

7

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
наименование факультета

Кафедра
Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»
код и наименование

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
наименование профиля

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПензГУ 02. 11.03.04. 005 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему

Разработка технологии вакуумного напыления магниторезистивных пленок на
основе ферромагнитных сплавов
тема бакалаврской работы

Студент группы 20ПД1
номер группы

Алекс 10.06.24
подпись, дата

Горбунцов А.А.
фамилия, иници.

Руководитель доцент
должность

Голо 10.06.24
подпись, дата

Головяшкин А.Н.
фамилия, иници.

ПГУ
наименование организации

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

Рыж 10.06.24
подпись, дата

Рыжова Т.Н.
фамилия, иници.

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 10.06.24 № 10)

Заведующий кафедрой

10.06.24
подпись, дата

Пронин И.А.
фамилия, иници.

Работа защищена с оценкой отлично (протокол ГЭК от 12.06.24 № 5)

Секретарь ГЭК

12.06.24
подпись, дата

Вольсков А.А.
фамилия, иници.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит 113 страниц, 32 рисунка, 6 таблиц, 44 использованных источников, 15 слайдов презентации и 5 приложений.

Ключевые слова: магниторезистор, анизотропное магнитосопротивление, гигантское магнитосопротивление, магниторезистивный эффект, ферромагнитные материалы, магнитный датчик, тонкопленочная технология, магнитное поле, коэрцитивная сила, намагниченность, магнитная анизотропия.

Объект исследования: тонкопленочный магниторезистор, использующий явление гигантского магнитного сопротивления и анизотропного магнитного сопротивления.

Цель работы: разработать вакуумную технологию реализации тонких магниторезистивных пленок, изучить эффекты анизотропного магнитосопротивления (АМС) и гигантского магнитосопротивления (ГМС), а также ферромагнитные материалы реализующие данные явления, их основные параметры, характеристики, свойства, определить среди них лучших представителей для создания дешевого и качественного магнитного сенсора, создать алгоритм расчетов и оптимальную топологию магниторезистивных элементов.

В ходе работы были описаны магниторезистивные свойства тонких пленок, эффекты АМС и ГМС, принцип их работы.

Выведены основные требования к материалам, реализующих эффекты АМС и ГМС, проанализировано соотношение основных параметров и характеристик магниторезисторов с АМС и ГМС.

Произведен выбор конструкции магниторезистивного элемента, его расчет (с учетом особенности конфигурации). Составлен чертеж топологии магниторезистора. Произведен процесс получения тонких пленок магниторезистора по вакуумной технологии.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						2
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Гигантское магнитосопротивление (ГМС) и анизотропное магнитосопротивление (АМС). Требования к материалам магнитных датчиков..	6
1.1 Явление и особенности АМС	6
1.2 Явление и особенности ГМС	12
2 Материалы для ГМС и АМС.....	22
3 Расчет и проектирование магниторезистивных элементов	37
3.1 Конструкции магниторезистивных элементов	37
3.2 Алгоритм расчетов магниторезистивных элементов	41
3.3 Технология вакуумного напыления магниторезистивных пленок.	54
4 Защита от электромагнитного излучения оператора вакуумных процессов...	65
Заключение	74
Список использованных источников	76
Приложение А. Задание на ВКР	81
Приложение Б. Расчет магниторезистивного элемента в среде программирования <i>MathCAD</i>	85
Приложение В. Топология магниторезистивного элемента.....	90
Приложение Г. Результат проверки ВКР в системе Антиплагиат. ВУЗ	92
Приложение Д. Презентация ВКР	98

ВВЕДЕНИЕ

Темой данной ВКР является «Разработка технологии вакуумного напыления магниторезистивных пленок на основе ферромагнитных сплавов».

Актуальность темы: современная техника и современные технологии уже давно идут по пути миниатюризации устройств, одним из способов которой является переход к функциональным средам тонких плёнок. Особое значение имеют тонкопленочные магнитные объекты, которые используются в качестве функциональной среды для сенсорных устройств.

Исследования и разработки в области магниторезистивных датчиков сыграли важную роль в последние несколько десятилетий. Несмотря на широкий охват существующих исследований (от методов получения пленок до изучения их магнитных свойств), вопросы стабильности, воспроизводимости их свойств, связи между микроструктурой и магнитными параметрами/характеристиками тонких пленок до сих пор представляют интерес, как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с практической точки зрения.

В настоящее время они нашли применение в широком спектре промышленных областей, включая автомобилестроение, бытовую электронику или биотехнологии. В автомобилестроении и бытовой электронике магниторезистивные датчики используются для измерения тока или положения скорости, угла наклона, а также магнитного поля Земли в навигационных системах. В этих областях актуальность магнитных сенсоров заметно растет, и их применяют в производственных масштабах. Соответственно их широкое распространение требует недорогих технологий и доступных по своей цене материалов, для обеспечения низкой себестоимости датчиков, которые еще должны обладать простотой конструкции, высокой надежностью и

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Горбунцов			Введение		
Проб.		Головяшкин					
Н.контр.		Рыжова		10.08.24			
Утв.							

Лит.	Лист	Листов
4	4	113

гр. 20ПД1

температурной стабильностью. Их также можно использовать в качестве считывающих головок в магнитных жестких дисках, микроэлектромеханических системах (МЭМС) и других устройствах, но здесь их влияние невелико. В биотехнологии магниторезистивные сенсоры используются для бимолекулярной детекции в анализах белков и в микрофлюидных системах.

Цель работы: разработать вакуумную технологию реализации тонких магниторезистивных пленок, изучить эффекты анизотропного магнитосопротивления (АМС) и гигантского магнитосопротивления (ГМС), а также ферромагнитные материалы реализующие данные явления, их основные параметры, характеристики, свойства, определить среди них лучших представителей для создания дешевого и качественного магнитного сенсора, создать алгоритм расчетов и оптимальную топологию магниторезистивных элементов.

Задачи:

- изучить эффекты АМС и ГМС, принцип работы, требования к материалам;
- проанализировать соотношение основных параметров и характеристик материалов с АМС и ГМС;
- указать критерии выбора конструкции элементов магниторезистивных датчиков, а также составить для них алгоритм расчетов;
- указать особенности получения тонких пленок магниторезистора и разработать для них технологию вакуумного напыления;
- на основе полученной информации, сделать заключительные выводы.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 Гигантское магнитосопротивление (ГМС) и анизотропное магнитосопротивление (АМС). Требования к материалам магнитных датчиков

1.1 Явление и особенности АМС

Явление, называемое магнитосопротивлением, представляет собой изменение сопротивления проводника при помещении его во внешнее магнитное поле. Для ферромагнетиков, таких как железо, кобальт и никель, это свойство также будет зависеть от направления напряженности внешнего магнитного поля относительно направления тока через магниторезистивный элемент и величины намагниченности, приложенной к материалу. Это явление и стало известно как анизотропное магнитосопротивление [1].

Открытие АМС в ферромагнитных металлах было сделано Уильямом Томсоном в Глазкове в 1857 году. Он обнаружил, что сопротивление железа и никеля уменьшается, когда направление магнитной индукции перпендикулярно току, и увеличивается, когда их направления совпадают [2]. В настоящее время известно, что это свойство обусловлено спин-орбитальным взаимодействием электрона. Вообще, магниторезистивный эффект в данном случае очень мал, самое большее, порядка нескольких процентов и рассчитывается он по формуле (1):

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{R_H - R_0}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

где R_H – сопротивление в фиксированном магнитном поле, Ом; R_0 – сопротивление при отсутствии магнитного поля, Ом.

Магниторезистивные датчики с анизотропным эффектом обладают высокой чувствительностью к малым магнитным полям. Они также отличаются способностью обеспечить высокий уровень первичного сигнала, прочностью, надежностью и точностью работы в широком диапазоне температур. Более того, у них значительная нечувствительность к магнитным и механическим

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.	Горбунцов				Гигантское магнитосопротивление (ГМС) и анизотропное магнитосопротивление (АМС). Требования к материалам магнитных датчиков	Лит.	Лист
Проб.	Головяшкин						Листов
Н.контр.	Рыжова			10.06.24		6	113
Утв.						гр. 20ПД1	

возмущениям, из-за чего их можно реализовать в автомобильной промышленности и навигационных системах.

Принцип эффекта приведен на рисунке 1. Внешнее магнитное поле H вызывает вращение вектора намагниченности M пленки на некоторый угол α , значение которого определяется направлением и величиной данного магнитного поля. Вместе с этим изменяется сопротивление пленки в соответствии с формулой (2). Из нее следует, что минимальное сопротивление магниторезистивной пленки соответствует углу $\alpha = 90$ град, а максимальное - углу $\alpha = 0$ град (в отсутствие магнитного поля). При отсутствии магнитного поля направление тока и направление вектора намагниченности магниточувствительного элемента параллельны. Однако при увеличении напряженности магнитного поля H угол α между ними увеличивается, в то время как сопротивление R уменьшается на максимальную величину ΔR , которая зависит от характеристик материала.

$$R = R_0 + \Delta R \times \cos^2(\alpha) \quad (2)$$

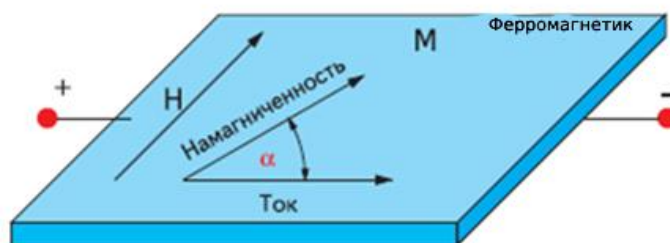


Рисунок 1 - Принцип магниторезистивного эффекта

Далее рассмотрим упрощенную схему датчика с АМС, приведенную на рисунке 2.

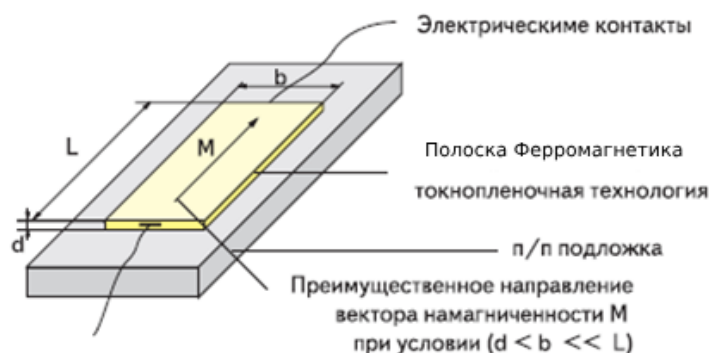


Рисунок 2 - Упрощенная схема конструктива анизотропного магниторезистивного датчика

На подложку из полупроводника с помощью тонкопленочной технологии наносится слой чувствительного материала в форме полоски таким образом, чтобы геометрические размеры соответствовали условию: $d < b \ll L$, где d - толщина, b - ширина и L - длина полоски соответственно. Такая геометрия обеспечивает оптимальное соотношение между чувствительностью и простотой изготовления.

Использование сплошной чувствительной полоски слоя приводит к нелинейному изменению сопротивления датчика в зависимости от направления вектора намагниченности (как показано на рисунке 3). Хотя данная схема позволяет обнаруживать углы поворота дипольного магнита, датчик такой конструкции не стоит использовать в магнитометрии, из-за следующих недостатков: низкая чувствительность; нелинейность характеристик; не определяет направление магнитного поля.

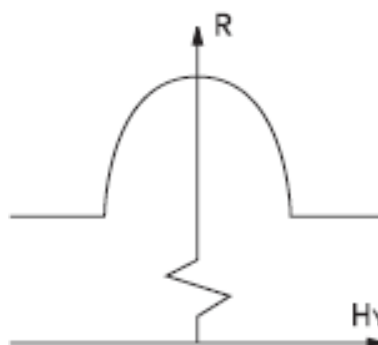


Рисунок 3 - Функция $R = f(H_c)$ для сплошного слоя ферромагнетика

Для устранения указанных недостатков применяют чувствительные элементы магниторезистивных пленок, нанесенных на кремниевую пластину в виде полосок. Четыре магниторезистора, выполненные так, как показано на рисунке 4, включаются в мостовую схему. Сопротивление резистора в таком случае будет изменяться линейно в зависимости от направления намагниченности (рисунок 5). Это достигается путем применения метода, известного как смещение зазубренных участков. Согласно ему на пути тока устанавливаются шунтирующие полосы с низким сопротивлением, состоящие из алюминия или серебра. При этом, начальная ориентация вектора намагничивания M параллельна длине мостового магниторезистора. Благодаря угловому расположению полос в 45 град. к длине тонкой пленки, ток также протекает под углом 45 град. на магниточувствительных участках, выбирая кратчайший путь.



Рисунок 4 - Технология с включением шунтирующих полос в слой ферромагнетика

В итоге при использовании данного метода осуществляется поворот тока и происходит изменение в сопротивлении под действием внешнего магнитного поля, в пределах линейного участка.

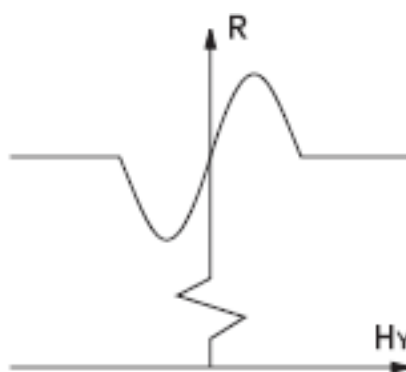


Рисунок 5 - Функция $R = f(H_c)$ для не сплошного слоя ферромагнетика

Две пары диагональных элементов моста имеют шунтирующие полосы, расположенные под углом $+45$ град. к оси полосы и две другие пары находятся под углом -45 град. Под влиянием поля происходит увеличение сопротивления одной пары резисторов, и уменьшению второй пары. Дифференциальный сигнал представляет собой линейную функцию амплитуды внешнего магнитного поля, которое является нормальным к оси полосы в ее плоскости.

Таким образом, мостовые датчики с зазубренными полосками можно использовать для многих измерений: скорости, углов, тока, слабых магнитных полей [3].

Что касается материалов и параметров самих чувствительных магниторезистивных элементов, то в современных магнитных сенсорах применяются ферромагнитные металлы и сплавы, из-за своих уникальных магнитных свойств. Т.к. датчики, работающие на основе АМС, применяют для измерения довольно слабых магнитных полей, одними из важных требований, предъявляемых к магниторезистивным материалам, являются:

- низкие значения коэрцитивной силы (материал должен входить в насыщение в слабом магнитном поле для его детектирования, также обеспечивая небольшие расходы энергии);
- высокие значения магнитной проницаемости, намагниченности насыщения и магниторезистивного эффекта (материал должен обладать высокой магнитной восприимчивостью и чувствительностью);
- положительные значения констант анизотропии (в таком случае ферромагнетик является одноосным, т.е. его поведение во внешнем магнитном

поле будет подобно одному домену, который поворачивается вокруг своей оси под его воздействием).

