межуровневых соединений от одного проводникового слоя к другому путем вытравливания переходных окон в изоляции и пропыления их проводящим материалом. Межуровневые соединения формируют путем пропыления переходных окон одновременно с напылением проводникового слоя соответствующего уровня и изготовлением рисунка схемы методом фотолитографии, причем межуровневые соединения формируют большего размера, чем размер переходных окон в плане. В каждом последующем изоляционном слое вытравливают переходные окна большего размера, чем в предыдущем [5].

На рис. 5 показано объемное изображение межуровневых соединений «каскадного типа» при изготовлении АМРП компасного приложения.

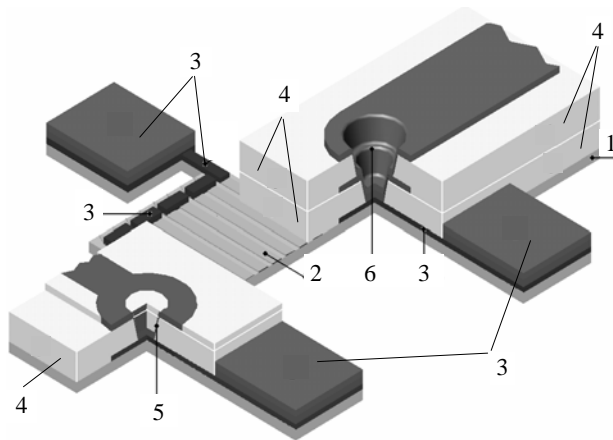


Рис. 5. Объемное изображение межуровневых соединений: 1 – подложка; 2 – магниторезистивные полосы; 3 – перемычки, проводники, контактные площадки; 4 – изоляционный слой; 5 – межуровневое соединение между вторым и первым проводниковыми слоями; 6 – межуровневое соединение между третьим и первым проводниковыми слоями

Число уровней соединенных между собой в виде каскада соединений может быть сколько угодно большим и ограничивается допустимым размером окна на верхнем уровне.

Переходные окна предпочтительнее изготавливать круглого сечения для более надежного пропыления. В данном случае используются переходные окна восьмиугольной формы, которые после травления имеют скругленную форму. Травление полиимида при формировании переходных окон является изотропным процессом, вследствие чего стенки окна имеют наклон порядка 45° , что облегчает их пропыление. Для пропыления переходных окон используется магнетронное распыление.

Наряду с конструктивными был решен ряд технологических задач.

Для получения передаточной характеристики с нелинейностью менее 0,5 % кроме ранее приведенной методики линеаризации возможно использование соответствующего материала магниторезистивного слоя. Были исследованы железоникелевые сплавы 79НМ и сплав 83 %Ni-17 %Fe, а также сплавы системы железо-никель-кобальт 65 %Ni-15 %Fe-20 %Co и 82 %Ni-12 %Fe-6 %Co. Наилучшие результаты по линейности передаточной характеристики были получены на пленках из сплава 65 %Ni-15 %Fe-20 %Co, что согласуется с результатами исследований других авторов [6].

Другой задачей, которая решалась в данной работе, являлась защита магниторезистивной пленки сплава 65 %Ni-15 %Fe-20 %Co от окисления. В качестве такой защиты был выбран тантал, который на установке электронно-лучевого испарения «Оратория-9» напылялся за один цикл откачки вместе с магниторезистивным материалом.

Однако общеизвестно быстрое образование прочного окисла на поверхности тантала при экспонировании на воздухе, что существенно увеличивает переходное сопротивление между магниторезистив-

ными полосками и перемычками. Для устранения этого недостатка введен второй слой 65 %Ni-15 %Fe-20 %Co (верхний), который является технологическим и удаляется с магниторезистивных полосок при травлении первого проводящего слоя. Верхний слой сплава 65 %Ni-15 %Fe-20 %Co остается только в местах формирования проводников, перемычек и контактных площадок в качестве адгезионного и уменьшает переходное сопротивление между танталом и материалом проводящего слоя. Кроме того, перед нанесением проводящего слоя проводилось декапирование верхнего слоя сплава 65 %Ni-15 %Fe-20 %Co.