Магнитная анизотропия сама по себе это важное свойство для ферромагнетиков, которое влияет на многие магнитные параметры (коэрцитивная сила, магнитная восприимчивость, гистерезис и т.д.) и на процессы намагничивания и перемагничивания. Ферромагнитные материалы могут демонстрировать «легкие» и «жесткие» направления намагниченности, т.е. энергия, необходимая для намагничивания кристалла, зависит от направления приложенного поля относительно осей кристалла. И эта энергия минимальна, если намагничивание материала происходит вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН). Создать одноосную магнитную анизотропию в магниторезистивной пленке можно, если в процессе создания (напыление/отжиг/охлаждение) прикладывать магнитное поле. В результате этого становится возможной ориентация вектора намагниченности вдоль ОЛН. В большинстве случаев ориентация ОЛН совпадает с направлением внешнего поля, которое было приложено в процессе напыления тонкой пленки [4,5].

Существует также кристаллографическая магнитная анизотропия, которая увеличивает гистерезис в ферромагнетиках, поэтому для уменьшения влияния данного типа анизотропии нужно, чтобы ферромагнитные магниторезистивные пленки обладали гранецентрированной кубической структурой (ГЦК) с текстурой [111]. Давно известно о том, что при использовании данной текстуры можно значительно уменьшить ширину петли гистерезиса перемагничивания. При формировании текстуры [111], которые основаны на ГЦК-материалах, происходит уменьшение количества дефектов кристаллической структуры и, соответственно, возрастает значение максимального магнитосопротивления [6,7].

В дополнение к названным требованиям, можно еще указать, что для магнитного сенсора также неплохо иметь:

- низкие значения остаточной намагниченности (чтобы материал имел максимально возможное сопротивление в отсутствие магнитного поля);

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- близкие к нулю значения магнитострикции (для минимизации помех, шумов и других негативных эффектов);

- безгистерезисность (для аналоговых устройств и магнитных сенсоров, но в цифровых устройствах и считывающих головках жестких дисков наличие петли гистерезиса обязательно).

Конечно, реализовать абсолютно все установленные требования это довольно непростая задача, поэтому при выборе материала магниторезистивного элемента следует выполнить оптимизацию магнитных параметров и найти между ними оптимальное соотношение для реализации хорошего магнитного датчика.

1.2 Явление и особенности ГМС

Как и другие магниторезистивные эффекты, эффект гигантского магнитосопротивления представляет собой изменение электрического сопротивления в ответ на приложенное магнитное поле. Он был открыт в конце 1980-х двумя европейскими учеными, работавшими независимо друг от друга: Петером Грюнбергом и Альбертом Фертом. Они наблюдали очень большие изменения сопротивления (рисунок 6) в материалах, состоящих из чередующихся очень тонких слоев различных металлических магнитных и немагнитных элементов. Эти эксперименты проводились при низких температурах и в присутствии очень сильных магнитных полей. Было обнаружено, что приложение магнитного поля к сверхрешеткам Fe/Cr приводит к значительному снижению его электрического сопротивления. Аналогичный, хотя и ослабленный, эффект был одновременно обнаружен в трехслойной наноструктуре Fe/Cr/Fe. Оказалось, что такой магниторезистивный эффект составляет 10-80%, что намного больше, чем анизотропный (который, как говорилось ранее, не превышает единиц процентов), и поэтому был назван «гигантским».

Изменение сопротивления многослойного слоя возникает, когда приложенное поле выравнивает магнитные моменты последовательных

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ферромагнитных слоев, как схематически показано на рисунке 7. В отсутствие магнитного поля, намагниченности ферромагнитных слоев антипараллельны. Применение магнитного поля, выравнивает магнитные моменты и вызывает намагниченность насыщения многослойного слоя, что приводит к падению его электрического сопротивления [8].

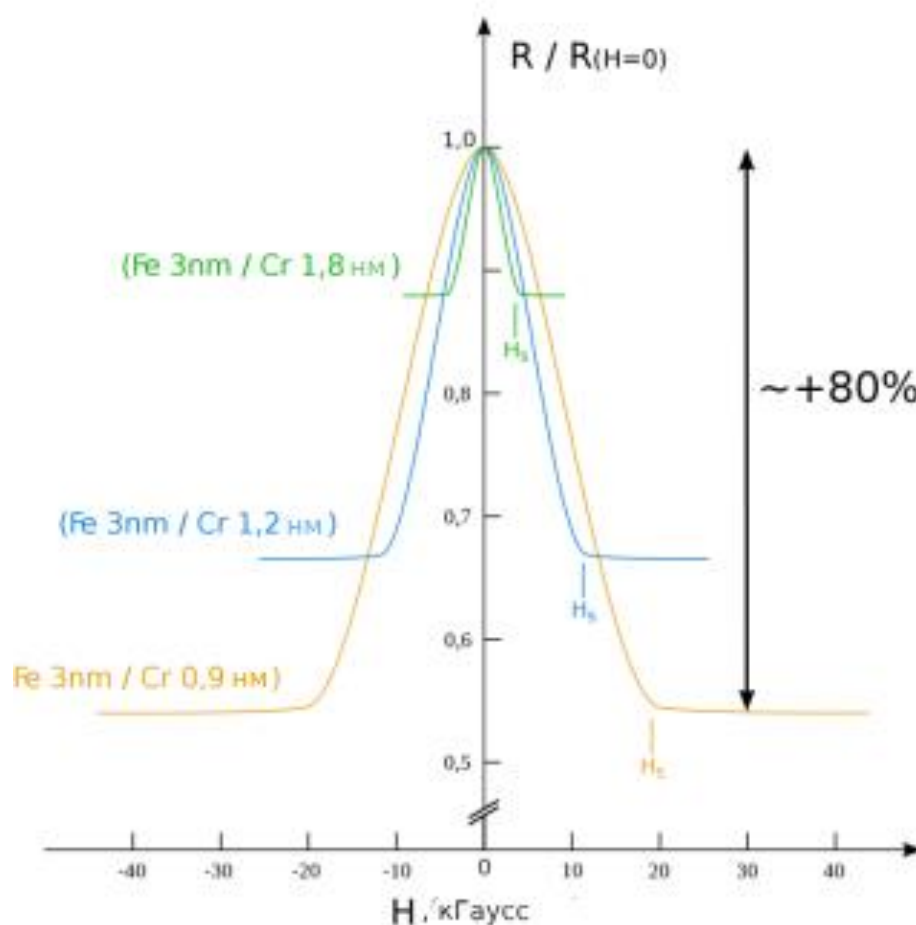
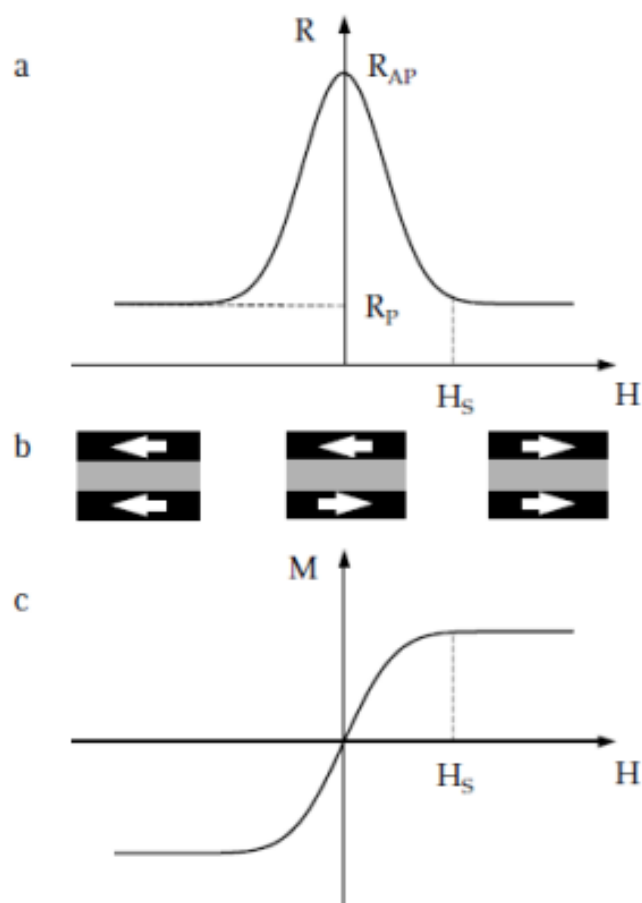


Рисунок 6 - Результаты экспериментов Альберта Ферта и Петера Грюнберга



a) изменение сопротивления магнитного мультислоя в зависимости от приложенного магнитного поля; b) конфигурации намагниченности (обозначены стрелками) трехслойного слоя при различных магнитных полях; c) кривая намагниченности для многослойного слоя

Рисунок 7 - Схематическое изображение эффекта ГМС

Физическая основа эффекта ГМС связана с тем фактом, что спин электронов имеет два разных значения (так называемые спин «вверх» и спин «вниз»). Когда они вращаются по намагниченному материалу, один тип вращения может испытывать сопротивление, отличный от тех, которые испытывают другие типы вращения. Это свойство указывает на существование спин зависимого рассеяния.

Явления ГМС в многослойных ферромагнетиках можно объяснить с помощью модели Мотта, которая была представлена еще в 1936 году для объяснения внезапного увеличения удельного сопротивления ферромагнитных металлов при их нагревании выше температуры Кюри. В этой модели:

1. Электропроводность в металлах может быть описана в связи с двумя свободными каналами проводимости, в которых первый относится к электрону со спином «вверх», а другие связаны с электроном со спином «вниз».

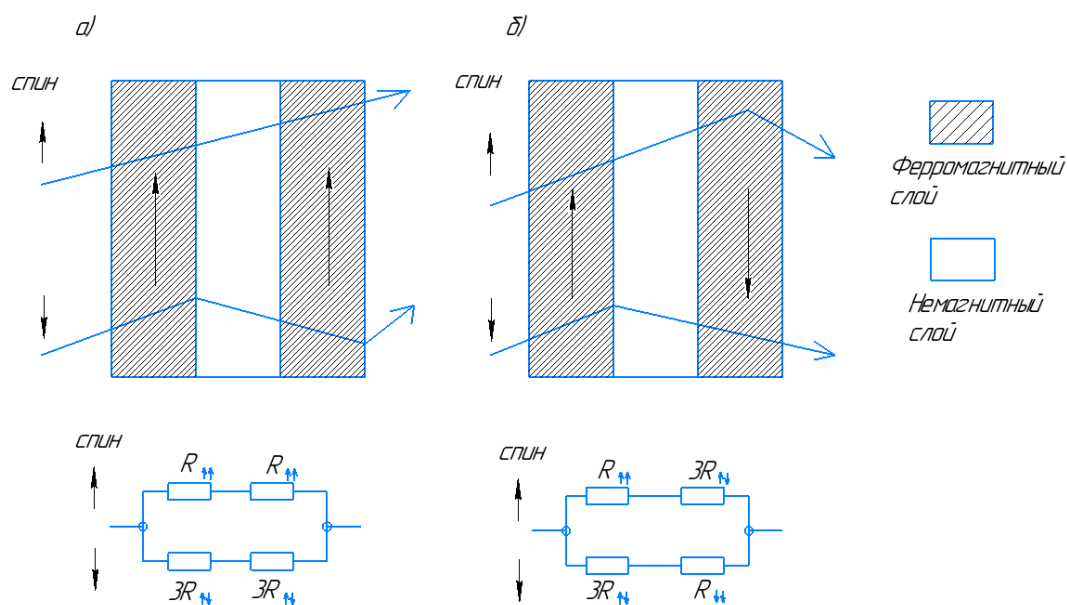
2. В ферромагнитных металлах скорость рассеяния электронов с повышенным и пониженным спином сильно отличается.

Эффект ГМС основан на экспериментально установленном факте сохранения спина электрона на расстояниях до нескольких десятков нанометров, что превышает толщину обычного многослойного материала. Таким образом, электрический ток в трехслойной матрице протекает по двум каналам, один из которых соответствует электронам со спиновой проекцией «вверх», а другой - электронам со спиновой проекцией «вниз». Поскольку спиновые каналы «вверх» и «вниз» независимы (спин сохраняется), их можно рассматривать как два провода, соединенные параллельно, и ГМС можно объяснить с помощью простой модели резистора, как показано на рисунке 8.

Рассмотрим ферромагнитную многослойную конфигурацию, такую как на рисунке 8, и предположим, что сильное рассеяние происходит для электронов со спином, антипараллельным направлению намагничивания, в то время как слабое рассеяние происходит для электронов со спином, параллельным направлению намагничивания.

В ферромагнитной конфигурации рисунка 8 (а) трехслойного устройства электроны со спином «вверх» слабо рассеяны как в первом, так и во втором ферромагнитном слое, тогда как электроны со спином «вниз» сильно рассеяны в обоих ферромагнитных слоях. Это условно моделируется двумя резисторами с сопротивлением R в спин «вверх»-канале и двумя резисторами с сопротивлением $3R$ в спин «вниз»-канале в эквивалентной сети резисторов. Поскольку «вниз» и «вверх» спиновые каналы соединены параллельно, общее сопротивление трехслойного устройства определяется низкоомным «вверх» спиновым каналом, который замыкает высокоомный «вниз» спиновый канал. Следовательно, общее сопротивление трехслойной ферромагнитной конфигурации низкое. С другой стороны, электроны со спином «вниз» в

антиферромагнитной конфигурации сильно рассеяны в первом ферромагнитном слое, но слабо рассеяны во втором ферромагнитном слое. Электроны со спином «вверх» слабо рассеяны в первом ферромагнитном слое и сильно - во втором. Это смоделировано на рисунке 8 (б) с помощью одного резистора с сопротивлением R и одного резистора с сопротивлением $3R$ в каждом вращающемся канале. Короткого замыкания нет, а общее сопротивление в антиферромагнитной конфигурации намного выше, чем в ферромагнитной конфигурации [9].



а) ферромагнитная конфигурация; б) антиферромагнитная конфигурация.

Рисунок 8 - Резисторная модель ГМС

ГМС может быть измерено в двух конфигурациях: с током в плоскости (CIP) или с током, перпендикулярным плоскости (CPP), как показано на рисунке 9. Куда лучше изучена геометрия ГМС CIP , чем геометрия CPP , поскольку измерение свойств CIP намного проще, чем в CPP . Кроме того, требования к импедансу для применения в датчиках изначально были намного лучше выполнены в CIP -геометрии. Свойства переноса CIP в спиновых клапанах и магнитных многослойных материалах хорошо описываются с помощью полуклассического подхода, основанного на уравнении Больцмана, учитывающего объемное и межфазное спин зависимое рассеяние. Эта теория была успешно использована для интерпретации и оптимизации свойств

спиновых клапанов для применения в магниторезистивных головках [10]. Но в геометрии *CIP* есть недостаток, который заключается в том, что гигантский магниторезистивный эффект исчезнет, когда толщина отдельных слоев станет намного больше, чем средняя длина свободного пробега электронов проводимости. Однако это не обязательно имеет место в геометрии тока, перпендикулярно плоскости *CPP*, где ток направлен перпендикулярно плоскостям слоя. В геометрии *CPP* возникает новое явление накопления спина на границах раздела слоев. Это спиновое накопление уравнивается процессами спин-флип-диффузии, и в этом случае появляется такой параметр, как длина спин-флип-диффузии. Если она намного больше, чем средняя длина свободного пробега электронов, то получается, что длина спин-флип-диффузии становится единственной важной длиной в геометрии *CPP*. Эта ситуация действительно применима к случаю реальных многослойных систем, где длина спин-флип-диффузии может превышать более чем на порядок длину свободного пробега, особенно при низкой температуре. Это означает, что гигантский магниторезистивный эффект в геометрии *CPP* сохраняется даже при большей толщине отдельных слоев, чем в геометрии *CIP*. С точки зрения применения, геометрия *CPP* в перспективе довольно выгодна. Все теории гигантского магниторезистивного эффекта, разработанные до сих пор, предсказывают значительно более высокое значение магнитосопротивления для геометрии *CPP*, чем для геометрии *CIP*. По сути, это можно объяснить более эффективным использованием многослойной структуры, так как электрон должен пересекать все границы раздела образца. Однако экспериментально доказать большее магнитосопротивление *CPP* оказалось довольно сложно. В основном это связано с очень низким перпендикулярным сопротивлением многослойного слоя по сравнению с сопротивлением контактных выводов. Для преодоления этой проблемы были использованы скрещенные сверхпроводящие контактные выводы Nb, которые определяли эффективную площадь «столба» порядка 1 мм². Сопротивление порядка 10⁻⁷ Ом впоследствии измеряли с помощью чувствительной системы на основе *SQUID*. Их измерения,

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ограниченные низкими температурами, действительно показали усиленный эффект магнитосопротивления *CPP* по сравнению с магнитосопротивлением *CIP*. Второй способ измерения сопротивления *CPP* заключается в уменьшении размера «столба», чтобы поднять сопротивление до измеримого диапазона. Этот метод требует достаточно продвинутых технологий микрофабрикации и более сложной структуры, но дает возможность изучить температурную зависимость магнитосопротивления *CPP* [11].

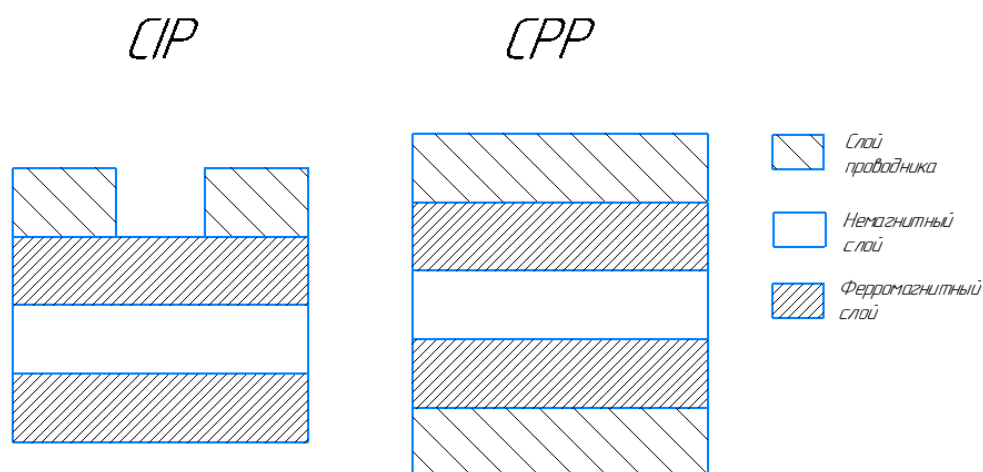


Рисунок 9 - Геометрия *CIP* и *CPP*

Основное отличие ГМС от АМС, кроме величины магниторезистивного эффекта, заключается в том, что для реализации последнего, достаточного одного слоя магниторезистивного материала, в то время как для реализации гигантского магниторезистивного эффекта предполагается наличие нескольких магнитных слоев с различными свойствами. Отсюда можно сделать вывод, что добиться эффекта ГМС можно используя самые разные структуры, из которых наиболее широко известны следующие:

Многослойная структура (рисунок 10). В ней два или более ферромагнитных слоя разделены очень тонкой (около 1 нм) неферромагнитной прокладкой (например, Fe/Cr/Fe). При определенных толщинах связь между соседними ферромагнитными слоями становится антиферромагнитной, что делает энергетически предпочтительным выравнивание намагниченностей соседних слоев в антипараллельном направлении. Разница электрического сопротивления может достигать более 10% при комнатной температуре.

Эффект ГМС впервые был замечен в многослойной конфигурации, при этом многие ранние исследования ГМС были сосредоточены на многослойных стеках из 10 или более слоев.

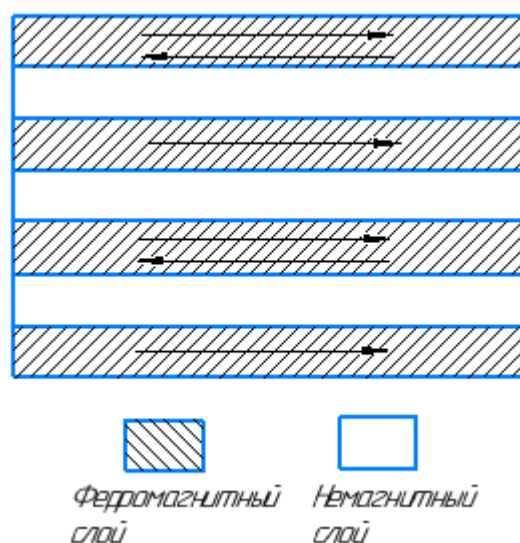


Рисунок 10 - Многослойная структура, реализующая эффект ГМС

Структура спиновой вентиль (*spin valve* – *SV*). Здесь, как и в первом варианте два ферромагнитных слоя разделены тонкой неферромагнитной прокладкой, но к одному из ферромагнетиков добавляется обменный слой сильного антиферромагнетика, который фиксирует его направление магнитного поля (рисунок 11). И если коэрцитивные поля двух ферромагнитных электродов различны, то их можно переключать независимо друг от друга. Таким образом, может быть достигнуто параллельное и антипараллельное выравнивание, которое может привести к ощутимому изменению сопротивления. Это устройство иногда также называют спиновым клапаном.

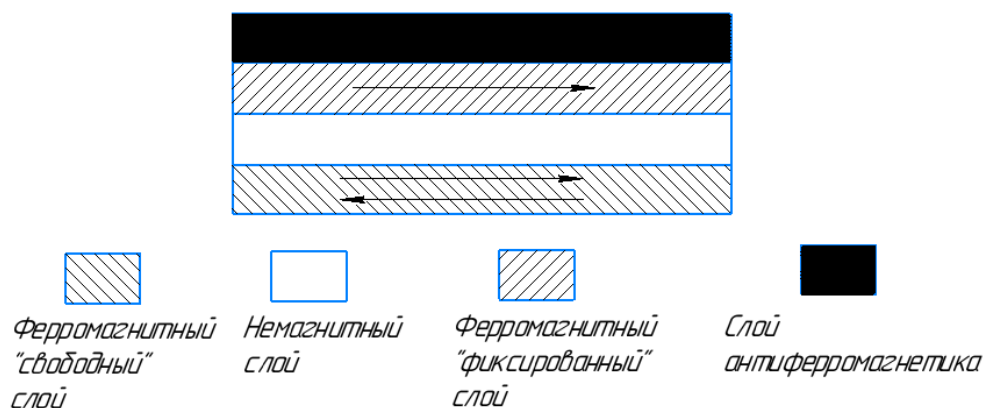


Рисунок 11 - Структура спиновой вентиль, реализующая эффект ГМС

Гранулированная структура (рисунок 12). Гранулированное ГМС — это эффект, возникающий в твердых осадках ферромагнитного материала в немагнитной матрице. Размеры гранул варьируются в зависимости от скорости охлаждения и количества последующих отжигов. Гранулированные материалы не смогли получить такие же высокие коэффициенты МР, характерные для многослойных аналогов, но имеют на это предпосылки [12].

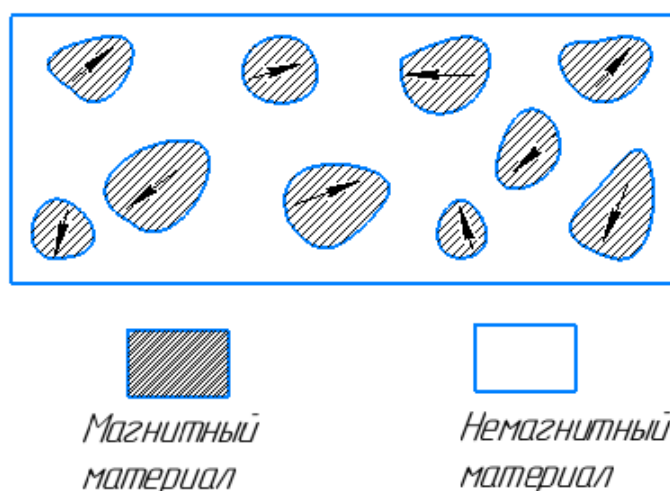


Рисунок 12 - Гранулированная структура, реализующая эффект ГМС

Касательно требований к материалам, реализующие эффект ГМС, то следует учесть, что здесь используются те же ферромагнитные элементы и сплавы, что и в случае АМС. И если использовать их для реализации магнитных датчиков, требования к их магнитным параметрам и свойствам: магнитная анизотропия, остаточная намагниченность, намагниченность насыщения, коэрцитивная сила, площадь петли гистерезиса, магнитная проницаемость и магнитострикция, остаются теми же. Главное отличие — это достижение более высокого МР коэффициента и соответственно большей чувствительности к магнитному полю и большей точности работы сенсора.

Подводя небольшой итог сделать заключение, что магниторезистивный эффект, в случае АМС, очень мал. И хотя этого достаточно для реализации чувствительного к слабым магнитным поля магнитного сенсора, эффект ГМС способен еще сильнее улучшить магнитные датчики, повысить их чувствительность и точность, хотя для этого потребуется более сложная структура чувствительного элемента, которая предполагает наличие нескольких

магнитных слоев. Широко известны следующие структуры: многослойная, спиновой вентиль, гранулированная.

Для реализации качественного и точного тонкопленочного магниторезистивного датчика необходимо, чтобы магнитные материалы обладали: низкими значениями коэрцитивной силы; высокими значениями магнитной проницаемости, намагниченности насыщения и магниторезистивного эффекта; положительными значениями констант анизотропии; низкими значениями остаточной намагниченности; нулевыми значениями магнитострикции; безгистерезисностью. Достичь же таких магнитных параметров позволяют немногие материалы.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 Материалы для ГМС и АМС

Основными материалами, выступающие непосредственно как магниторезистивные тонкие пленки, реализующие эффекты анизотропного магнитосопротивления и гигантского магнитосопротивления, как уже говорилось ранее, являются ферромагнитные элементы и сплавы, которые должны характеризоваться высокой проводимостью (около 10^7 См). Особое место занимают ферромагнитные пленки, состоящие из $3d$ ферромагнитных металлов, а именно железо, никель и кобальт, благодаря которым в принципе и были открыты данные эффекты. Стоит отметить, что исходя из [13] каждый из этих ферромагнетиков имеет свои, уникальные особенности, например: Fe – обладает наилучшей магнитной восприимчивостью, но его объемно центрированная кубическая решетка (ОЦК) снижает магниторезистивный эффект и увеличивает площадь петли гистерезиса; Co – редкий химический элемент, позволяет получить наибольший магниторезистивный эффект и вместе с тем имеет наибольшую коэрцитивную силу; Ni – материал, имеющий очень низкую коэрцитивную силу, но по другим магнитным свойствам уступающий остальным представленным металлам. Их параметры представлены в таблице 1 [14].

Таблица 1 – Параметры ферромагнитных металлов

Металл	T, K	$\Delta\rho/\rho, \%$	$B_{\text{нас}}, \text{Тл}$	n_B	T_K, K
Fe	300	0,2	2,16	2,2	1043
	77	0,3	2,18		
Co	300	1,9	1,79	1,7	1388
Ni	300	2,02	0,61	0,6	631
	77	3,25	0,64		

где T – температура, К;

$\Delta\rho/\rho$ – магниторезистивный эффект, %;

$B_{\text{нас}}$ – магнитная индукция насыщения, Тл;

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.	Горбунцов	В.И.С.			Материалы для АМС и ГМС	Лит.	Лист
Проб.	Головяшкин	Г.И.					Листов
Н.контр.	Рыжова	Р.И.	10.06.24				22
Утв.							113
					гр. 20ПД1		

n_B – число магнетонов Бора на атом;

T_K – температура Кюри, К.

Применение дорогостоящих и редкоземельных ферромагнетиков (самарий, гадолиний и т.п.) и сплавов с их наличием приходится исключить из данного обзора, т.к. они не соответствуют основному критерию выбора материала: относительно высокая магнитная чувствительность при доступной цене производства.

Поэтому чтобы получить наилучший чувствительный магниторезистивный элемент с оптимальным соотношением электрических и магнитных свойств и параметров, и с достаточно низкой стоимостью, логично будет обратить внимание на сплавы из железа, кобальта и никеля, в которых меняя состав, атомарные доли или добавляя примеси, можно добиться получения дешевого и эффективного по всем параметрам и характеристикам магниторезистора.