Образцы АМРП, изготовленные по данной технологии, имеют удельную чувствительность (0,9–1,2) мВ/В×Э и нелинейность не более 0,5 %, что находится на уровне зарубежных аналогов (датчик НМС 1021 фирмы Honeywell).

Разница в рабочих характеристиках трех топологических вариантов АМРП на данный момент не обнаружена, но следует отметить большую устойчивость выходного сигнала моста Уинстона после подачи импульсов «set» и «reset» для вариантов рис. 1,а и б.

АМРП для датчика положения ротора электродвигателя

В основу топологического варианта разрабатываемого АМРП для ДПР положена схема полумоста, которая дает разнополюсный выходной сигнал относительно половины напряжения питания, а в случае использования моста Уинстона – относительно «0 мВ».

Сущность технического решения заключается в том, что в АМРП ДПР формируется разнополюсный выходной сигнал вследствие пространственного разнесения плеч моста Уинстона и раздельного воздействия на них магнитного поля от элементов кодирующего магнитного диска в строго определенной последовательности – кода Грея. Эта последовательность обеспечивается воздействием магнитных элементов кодирующего диска либо на одну половину моста Уинстона (активная единица), либо на вторую – (активный ноль) независимо от знака магнитного поля, но в направлении, перпендикулярном ОЛН и протекающему сенсорному току, что обеспечивает максимальное изменение значения сопротивления в двух плечах моста Уинстона (поперечный АМР эффект).

Выходной сигнал будет иметь разную полярность в зависимости от того, на какие плечи действует магнитное поле.

На рис. 6 показана топология моста Уинстона по известной схеме соединения его плеч (рис. 6,а) и предлагаемая схема соединений (рис. 6,б), где 1 – плечо моста Уинстона (выделено), 2 – МРЧЭ, из которых формируются плечи моста Уинстона; а, b, c, d – условное обозначение плеч моста Уинстона.

Топология моста Уинстона такова, что противоположные по электрической схеме плечи моста Уинстона попарно расположены рядом и пространствен-

но разнесены так, что два плеча моста Уинстона противостоят магнитным элементам, отвечающим за активный ноль, а два других – за активную единицу [7].

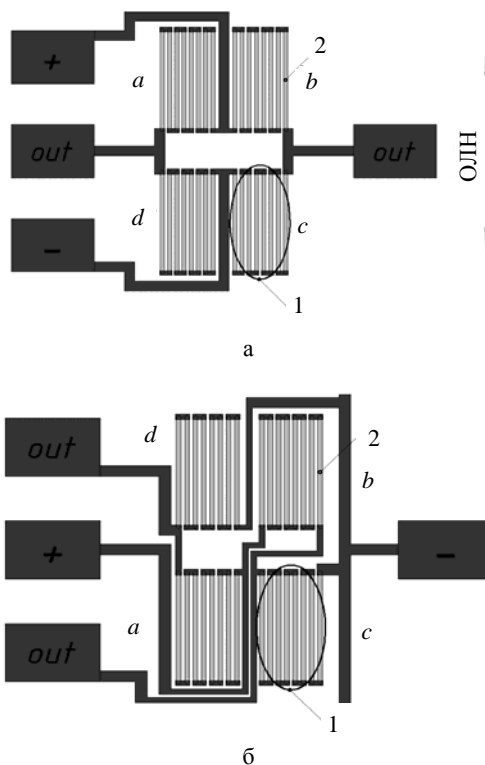


Рис. 6. Топология моста Уинстона: а – по известной схеме соединения; б – по разработанной схеме соединения

Отличительными особенностями данной топологии АМРП ДПР являются:

- отсутствие изменения выходного сигнала от воздействия протяженной электромагнитной помехи, создаваемой при работе электродвигателя;
- МРЧЭ работают в пороговом режиме, что обеспечивает получение большого выходного сигнала для схемы обработки сигнала (считывающего устройства) и четкое срабатывание от кодирующих ячеек в магнитном диске.