Наиболее полезным магниторезистивным материалом стал сплав между железом и никелем - $Fe_{20}Ni_{80}$ (пермаллой). Такое соотношение является типичным и позволяет получить наилучшие параметры для магнитного сенсора. Сплав никеля и железа обладает гранецентрированной кубической решёткой. Данный материал широко используется из-за того, что он имеет высокие значения относительной магнитной проницаемости (до 10^5) и малой коэрцитивной силы (~ 80 А/м), его магниторезистивный эффект – около 2,2%, но точные значения зависят непосредственно от толщины слоя. Температура Кюри составляет приблизительно 600 град. Пленки пермаллоя могут быть получены в ходе магнетронного распыления или термического испарения с последующим отжигом в магнитном поле.

Железо-никелевые сплавы можно легировать, например: медью, молибденом, хромом, марганцем, тем самым изменяя их магнитные свойства в широких пределах. В таких получается уже трехкомпонентных сплавах можно значительно улучшить их магнитомягкие свойства, снизить коэрцитивную силу и повысить магнитную проницаемость.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Так, например, медь повышает термостабильность сплава и постоянство магнитной проницаемости в слабом магнитном поле. Марганец уменьшает коэрцитивную силу пермаллоя. Молибден и хром увеличивают магнитную проницаемость и снижают магнитную индукцию насыщения. И при этом все они повышают удельное сопротивление железо-никелевых сплавов [15,16].

В итоге, из-за низкого значения магниторезистивного эффекта и способности насыщаться даже в самых слабых магнитных полях, предпочтительнее применять железо-никелевые сплавы для получения анизотропного магниторезистивного (АМР) эффекта, нежели чем гигантского.

Тот же самый вывод можно дать и сплаву никеля с кобальтом, АМР эффект которого выше, чем у пермаллоя и лежит в диапазоне 3-6%, при условии, что атомарная доля никеля в сплаве составляет 70-75%.

Например, тонкие пленки $Ni_{75}Co_{25}$ (которые также можно напылять по вакуумной технологии) имеют значения констант магнитострикции близкие к нулю, а намагниченность насыщения - около одного магнетона Бора на атом для данного конкретного состава сплава, а магниторезистивный эффект 4%. Коэрцитивная сила при этом составляет около 6 Э (~477 А/м) [17], и здесь железо-никелевый сплав оказывается лучше.

Еще одним широко известным магниторезистивным материалом может выступать сплав между кобальтом и железом - CoFe. Пермендюр отличается от пермаллоя тем, что в составе многослойных структур, например $(CoFe/Cu)_n$, (n – количество слоев) имеет гораздо более сильный магниторезистивный эффект, увеличенную коэрцитивную силу и температуру Кюри приблизительно в 2 раза выше, чем у сплава FeNi. Например у сплава $Co_{90}Fe_{10}$ в многослойной структуре, соответствующие параметры равны 25-35% (в магнитных полях 200-400 Э) и 34 Э. Данные свойства обусловлены высоким содержанием кобальта. Пленочные образцы CoFe также обладают ГЦК-структурой с текстурой [111]. Основные недостатки данного сплава – дороговизна, более сильный гистерезис и также очень серьезная активность в процессах окисления и, как следствие, химическая нестабильность [13,18].

Таким образом, можно сделать вывод, что сплав кобальта с железом можно эффективно использовать для реализации ГМС в многослойных или сэндвич-структурах. Для осуществления АМС, же есть более дешевые сплавы FeNi и NiCo, в которых содержание дорогостоящего кобальта намного меньше или он не используется, а магниторезистивный эффект также составляет единицы процентов и при этом достигается лучшее соотношение других магнитных характеристик.

Также явление ГМС действеннее наблюдать и в гетерогенных системах на базе сплавов, в которых ферромагнитные частицы диспергированы в немагнитной металлической матрице и объединены в однодоменные магнитные фракции. Такими материалами являются тонкие пленки FeAg и CoAg, чья структура является зернистой, и они имеют как гексагональную, так и кубическую гранецентрированную кристаллическую решетки. Параметры гранул определяют макроскопические свойства тонких пленок, а они в свою очередь зависят от технологии осаждения (возможны варианты, как термического испарения, так и магнетронного распыления). Пленочные гранулированные структуры могут иметь магниторезистивный эффект в диапазоне 15-25% при комнатной температуре. Зависимость данного параметра от величины магнитного поля представлена на рисунке 13 [19].

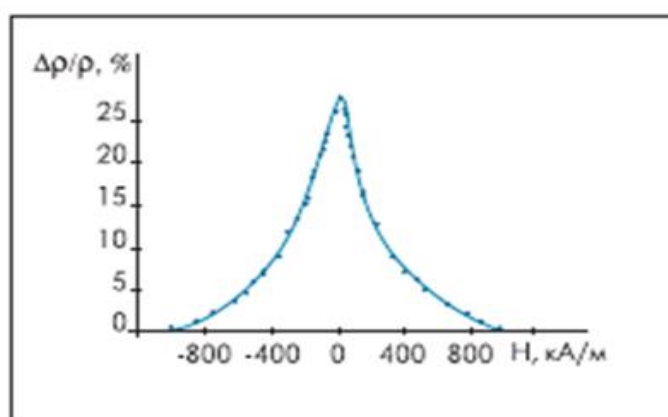


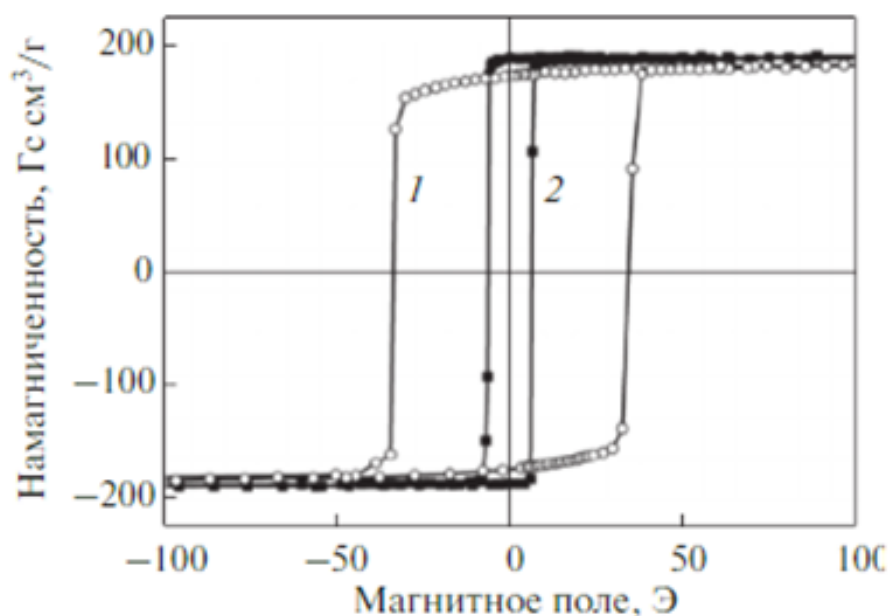
Рисунок 13 - Зависимость $\Delta\rho/\rho$ от напряженности магнитного поля для дважды отожженных образцов $\text{Co}_{38}\text{Ag}_{62}$

Чувствительность магниторезистивных пленок повышается за счет использования слоистых магнитных материалов, демонстрирующих эффект

гигантского магнитосопротивления, вместо одиночной магнитной пленки [20]. Благодаря правильно подобранным композициям и толщинам слоев эти материалы сочетают в себе значительный эффект магнитосопротивления в очень малом интервале магнитного поля, в котором и происходит изменение сопротивления. Поэтому не следует забывать и о пленочных системах на основе фрагментов Fe/Pd, Fe/Cr, Fe/Cu, которые широко применяются для реализации магнитных сенсоров. Сильный интерес представляет тонкие пленки Fe/Pd, в которой палладий, будучи парамагнетиком, может стать ферромагнетиком в присутствии другого ферромагнитного материала. Благодаря ионному обменному взаимодействию он может создать наведенный магнитный момент, который и будет определять вклад атомов в магнитные свойства пленочной системы. Fe/Pd имеет ГЦТ-решетку, с перпендикулярной магнитной анизотропией. Она может позволить реализовать магнитный момент, поперечный к плоскости образца, и в перспективе, решение задач увеличения поверхностной плотности магнитной записи. Получить тонкие пленки можно термическим испарением и последовательным осаждением слоев без ориентирующего магнитного поля в высоком вакууме [21].

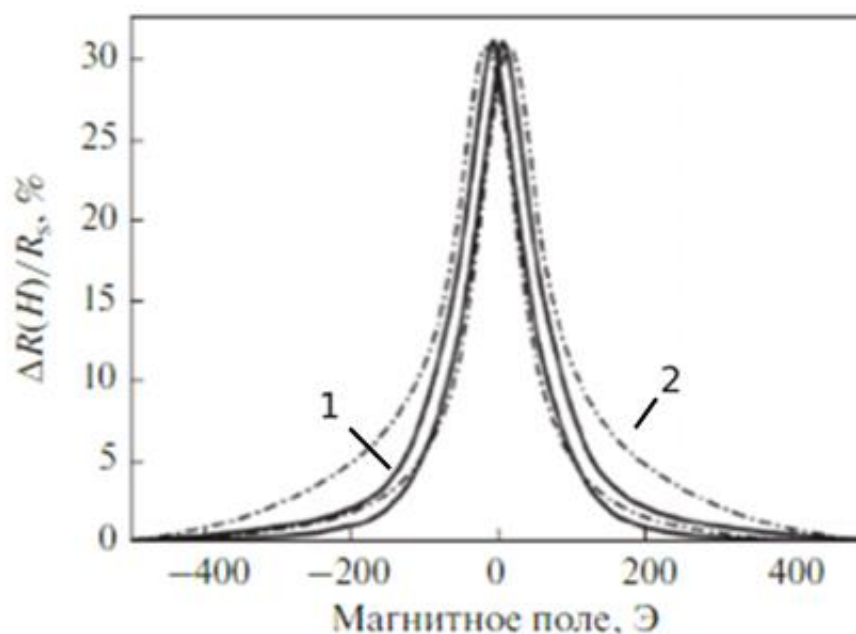
Особый интерес представляют многослойные структуры из тройных ферромагнитных сплавов, состоящих из Co–Fe–Ni. Их использование нацелено на получение высокого магниторезистивного эффекта с слабым гистерезисом и высокой чувствительностью к магнитному полю. Но данные свойства могут изменяться в широком диапазоне, в зависимости от концентраций кобальта, железа и никеля в сплаве. Так было обнаружено, что коэрцитивную силу материала можно снизить, если увеличить процентное соотношение железа и никеля относительно кобальта. Но тут следует иметь в виду, что повышение концентрации Ni, ведет также к уменьшению намагниченности насыщения. Это можно нивелировать повышением концентрации уже Fe, но и тут наблюдается негативный эффект в виде снижения магниторезистивного эффекта и увеличения гистерезиса из-за того, что у сплава CoFeNi будет наблюдаться ОЦК кристаллическая структура, а не ГЦК. В результате среди всех возможных

вариантов, самым оптимальным можно считать сплав $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$. Его коэрцитивная сила составляет порядка 6 Э (это в 5,5 раз меньше, чем у $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$), намагниченность насыщения остается высокой (более $180 \text{ Гс см}^3/\text{г}$), он имеет слабый гистерезис при магниторезистивном эффекте 24-30%. Для наглядности на рисунке 14 приведены петли магнитного гистерезиса $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ и $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$, а на рисунке 15, их зависимости магнитосопротивления от магнитного поля.



1) сплав $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$; 2) сплав $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$

Рисунок 14 - Петли магнитного гистерезиса для пленок сплавов



1) Co₉₀Fe₁₀ – сплошная линия; 2) Co₇₀Fe₂₀Ni₁₀ – штрихпунктирная линия

Рисунок 15 - Полевые зависимости магнитосопротивления

Сплавы CoFeNi имеют ГЦК решетку с текстурой [111] (если концентрация железа менее 25%, в обратном случае будет наблюдаться ОЦК кристаллическая структура) и также могут быть получены методом магнетронного напыления на постоянном токе или термическим испарением [13].

Данный материал является хорошим выбором для реализации ГМС, позволяющий получить высокий магниторезистивный эффект, высокие значения магнитной проницаемости, намагниченности насыщения, низкие значения коэрцитивной силы, за меньшую стоимость из-за меньшей атомарной доли кобальта в сплаве, но при этом его концентрация все равно должна быть преобладающей над никелем и железом. Но CoFeNi также подходит и для эффекта АМС, если снизить атомарную долю кобальта до 10-30%, а у никеля наоборот поднять до 60-75%. Это позволит получить такие же хорошие магнитные свойства и параметры, магниторезистивный эффект в диапазоне 3-4% и снизит стоимость материала.

Параметры других неупомянутых тонкопленочных ферромагнитных сплавов приведены в таблице 2 [14].

Таблица 1 – Параметры ферромагнитных материалов

Сплав	T , К	$\Delta\rho/\rho$, %	$B_{\text{нас}}$, Тл	n_B	T_K , К
$\text{Fe}_{0.9}\text{V}_{0.1}$	273	1.3	1,94	1,9	1100
	77	7,5			
$\text{Ni}_{0.83}\text{Pd}_{0.17}$	293	2.3	1,22	0,6	598
	77	2,1			
$\text{Ni}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}$	293	1.8	0,42	0,4	533
	77	3,3			
$\text{Ni}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}$	293	2.9	0,65	0,64	613
	77	7,2			
$\text{Ni}_{0.95}\text{W}_{0.05}$	293	1,04	0,24	0,27	513
	77	1,03			
$\text{Ni}_{0.95}\text{Mo}_{0.05}$	293	0,34	0,25	0,35	463
	77	0,21			
$\text{Ni}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}$	293	2,6	0,45	0,5	340
	77	5			
$\text{Ni}_{0.69}\text{Fe}_{0.16}\text{Cu}_{0.14}$	20	3,3	0,86	-	-
$\text{Ni}_{0.355}\text{Co}_{0.496}\text{Cu}_{0.153}$	300	3,3	1,1	-	-
$\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{0.163}\text{Mn}_{0.037}$	300	2,2	1,02	-	-
$\text{Ni}_{0.24}\text{Co}_{0.6}\text{Zn}_{0.17}$	300	0,7	-	-	-
$\text{Ni}_{0.87}\text{Fe}_{0.08}\text{Mo}_{0.05}$	300	0,7	-	-	-

где T – температура, К;

$\Delta\rho/\rho$ – магниторезистивный эффект, %;

$B_{\text{нас}}$ – магнитная индукция насыщения, Тл;

n_B – число магнетонов Бора на атом;

T_K – температура Кюри, К.

Для магниторезистивных датчиков, которые имеют в своей структуре смещающие и магниторезистивные слои в качестве подложек могут использоваться такие материалы как: монокристаллический кремний (является наиболее желательным т.к. это позволяет интегрировать кроме магниторезистора еще и другие схемотехнические полупроводниковые элементы), керамика, ситалл, стекло, подложки состава Al_2O_3 . Данные материалы должны обладать высокой теплопроводностью, а также коэффициентом термического расширения (ТКР), близким по величине к ТКР используемых плёнок.

Для реализации датчиков магнитного поля и датчиков тока необходимо иметь непосредственно сам источник магнитного поля, который может создать планарное магнитное поле подмагничивания (смещения) магниторезистивной пленки. Данный эффект приводит к исчезновению шумов, связанных со скачками Баркгаузена при работе датчика, также можно сместить рабочую точку до оптимизированной величины поля, чтобы обеспечить хорошую температурную стабильность и линейность параметров и характеристик. Магнитное смещение можно реализовать посредством осаждения на обратной стороне подложки магнитотвердой пленки, намагниченной до насыщения.

Очень высокие значения коэрцитивной силы и остаточной намагниченности имеют сплавы тонких пленок редкоземельных металлов. Но использование их в данной работе приходится исключить из-за того, что такие металлы отличаются высокой стоимостью. Кроме, например, дорогостоящего кобальта, который находится в составе данных структур, еще одним серьезным минусом представляется использование сильно окисляющихся самария и неодима. Устранение же данного недостатка у редкоземельных компонентов возможно при создании сверхвакуумных условий (до 10^{-9} Па) при их магнетронном напылении. Также все больше находят применения пленки подмагничивания на основе сплавов, содержащих платину, но их использование автоматически приводит к повышению стоимости мишени магнетронного источника.

Поэтому альтернативой таким соединениям можно использовать магнитные пленки на основе деформируемых сплавов Fe-Cr-Co. Высокие магнитные свойства этих сплавов достигаются путем дисперсионного упрочнения за счет спинодального разложения пересыщенного твердого раствора, которое происходит в процессе отжига. Нанесение пленок Fe-Cr-Co возможно с помощью технологии магнетронного распыления. Такой сплав может иметь высокую коэрцитивную силу только после отжига, который нужен для реализации спинодального распада пересыщенного твердого раствора. При этом возможно разрушение контакта пленки с подложкой из кремния, поэтому

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

в данной структуре необходимо применять адгезионный слой из хрома или ванадия, которые обладают хорошими адгезионными свойствами, как к кремнию, так и к его оксиду.

На рисунках 16-17 проиллюстрированы петли гистерезиса после получения пленки Fe-Cr-Co и после отжига. На данных рисунках можно увидеть, что после отжига, коэрцитивная сила достигла значения с 79 до 382 Э, что является показателем, характерным для магнитотвердых составов, приведенных в ГОСТ 24897-81 [22].

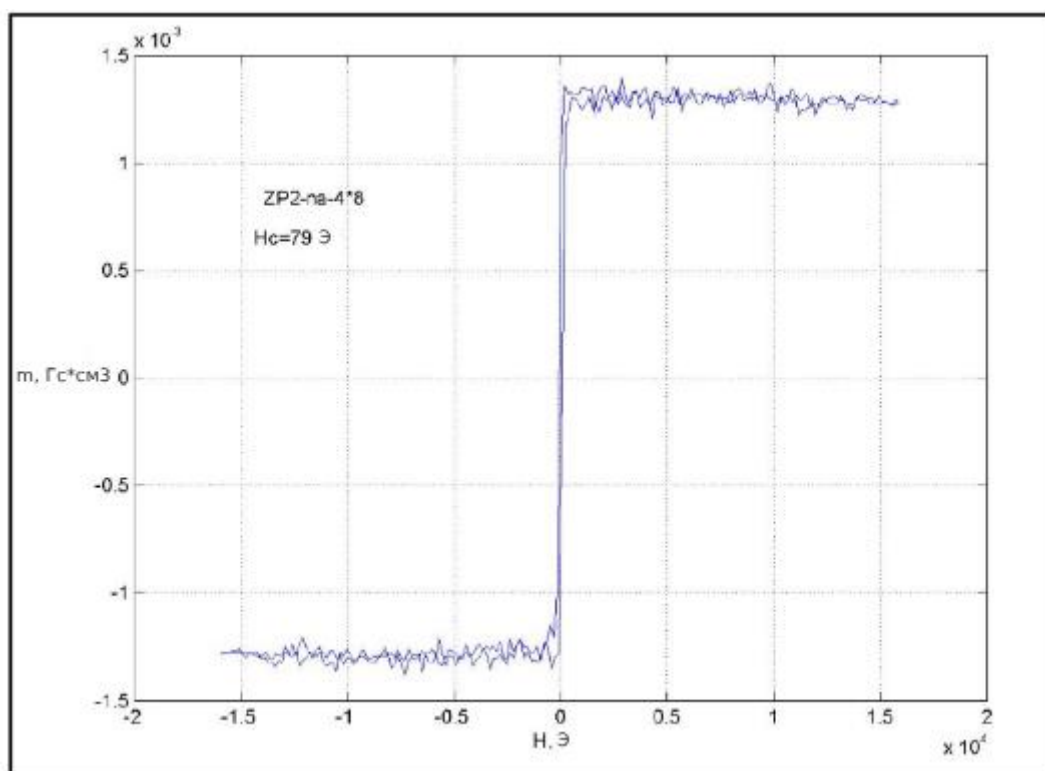


Рисунок 16 - Петля гистерезиса многослойной пленки, содержащей дисперсионно твердеющий слой, после напыления

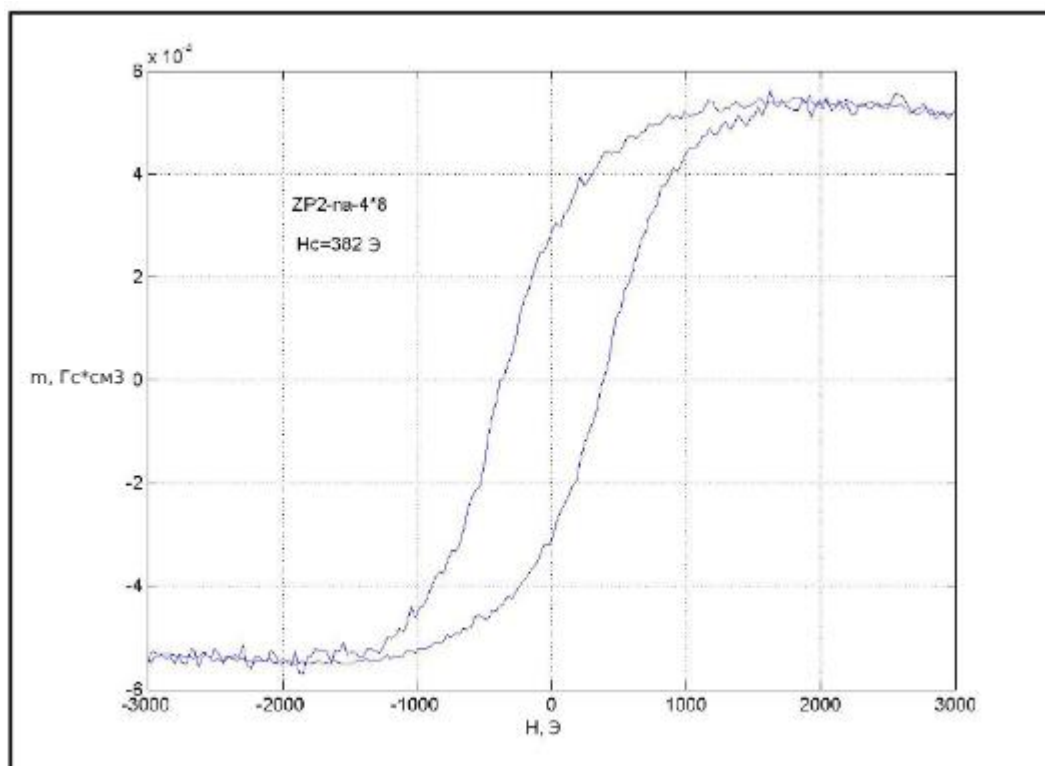


Рисунок 17 - Петля гистерезиса многослойной пленки, той же структуры, показанной на рисунке 15, после отжига

В качестве области раздела ферромагнитных слоев в сэндвич-структуре, реализующей ГМС, наиболее подходят немагнитные металлы с высокой электрической проводимостью, такие, как Cu, Ag, Mo, Cr и Au. Наиболее распространенным немагнитным материалом, разделяющим ферромагнетики в изготовленных конструкциях, является медь. Среди немагнитных металлов он характеризуется высокой электропроводностью ($5,96 \times 10^7$ См при 20 град.). Этот материал также относительно дешев и очень распространен. Чистота меди составляет 99,99%. Немагнитный слой играет важную роль в магнитных разделительных слоях, подвергающихся перемангничиванию. Его толщина имеет прямое отношение к расстоянию между ферромагнитными слоями. Он должен быть достаточно тонким, чтобы обеспечить возможность антиферромагнитного соединения, но не слишком тонким, чтобы перемангничивание слоев могло происходить в достаточно слабом магнитном поле [23]. Типичные значения толщин, при которых реализуют немагнитные пленки многослойных магниторезистивных структур 20-40 ангстрем, т.к. в этом случае остается возможным легко контролировать толщину пленки,

обеспечиваются низкие значения коэрцитивной силы (рисунок 18), сопротивление все еще определяется ферромагнетиком, соответственно остается высоким коэффициент магнитосопротивления (рисунок 19). С другой стороны отсутствует гистерезис в рабочем диапазоне магниторезистивного устройства и большое магнитное взаимодействие между ферромагнетиками, и непосредственный магнитный контакт [24].

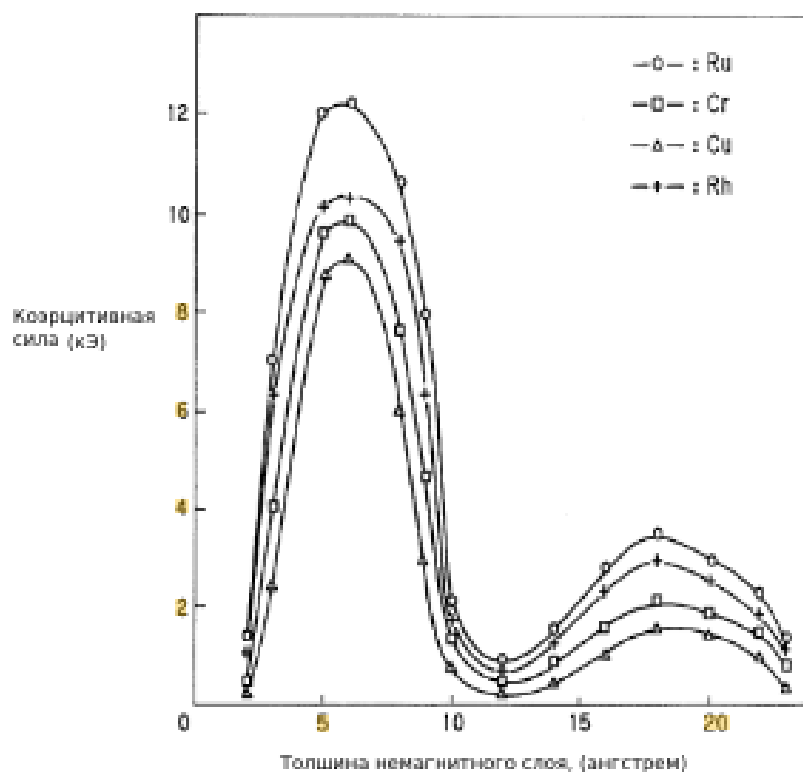


Рисунок 18 - Зависимость коэрцитивной силы от толщины разделяющего немагнитного слоя

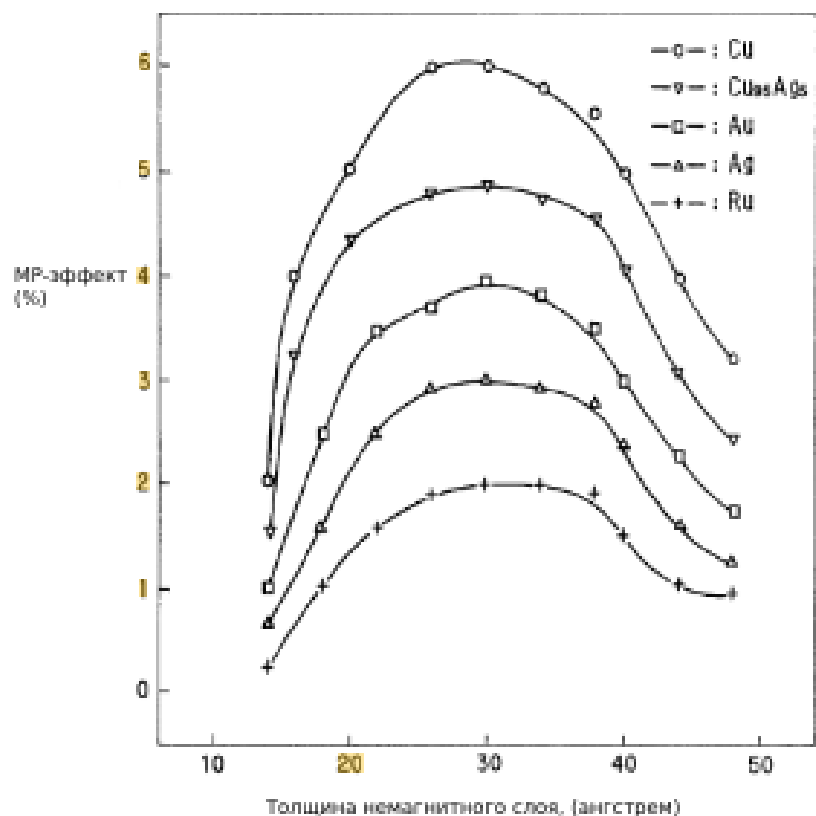


Рисунок 19 - Зависимость магниторезистивного эффекта от толщины немагнитного слоя на примере различных металлов

Таким образом, основное назначение слоя - магнитно изолировать последующие слои и не нарушать траекторию электронов.

В случае если структурой магниторезистивного элемента является спиновой вентиль необходимо уже существующей сэндвич-структуре добавить дополнительный обменный слой антиферромагнетика, который будет удерживать намагниченность в одном направлении у «зафиксированного» (*to pin*) ферромагнетика даже в отсутствии внешнего магнитного поля, т.е. многослойная тонкопленочная магниторезистивная наноструктура становится магнитоанизотропной. Более того, после отключения магнитного поля, перемагнитившего этот жесткий ферромагнетик, он возвращается в исходное состояние [25].