На рис. 7 показан принцип работы модифицированного моста Уинстона.

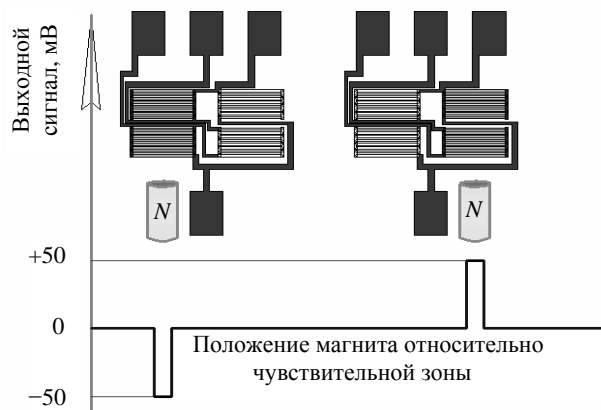


Рис. 7. Принцип работы модифицированного моста Уинстона

В настоящее время разработаны АМРП ДПР двух типов:

- АМРП, содержащий пять магниторезистивных мостов Уинстона (МРЧЭ-5);
- АМРП, содержащий восемь магниторезистивных мостов Уинстона (МРЧЭ-8).

Общий вид и габаритные размеры АМРП ДПР «МРЧЭ-5» и «МРЧЭ-8» представлены на рис. 8 и 9.

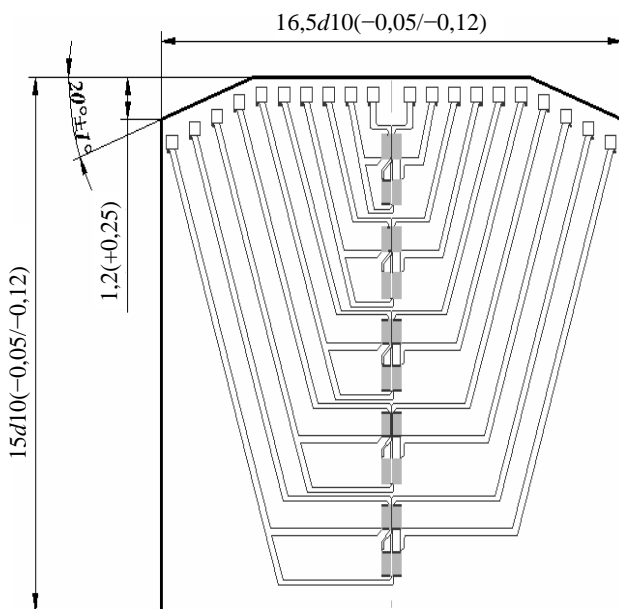


Рис. 8. Топология АМРП «МРЧЭ-5»

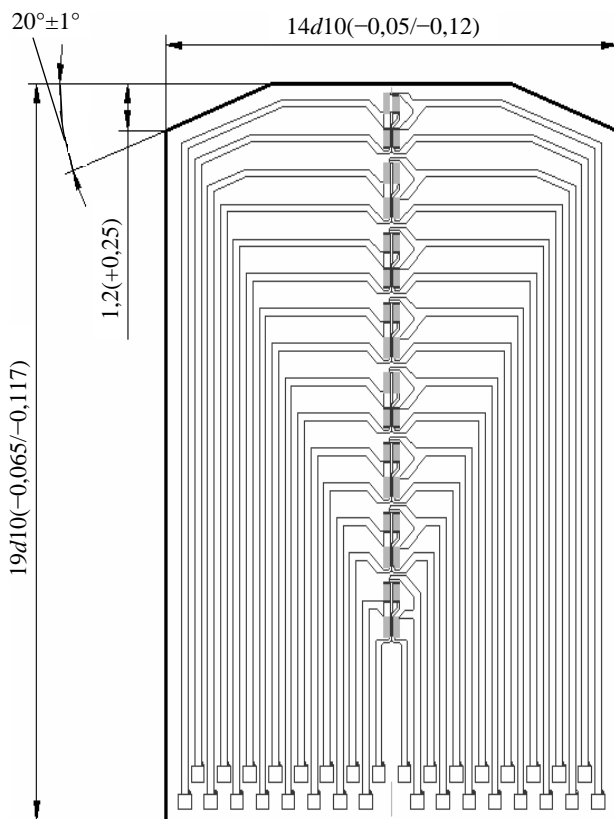


Рис. 9. Топология АМРП «МРЧЭ-8»