Сплав $Mn_{75}Ir_{25}$ имеет довольно значительную температуру Нееля - 427 град. (выше которой антиферромагнетик теряет свои специфические магнитные свойства и превращается в парамагнетик), что превосходит данные показатели других антиферромагнетиков. Его температура блокировки (при которой

исчезает обменный сдвиг петли гистерезиса пиннингованного ферромагнетика) в структуре спинового клапана имеет значение в диапазоне 250-300 град., варьирующееся в зависимости от толщины антиферромагнитного слоя. Недостаток этого сплава – входящий в состав редкий и дорогостоящий иридий, и соответственно повышение стоимости магнитного датчика.

Самым простым в изготовлении является антиферромагнитный сплав $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$. У этого антиферромагнетика низкая температура Нееля, равная 217 град. и низкая температура блокировки, лежащая в диапазоне 120-190 град., а спиновый клапан, изготовленный из него, имеет низкую температурную стабильность. Если применять в качестве антиферромагнетика выше перечисленные сплавы, можно получить обменный сдвиг сразу уже после того, как будет произведено их напыление в магнитном поле.

В свою очередь использование оксидных антиферромагнитных материалов, таких как NiO , NiCoO , NiO/CoO , способствует значительному увеличению гигантского магниторезистивного эффекта и сокращает количество слоев, участвующих в формировании этого эффекта.

Для достижения обменного сдвига в спиновых клапанах, изготовленных на основе антиферромагнитных материалов MnPt , MnNi и MnPd , технология их изготовления должна предусматривать процесс отжига и последующее охлаждение в магнитном поле. Например, соединение MnPt после длительного отжига при температуре 260 град. повышает свою температуру блокировки до 350-400 град. [26-31].

Итогом можно считать, что для эффективного в плане чувствительности и стоимости магнитного датчика, работающего на явлениях ГМС и АМС, применяются ферромагнитные магнитомягкие металлы: железо, никель и кобальт. Но использование отдельных элементов не позволит добиться наилучших параметров у магнитных сенсоров, поэтому нужно применять сплавы из ферромагнетиков.

Для реализации АМС, наверное, самым лучшим ферромагнитным сплавом будет сплав между железом и никелем, а именно $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$, хорошие

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

магнитные свойства и достаточно низкая стоимость которого довольно привлекательны для использования его в магнитных сенсорах для детектирования слабых магнитных полей.

Для ГМС отлично подходят сэндвич-структуры, состоящие из ферромагнитных сплавов с высоким содержанием кобальта. Например, сплав $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ или более дешевый $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ с малой коэрцитивной силой, высокой намагниченностью насыщения, слабым гистерезисом.

В качестве области раздела ферромагнитных слоев, реализующих ГМС, хорошо подходит дешевая и высокоэлектропроводная медь.

В случае структуры спиновой вентиль для реализации дополнительного обменного слоя антиферромагнетика, самым простым в изготовлении и эффективным по свойствам является антиферромагнитный сплав $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$.

В качестве источника магнитного поля, который может создать планарное магнитное поле подмагничивания (смещения) магниторезистивной пленки подойдет Fe-Cr-Co.

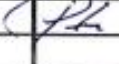
Теперь, после нахождения материалов с наилучшими характеристиками нужно определиться с конструкцией элементов магниторезистивных датчиков и технологией изготовления, сохраняющие оптимальные магнитные и магниторезистивные параметры.

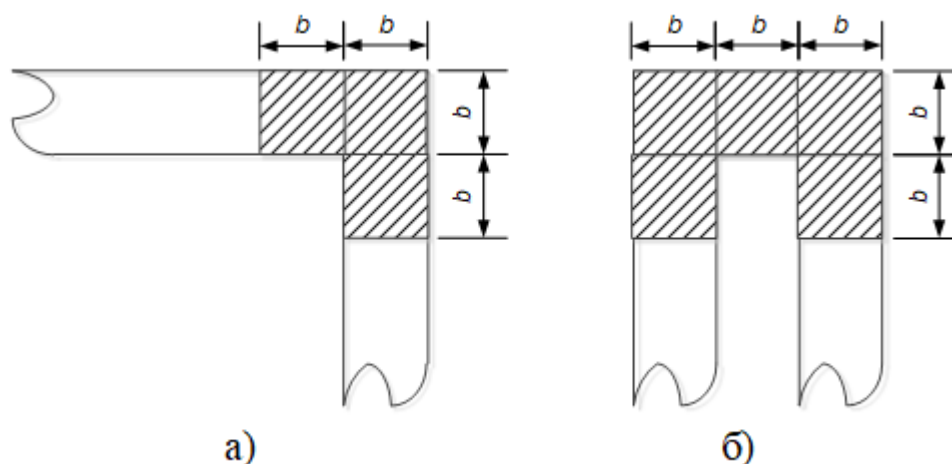
3 Расчет и проектирование магниторезистивных элементов

3.1 Конструкции магниторезистивных элементов

Основным критерием выбора конструкции магниторезистивного элемента будет то, что его длина должна иметь максимальную величину и значительно превышать ширину. Соответственно коэффициент формы K_f резистора определенно точно получит значения больше 10. Отсюда можно сделать вывод, что магниторезистивные элементы будут иметь сложную форму. В данной работе рассмотрим 3 типа конструкций резисторов сложной формы.

Первым, и, наверное, самым распространенным типом является меандр. Его широкое применение обусловлено простотой изготовления фотошаблонов и масок, а также простотой расчетов и их высокой точности. Недостатком такой конструкции, как в принципе у любой другой, если говорить о резисторах сложной формы, это пониженные значения стабильности и надежности работы элемента из-за больших значений градиента плотности тока в местах изгиба резистивной тонкой пленки. Неравномерность плотности электрического тока приводит к сильному изменению сопротивления магниторезистора, а также приводит к повышенному выделению мощности на внутренних углах в области изгибов, что в свою очередь приводит к нагреву этих участков и в дальнейшем, может привести к их разрушению. В случае магниторезисторов эта неравномерность еще может привести к возникновению магнитных неоднородностей, которые приведут к возникновению гистерезису рабочей характеристики. Данное явление можно наблюдать в пределах 3 квадратов области изгиба под углом 90 град для Г-образных и 5 квадратов – для П-образных изгибов меандра (рисунок 20).

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Расчет и проектирование магниторезистивных элементов	Лист	Лист	Листов
Разраб.		Горбунцов						
Пров.		Головяшкин					37	113
Н.контр.		Рыжова		10.06.04		гр. 20ПД1		
Утв.								



а) Г-образный изгиб; б) Π-образный изгиб

Рисунок 20 - Конструкции изгибов плёночных резисторов типа меандр

Соответственно вторым типом конструкции резистора, направленным на максимальное снижение негативных явлений, ярко выраженных у меандра, является конструкция типа «змейка». В отношении параметров стабильности и надежности данная конфигурация намного превосходит меандр, т.к. за счет радиальной формы изгибов (рисунок 21), на них достигается уменьшение неравномерности плотности тока, из-за чего сокращение электрической длины резистора менее существенно, если сравнивать с тем же меандром, и соответственно менее существенно изменение его сопротивления. Основная же проблема использования данной формы резистивной тонкой пленки - это высокая сложность реализации фотошаблонов и масок, и не получится достигнуть высокой точности расчетов. «Змейку» также можно модифицировать, например, оставить внутренний угол радиальным, т.к. именно он будет определять сопротивление магниторезистора, а вот внешний угол сделать Π-образным, это немного упрощает изготовление фотошаблонов и масок [32].

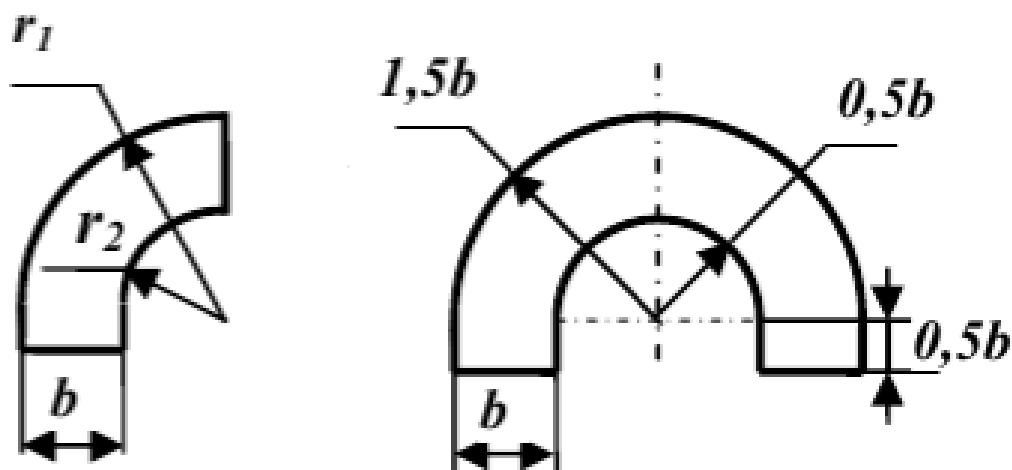


Рисунок 21 - Конструкции изгибов плёночных резисторов типа «змейка»

Исходя из всего этого, для относительного сохранения основных достоинств конфигураций пленочных резисторов типа меандр и «змейка» и для устранения их основных недостатков в данной работе предлагается использовать конструкция с изгибом под углом 45 град., представленная на рисунке 22.

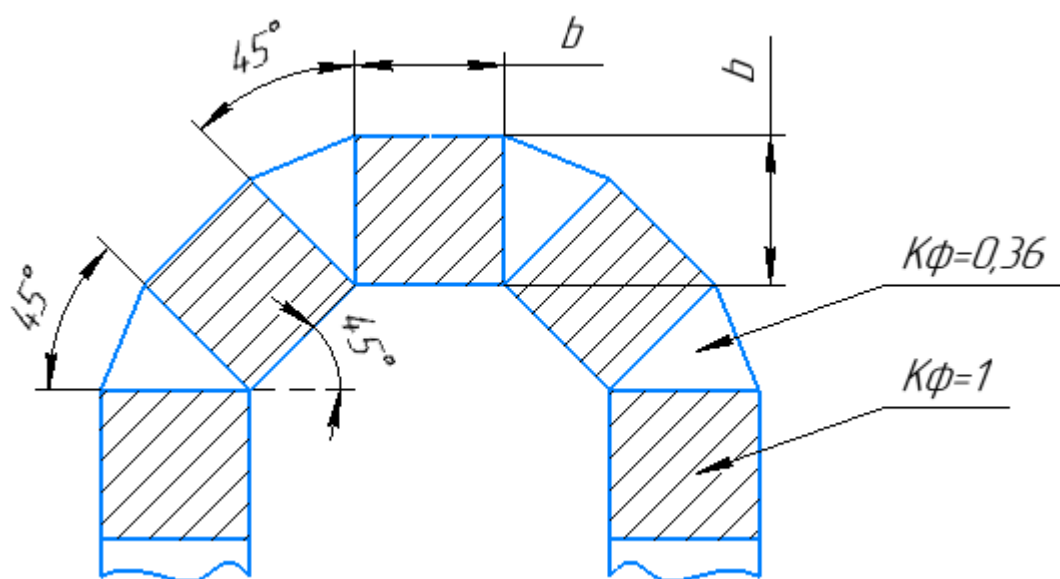


Рисунок 22 - Конструкции изгибов плёночных резисторов, выполненных под углом 45 град

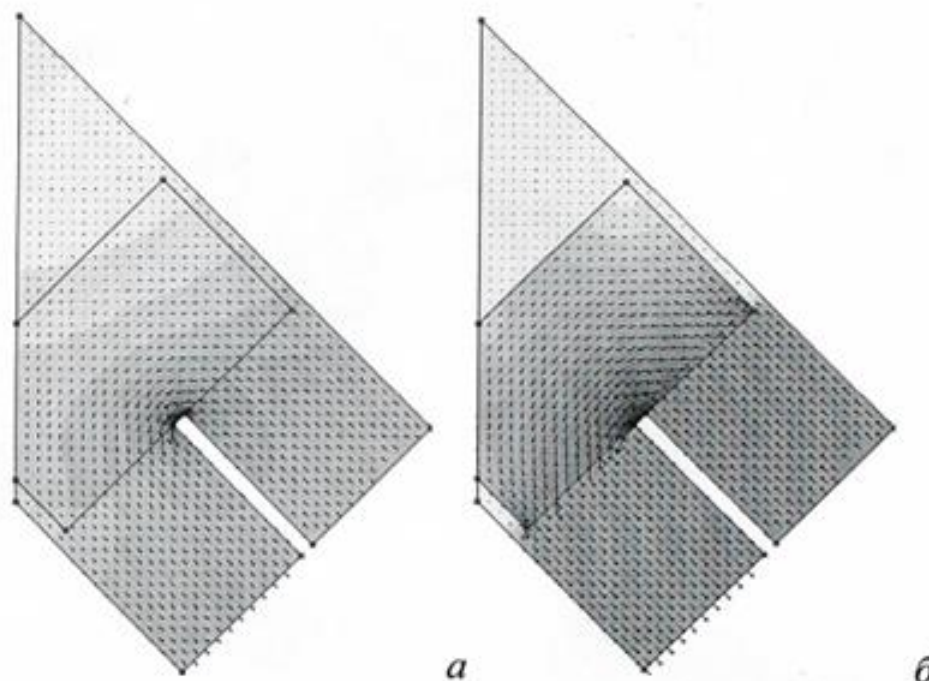
Данная форма тонкопленочного резистора должна позволить сохранить баланс между простотой реализации фотошаблонов и масок и низким значением градиента плотности электрического тока на изгибах за счет отсутствия у них углов в 90 град и радиальных углов. К тому же такая

конструкция немного, но все же увеличивает длину участков, чувствительных к направлению магнитного поля.

Недостатком данной формы можно считать увеличение занимаемой площади такого резистора на подложке, из-за увеличения расстояния между его прямолинейными участками. Но это увеличение составляет всего 15-18%, что является вполне допустимым. Расчет величины сопротивления в таком случае должен быть проведен с особенностью распределения потенциала в магниторезисторе.

Существует также еще один довольно интересный способ устранения неравномерного распределения плотности тока в тонкопленочных резисторах. Это применение низкоомных шунтирующих аппликаций (шунтирование может быть осуществлено, например слоем хром-медь-хром). Их нанесение на изгибы резистора сложной формы позволяет избавиться от неоднородности распределения плотности тока (как показано на рисунке 23), что оставляет возможность применения в качестве элемента магниторезистивного датчика легко воспроизводимую конструкцию «меандр», недостатки которой теперь фактически устранены. Но, не смотря на такую довольно хорошую идею применения аппликаций, их реализация все-таки связана с рядом существенных проблем. Кроме того, что это усложняет технологический процесс формирования магниторезистивного элемента, есть шанс замыкания аппликацией соседних полосок меандра, т.к. точность изготовления резисторов типа «меандр» или той же «змейки» не превышает 20%, особенно если используется масочный метод напыления резисторов, технологические ограничения которого больше, чем например, фотолитографический или электронно-ионный методы [33].

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



а) отсутствие аппликации; б) наличие аппликации

Рисунок 23 - Схема распределения плотности тока (стрелки) в изгибе меандра

3.2 Алгоритм расчетов магниторезистивных элементов

Исходными данными для расчетов тонкопленочных резисторов являются:

- номинал резистора;
- допуск на номинал;
- мощность рассеяния;
- технологические ограничения;
- диапазон рабочих температур.

Как уже ранее подмечалось, элементы магниторезистивных датчиков имеют сложную форму с $K_f > 10$, точность воспроизведения которых не очень высокая. Поэтому для формирования пленки магниторезистора будем считать, что используется фотолитографический метод, который хоть и более сложен в реализации, чем масочный метод. Технологические ограничения обоих методов приведены в таблице 3 [34].

Таблица 3 – Технологические ограничения масочных и фотолитографических методов формирования резисторов

Содержание ограничения	Масочный метод		Фотолитографический метод	
Минимально допустимые расстояния между пленочными элементами, расположенными в одном слое, a , мм	0,3		0,1	
Перекрытия для совмещения пленочных элементов, расположенных в разных слоях, e , мм	0,2		0,1	
Точность изготовления линейных размеров пленочных элементов и расстояний между ними, мм	Длина, l	Ширина, b	Длина, l	Ширина, b
	0,01	0,01	0,01	0,01
Минимально допустимый размер резистора, мм	0,3	0,1	0,1	0,1

Так как форма магниторезистора уже известна, конструктивный расчет состоит из нахождения геометрических размеров резистора и его минимальной площади, занимаемой на подложке.

Последовательность проведения расчетов тонкопленочных резисторов, согласно [34] имеет следующий вид:

1. Выбор материала по оптимальному сопротивлению квадрата пленки резистора $\rho_{s(опт)}$. Удельное поверхностное электрическое сопротивление находится по формуле (3).

$$\rho_{s(onm)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j R_i}{\sum_{i=1}^j \frac{1}{R_i}}} \quad (3)$$

где R_i – номинал i -го резистора, Ом; j – число резисторов в схеме

После определения оптимального сопротивления квадрата пленки, находят материал с ρ_s значение которого ближе всех к значению $\rho_{s(опт)}$, а также обладает минимальным ТКС и максимальной удельной мощностью рассеяния.

2. Проверяется правильность выбора материала, с помощью нахождения суммарной относительной погрешности γ . Она определяется как сумма погрешностей конструкции, условий изготовления и эксплуатации, по формуле (4).

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R} = \gamma_{K\phi} + \gamma_{\rho s} + \gamma_{Rt} + \gamma_{Rcn} + \gamma_{Rk} \quad (4)$$

где $\gamma_{K\phi}$ – погрешность коэффициента формы, %; $\gamma_{\rho s}$ – погрешность воспроизведения величины ρ_s резистивной пленки, %; γ_{Rt} – температурная погрешность, %; γ_{Rcn} – погрешность, которая обусловлена старением пленки, %; γ_{Rk} – погрешность переходных сопротивлений контактов, %.

В свою очередь температурная погрешность определяется по формуле (5):

$$\gamma_{Rt} = \alpha_R \times (T_{max} - 20) \times 100 \quad (5)$$

где α_R – ТКС материала 1/град.; T_{max} максимальная рабочая температура, град.

Зависящая от геометрических размеров резистора погрешность коэффициента формы будет находиться по формуле (6).

$$\gamma_{K\phi} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b} \quad (6)$$

где l и b – длина и ширина резистора, мм; Δl и Δb – их абсолютные погрешности воспроизведения соответственно, мм.

Также стоит отметить, что недопустимо иметь отрицательное значение погрешности коэффициента формы, т. к. это означает, что изготовление тонкопленочного резистора с заданной точностью невозможно.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Погрешность, обусловленная старением пленки, обычно не превышает 3%. Погрешность переходных контактов же обычно составляет 1-2%. Погрешность воспроизведения удельного сопротивления резистивной пленки в условиях серийного производства в свою очередь не превышает 5%.

3. Конструкцию резисторов определяет важный параметр – коэффициент формы. Его возможно рассчитать по формуле (7).

$$K_{\phi} = \frac{R}{\rho_s} = \frac{l}{b} \quad (7)$$

4. Далее расчет проводится в зависимости от формы тонкопленочного резистора. Для тонкопленочных резисторов сложной формы он выглядит следующим образом:

Определяется расчетное значение ширины резистора $b_{\text{расч}}$, которое определяется из условия формулы (8).

$$b_{\text{расч}} \geq \max \{b_{\text{точн}}, b_{\text{техн}}, b_p\} \quad (8)$$

где $b_{\text{техн}}$ – минимальная ширина резистора, определяемая возможностями технологического процесса, мм; приведена в таблице 3. $b_{\text{точн}}$ – ширина резистора, определяемая точностью изготовления, мм, находится по формуле (9).

$$b_{\text{точн}} = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{K_{\phi}}}{\frac{\gamma_{\text{кф}}}{100}} \quad (9)$$

b_p – минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается заданная мощность, мм, рассчитывается по формуле (10).

$$b_p = \sqrt{\frac{P}{P_0 \times K_{\phi}}} \quad (10)$$

где P – мощность рассеяния резистора, Вт; P_0 – мощность рассеяния материала, Вт/мм².

После определения расчетной ширины рассчитывается средняя длина резистора сложной формы $l_{\text{ср}}$, по формуле (11).

$$l_{cp} = b_{расч} \times K_{\phi} \quad (11)$$

Затем задается расстояние a между резистивными полосками. С учетом технологических ограничений фотолитографического метода минимально допустимые расстояния между пленочными элементами, расположенными в одном слое, $a_{\min}=0,1$ мм. Но для обеспечения требуемой жесткости маски должно выполняться условие $B_{\max}/a \leq 10$, для фотолитографии данное условие не важно. Шаг одного звена t находится по формуле (12).

$$t = a + b_{расч} \quad (12)$$

Далее определяется оптимальное число звеньев резистора сложной формы $n_{\text{опт}}$, согласно условию, минимальной площади тонкопленочного резистора, по формуле (13).

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{l_{cp}}{t} \times \frac{B}{L}} \quad (13)$$

где B и L ширина и длина резистора сложной формы соответственно, мм.

Значение $n_{\text{опт}}$ округляется до ближайшего целого. После этого находятся габаритные размеры резистора. Длина L и ширина B рассчитываются по формулам (14) и (15) соответственно.

$$L = n_{\text{опт}} \times t \quad (14)$$

$$B = \frac{l_{cp} - a \times n_{\text{опт}}}{n_{\text{опт}}} \quad (15)$$

Габаритная площадь резистора S рассчитывается по формуле (16).

$$S = L \times B \quad (16)$$

5. Уточненный расчет резистора с учетом неравномерности плотности тока в изгибах. Расчет величины сопротивления проводится с особенностью распределения потенциала в магниторезисторе и находится как сумма сопротивлений его прямолинейных участков и сопротивлений его изгибов, по формуле (17).

$$R_{расч} = (m \times R_{изг}) + \left(\frac{l_n}{b_{расч}} \times n_{\text{опт}} \times \rho_s \right) \quad (17)$$

где $R_{изг}$ – сопротивление изгибов, Ом; m – количество изгибов с учетом приконтактных областей; $l_{п}$ – длина прямолинейного участка резистора сложной формы, мм.

Топология изгибов проектируемого магниторезистора соответствует той, что приведена на рисунке 20. Форма изгиба под углом 45 град позволяет сохранить оптимальное соотношение: простота изготовления и низкая неравномерность плотности электрического тока. Сопротивление трапециевидно-образных изгибов находится по формуле (18).

$$R_{изг} \approx (w + 0,18v) \times \rho_s \quad (18)$$

где w – число квадратов с $K_{\phi}=1$, из которых состоит изгиб резистора; v – число треугольников с $K_{\phi}=0,36$, из которых также состоит изгиб резистора.

Значение коэффициента 0,18 стоящего перед значением v приблизительно показывает часть такого треугольника, которая эффективно участвует в прохождении тока через него, получено моделированием трапециевидно-образного изгиба в САПР «COMSOL Multiphysics». Результаты моделирования были проверены эмпирическим путем:

На ситалловые подложки напылялся один резистор из низкоомного материала (сплав РС-3710) сложной формы с тремя трапециевидно-образными изгибами, чтобы результат имел статистический характер. Полное сопротивление R такого резистора у каждого из образцов было известно. Сопротивление прямолинейных участков $R_{прям}$ в принципе можно считать известным и равным $K_{\phi} \times \rho_s$, но сильную погрешность в измерения давали переходные сопротивления областей контактов резистивной и проводящей пленок R_k . Чтобы вычленить эту погрешность, рядом с резистором с $K_{\phi}>10$ напылялись несколько простых прямоугольных резисторов, с геометрией прямолинейных участков сложного, как показано на рисунке 24. Несколько резисторов нужны были опять таки для статистического характера нахождения R_k , и как еще известно, резисторы, напыленные близко друг к другу имеют близкие значения сопротивления, что позволит дать приблизительно одинаковые результаты. Сопротивление полоскового резистора также известно,

и состоит только из суммы $R_{\text{прям}}$ и $2R_k$. Отсюда легко найти R_k . Зная такие составляющие полного сопротивления резистора сложной формы, как $R_{\text{прям}}$ и R_k , у изгибов можно было найти коэффициент формы. Таким образом, были получены три образца, у которых значение этого коэффициента лежало в диапазоне 0,16-0,2 из которого было выбрано среднее значение 0,18. Параметры реализованного технологического процесса представлены ниже:

- давление остаточного газа – 10^{-5} мм рт. ст.;
- ток испарителя – 10 А;
- напряжение испарителя – 4 В;
- время напыления – 60 с.

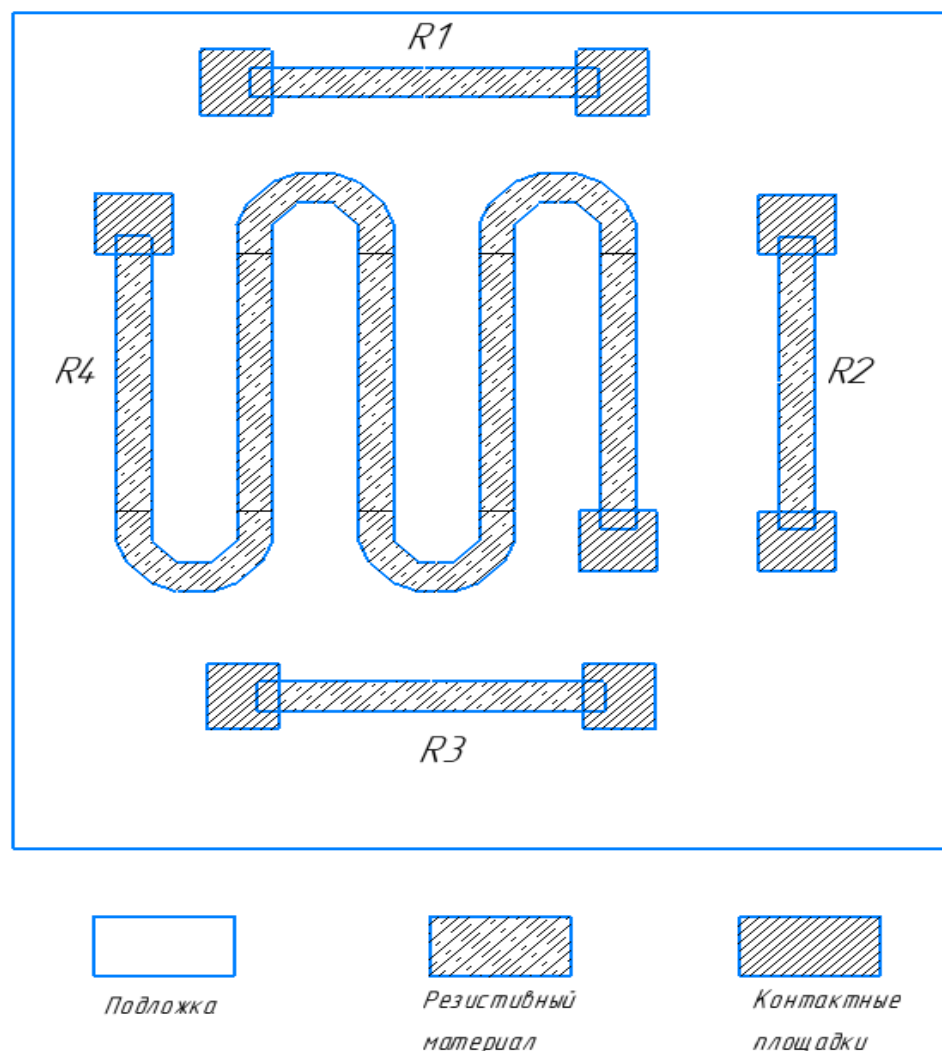


Рисунок 24 - Топология для экспериментального измерения коэффициента формы трапециевидно-образного изгиба

6. Заканчиваются расчеты пленочного резистора проверкой расчетов нескольких параметров, по формулам (19)-(22).

Действительная удельная мощность $P_{\text{дейст}}$ должна быть меньше удельной допустимой мощности рассеяния P_0 .

$$P_{\text{действ}} = \frac{P}{S} \quad (19)$$

Действительная допустимая погрешность коэффициента формы $\delta_{\text{Кф}}$ должна быть меньше удельной допустимой погрешности коэффициента формы.

$$\delta_{\text{Кф}} = \left[\left(\frac{\Delta l}{a} \right) + \left(\frac{\Delta b}{b_{\text{расч}} \times n_{\text{онм}}} \right) \right] \times 100 \quad (20)$$

Действительное допустимое отклонение сопротивления резистора δ_R должно быть меньше допустимого отклонения сопротивления резистора от номинала.

$$\delta_R = \delta_{\text{Кф}} + \gamma_{\rho s} + \gamma_{Rt} + \gamma_{Rcc} + \gamma_{Rk} \quad (21)$$

Проверка точности расчета номинала. Относительная погрешность номинального значения должна быть $\gamma_r \leq 0,5 \%$.

$$\gamma_r = \left(\frac{|R_{\text{расч}} - R|}{R} \right) \times 100\% \quad (22)$$

На этом расчет тонкопленочного резистора можно считать завершенным и можно делать выводы, о возможности его проектировании с заданными параметрами.