Размер МРЧЭ АМРП «МРЧЭ-5» – 700×20 мкм с зазором – 20 мкм.

Размер МРЧЭ АМРП «МРЧЭ-8» – 500×13 мкм с зазором – 13 мкм.

Основанием микроплат служит кремниевая пластина диаметром 100 мм.

В качестве материала МРЧЭ АМРП ДПР используется магниторезистивная структура 65 %Ni-15 %Fe-20 %Co-Ta-65 %Ni-15 %Fe-20 %Co. Для соединения отдельно стоящих МРЧЭ перемычками, проводниками и создания контактных площадок используется проводящая структура – V-Cu-Ni толщиной ~2 мкм.

Полученные образцы имели выходной сигнал порядка ±50 мВ при воздействии магнитного поля величиной более 20 мТл.

Заключение

В результате проведенной работы выявлен ряд конструкторско-технологических особенностей, которые напрямую влияют на рабочие характеристики АМРП и должны учитываться как в процессе разработки топологии АМРП, так и в технологии их изготовления.

В первую очередь это касается топологии моста Уинстона, при разработке которой учитывались влияние размагничивающего поля, связанного с размерным эффектом в тонких магнитных пленках, способ задания смещения передаточной характеристики и требования к микроминиатюризации. Наряду с этим решался вопрос формирования межуровневых соединений «каскадным» способом, обеспечивающим надежность и технологичность изготовления микроплат АМРП.

Для выполнения специальных требований к АМРП для датчика положения ротора электродвигателя разработана топология моста Уинстона, обеспечивающая получение разнополюсного выходного сигнала и компенсацию электромагнитных помех за счет попарного расположения противоположных плеч моста, при котором появление выходного сигнала происходит при локально-выборочном воздействии рабочего магнитного поля.

В качестве магниторезистивной была выбрана структура Ni(65 %)-Fe(15 %)-Co(20 %)-Ta-Ni(65 %)-Fe(15 %)-Co(20 %), которая обеспечивает необходимую линейность передаточной характеристики, небольшое переходное сопротивление между магниторезистивными полосками и проводящим слоем, является стойкой к окислению и напыляется за один цикл откочки.

Разработанные АМРП найдут применение в магниторезистивных датчиках, предназначенных для решения ряда задач магнитометрии:

- определения курса объекта по магнитному полю Земли;
- измерения бесконтактным способом угла поворота и линейного перемещения;

- детектирования скорости;
- распознавания образа ферромагнитных объектов;
- в охранных системах.

Литература

1. Касаткин С. И., Васильева Н. П., Муравьев А. М. Многослойные тонкопленочные магниторезистивные элементы. М., 2005.

2. Маргелов А. Магниторезистивные датчики положения компании Honeywell // Chip news – инженерная микроэлектроника. 2005. № 3. С. 60–65.

3. Суху Р. Магнитные тонкие пленки. М.: Мир, 1967. С. 394.

4. Патент США, Honeywell N 5, 952, 825 «Magnetic field sensing device having integral coils for producing magnetic fields», 1999.

5. Заявка на изобретение «Способ изготовления магниторезистивного датчика». Приоритетная справка 2011125952 от 23.06.2011.

6. Амеличев В. В. и др. Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитных наноструктур с различным содержанием кобальта // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 22–24.

7. Заявка на изобретение «Абсолютный датчик угла поворота». Приоритетная справка 2010138041 от 13.09.2010 (получено положительное решение).