Для примера приведем расчет одиночного тонкопленочного магниторезистора со следующими параметрами: номинальное сопротивление (в отсутствии магнитного поля) $R=2300$ Ом; допуск $\gamma=15\%$; мощность рассеяния $P=0,05$ Вт. Магниторезистивным материалом будет выступать дешевый, доступный и распространенный сплав $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$. Его параметры необходимые для расчета приведены в таблице 4 [14, 35-36].

Таблица 4 – Основные параметры $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ в качестве тонкопленочного резистора

Параметры	Символ	Числовое значение
Удельное сопротивление, мкОм×м	ρ	0,36..0,44
Толщина пленки, нм	d	10
Модуль ТКС, 1/град	α_r	$(0,5..3,3) \times 10^{-3}$
Удельная допустимая мощность рассеяния, Вт/мм ²	P_0	$(10..30) \times 10^{-3}$
Максимальная температура, град	$T_{\max}$	125

Стоит отметить, что большинство электрических параметров тонкопленочного пермаллоя зависит от множества различных условий, начиная от точного химического состава материала и толщины пленки и заканчивая особенностями процесса напыления. Поэтому определенные параметры имеют определенные диапазоны значений, из которых для расчета будут браться их среднее.

1. Т.к. материал уже выбран, пункт №1 алгоритма расчетов тонкопленочного резистора можно пропустить и вместо него найти по формуле (23) [36] сопротивление квадрата пленки резистора ρ_s пермаллоя.

$$\rho_s = \frac{\rho}{d} \quad (23)$$

где ρ – удельное сопротивление материала, Ом×м; d – толщина пленки, м

$$\rho_s = \frac{0,4 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-9}} = 40 \text{ Ом}/\square$$

2. Проверим правильность выбора материала, с помощью нахождения составляющих суммарной относительной погрешности γ .

Погрешность воспроизведения величины ρ_s резистивной пленки $\gamma_{\rho s}$, в условиях серийного производства имеет среднее значение в 2,5%. Средние значения погрешности, обусловленной старением пленки γ_{Rct} и погрешности переходных сопротивлений контактов γ_{Rk} одинаково приблизительно составляют 1,5%. Температурную погрешность γ_{Rt} рассчитаем, используя формулу (5).

$$\gamma_{Rt} = 1,9 \times 10^{-3} \times (125 - 20) \times 100 = 19,95 \%$$

Погрешность коэффициента формы $\gamma_{K\phi}$ определим, выведя ее из формулы (4).

$$\gamma_{K\phi} = 15 - 2,5 - 19,95 - 1,5 - 1,5 = -10,45 \%$$

Отрицательное значение погрешности коэффициента формы означает, что создание тонкопленочного резистора с заданной точностью невозможно из-за слишком высокого значения ТКС. В таком случае температурную погрешность в этом расчете исключим, и подберем диапазон минимальной и максимальной температуры, при которой возможно реализовать резистор. Из [37] следует, что диапазон рабочих температур пермаллоя, при котором не наблюдается сильного изменения сопротивления, будет от -40 до +65 град., для него и будем вести дальнейшие расчеты. Если требуется применять магниторезистор из пермаллоя в любом другом увеличенном диапазоне рабочих температур, в таком случае нужно осуществлять иную конструкцию резистора с отрицательным допуском на номинал и с иным типом расчетов для допусков, необходимые для подгонки или применять дополнительно схемы термокомпенсации, что в данной работе не рассматривается.

Пересчитаем значение погрешности коэффициента формы.

$$\gamma_{K\phi} = 15 - 2,5 - 1,5 - 1,5 = 9,5 \%$$

Теперь положительное значение $\gamma_{K\phi}$ говорит о том, что с данным допуском изготовить резистор возможно.

3. По формуле (7) рассчитаем коэффициент формы K_{ϕ} и убедимся, что данный резистор будет иметь сложную форму.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$K_{\phi} = \frac{2300}{40} = 57,5$$

Коэффициент формы резистора лежит в диапазоне значений $10 < K_{\phi} < 100$, соответственно выполняется основной критерий магниторезистивного элемента: длина должна иметь максимальную величину и значительно превышать ширину

4. Далее найдем и сравним 3 значения ширины квадрата магниторезистивной пленки. Минимальная ширина резистора $b_{\text{техн}}$, согласно таблице 3 составляет 0,1 мм. Ширину резистора, определяемую точностью изготовления $b_{\text{точн}}$ найдем с помощью формулы (9).

$$b_{\text{точн}} = \frac{0,01 + \frac{0,01}{57,5}}{\frac{9,5}{100}} = 0,107 \text{ мм}$$

Минимальную ширину резистора, при которой обеспечивается заданная мощность b_p , рассчитаем с помощью формулы (10).

$$b_p = \sqrt{\frac{0,05}{0,02 \times 57,5}} = 0,209 \text{ мм}$$

Исходя из полученных данных, и согласно условию из формулы 7 в качестве расчетной ширины резистора будет выступать значение b_p . Полученное значение 0,209 мм необходимо округлить в большую сторону, которое должно быть кратно шагу координатной сетки чертежа топологии с учетом масштаба. Шаг координатной сетки составит 1 мм, масштаб 20:1, соответственно округлять необходимо до величины, кратной 0,05 мм. Тогда расчетную ширину резистора $b_{\text{расч}}$ можно считать равной 0,25 мм.

Далее из формулы (11) определим среднюю длину резистора сложной формы

$$l_{cp} = 0,25 \times 57,5 = 14,375 \text{ мм}$$

Округлив, получим значение $l_{cp} = 14,4$ мм. Затем определим расстояние a между резистивными полосками, для фотолитографического метода минимально допустимая величина $a_{\text{мин}} = 0,1$ мм. Для резистора с трапецевидно-

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

образным изгибом, а можно определить, используя теорему Пифагора. В данном случае расстояние между резистивными полосками указано на рисунке 25.

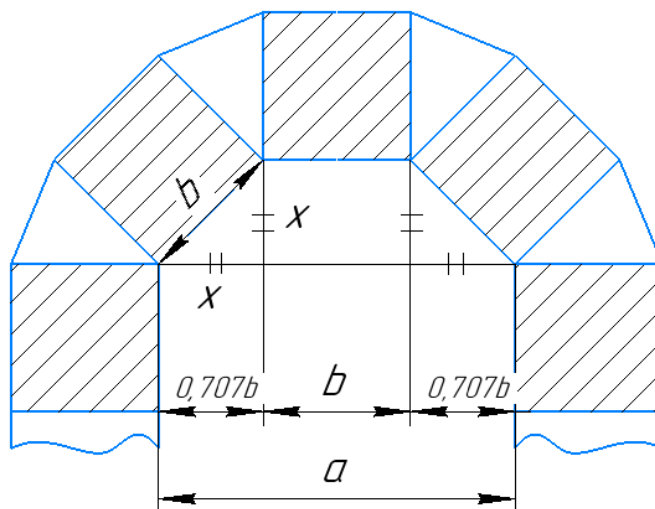


Рисунок 25 - Расстояние между резистивными полосками, в случае трапециевидно-образного изгиба

Таким образом, получается $a=2,4b_{\text{расч}}$, а шаг одного звена t согласно формуле (12) будет иметь значение:

$$t = 2,4 \times 0,25 + 0,25 = 0,85 \text{ мм}$$

Оптимальное число звеньев $n_{\text{опт}}$, рассчитаем по формуле (13).

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{14,4}{0,6} \times 1} = 4,116$$

Величину $n_{\text{опт}}$ нужно округлить до ближайшего значения. Тогда $n_{\text{опт}}=4$.

Теперь можно по формулам (14) и (15) найти габаритные размеры резистора.

$$L = 4 \times 0,85 = 3,4 \text{ мм}$$

$$B = \frac{14,4 - 0,6 \times 4}{4} = 3 \text{ мм}$$

Габаритная площадь резистора S согласно формуле (16):

$$S = 3,4 \times 3 = 10,2 \text{ мм}^2$$

5. Теперь перейдем к уточненному расчету резистора с учетом неравномерности плотности тока в изгибах. Тонкопленочный резистор имеет число прямолинейных участков $n_{\text{опт}}=4$ и количество изгибов $m=4$. Число

квадратов с $K_\phi=1$ в трапециевидно-образном изгибе $w=5$, а число треугольников с $K_\phi=0,36$, из которых также состоит изгиб резистора $v=4$. Сопротивление одного изгиба находится с помощью формулы (18).

$$R_{изг} \approx (5 + 0,18 \times 4) \times 40 = 228,8 \text{ Ом}$$

Из формулы (17) выведем и рассчитаем длину прямолинейных участков магниторезистора.

$$l_n = \frac{2300 - 4 \times 228,8}{40 \times 4} \times 0,25 = 2,164 \text{ мм}$$

Округлив длину прямолинейных участков, получим $l_n=2,15$ мм. Тогда окончательные габаритные размеры резистора: $L=3,4$ мм; $B=l_n+5,4 \times b_{расч}=2,15+5,4 \times 0,25=3,5$ мм; $S=L \times B=3,4 \times 3,5=11,9 \text{ мм}^2$.

6. Теперь сделаем проверку рассчитанного магниторезистора по формулам (19)-(22).

Действительная удельная мощность $P_{дейст}$ должна быть меньше удельной допустимой мощности рассеяния P_0 .

$$P_{действ} = \frac{0,05}{11,9} = 0,0042 \text{ Вт/мм}^2$$

Действительная удельная мощность $P_{дейст}$ получилась меньше удельной допустимой мощности рассеяния P_0 .

$$\delta_{K\phi} = \left[\left(\frac{0,01}{0,6} \right) + \left(\frac{0,01}{0,25 \times 4} \right) \right] \times 100 = 2,667 \%$$

Действительная допустимая погрешность коэффициента формы $\delta_{K\phi}$ получилась меньше удельной допустимой погрешности коэффициента формы.

$$\delta_R = 2,667 + 2,5 + 1,5 + 1,5 = 8,167 \%$$

Действительное допустимое отклонение сопротивления резистора δ_R меньше допустимого отклонения сопротивления резистора от номинала.

Проверка точности расчета номинала. По формуле (17) определим расчетное значение номинала резистора.

$$R_{расч} = (4 \times 228,8) + \left(\frac{2,15}{0,25} \times 4 \times 40 \right) = 2291 \text{ Ом}$$

Затем по формуле (22) найдем относительную погрешность номинального значения.

$$\gamma_r = \left(\frac{|2291 - 2300|}{2300} \right) \times 100 = 0,383\%$$

Относительная погрешность номинального значения должна быть $\gamma_r \leq 0,5\%$. Данное условие выполняется, поэтому на этом расчет тонкой пленки резистора из пермаллоя можно считать завершенным. Данный расчет был выполнен в среде программирования *MathCAD* и представлен в приложении Б.

Можно сделать вывод, что спроектировать данный тонкопленочный элемент с установленными параметрами возможно, с условием, если он будет применяться в диапазоне температур от -40 до +65 град. В обратном случае необходимо разработать другую конструкцию резистора с отрицательным допуском на номинал и новый тип расчетов, для возможности реализации подгонки или дополнительно применять элементы термостабилизации. Окончательная топология магниторезистора представлена в приложении В к пояснительной записке.

3.3 Технология вакуумного напыления магниторезистивных пленок.

Сам технологический процесс создания тонких магнитных пленок и его особенности влияют на их электрические параметры и магнитные свойства. Особо важны параметры магниторезистивных элементов, от которых зависят их характеристики: толщина и особенности структуры магнитных/немагнитных слоев, наличие осей легкого и трудного намагничивания, энергия обменного взаимодействия между пленками.

На практике широко используют следующие способы получения магнитных тонких пленок:

Электролитическое осаждение. В этом методе очень много условий осадений, а свойства пленок зависят и от состава раствора и от его температуры и от условий его перемешивания и от качества подложки и от значения водородного показателя *pH*. При чем в магнитных пленках могут

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

наблюдаться большие напряжения, эффект старения и неравномерность состава по толщине, но обеспечивается точный контроль температуры подложки и отсутствует эффект наклонного падения.

Ионное распыление. Метод, позволяющий получить высококачественные магнитные пленки. В процессе реализации тонких ферромагнитных пленок данным способом, необходимо обеспечивать хорошее охлаждение катода, отсутствие примесей в рабочем газе и не искаженное катодом, наведенное магнитное поле. Точную температуру подложки определить в данном методе сложнее, чем в других, а от эффекта фракционирования можно избавиться, если верно подобрать состав сплава ферромагнитного катода. Коэффициенты распыления некоторых материалов приведены в таблице 5 [38].

Таблица 5 – Коэффициенты распыления ферромагнитных металлов в аргоне

Материал мишени	Энергия ионов аргона, эВ					
	200	600	1000	2000	5000	10000
	Коэффициент распыления, атом/ион					
Co	0,6	1,4	-	-	-	-
Fe	0,5	0,3	1,4	2	2,5	-
Ni	0,7	1,5	2,1	-	-	-

Но наиболее подробно следует остановиться на третьем способе получения тонких пленок, также описанном в [38], а именно на термическом испарении в вакууме, с помощью которого и был получен образец магниторезистивного элемента из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, реализующий явление АМС. Данный метод является самым простым, доступным и изученным.

Перед непосредственным напылением тонких пленок была проведена очистка ситалловых подложек. Они подвергались обезжириванию в ацетоне в ультразвуковой ванне (температура - 40 град; время - 10 мин) и промывались в этиловом спирте. Также необходимо, чтобы подложки были гладкими и плоскими, чтобы обеспечить низкие показатели шероховатости, т.к. их качество

поверхности влияет на многие параметры тонких магнитных пленок. Например, различные царапины на поверхности могут вызывать локальные напряжения, которые влияют на направление намагниченности, шероховатость порядка 1000 ангстрем определяет величину магнитного поля и одноосную анизотропию и чем она больше, тем более сильное магнитное поле требуется для намагничивания. Также к наличию больших кристаллитов чувствительна угловая дисперсия намагниченности и явление магнитострикции [39].

Затем подложки помещались непосредственно в карусель с держателями подложек в установке УВН-71П-3 [40], представленную на рисунке 26. Универсальная установка вакуумного напыления УВН-71П-3 предназначена для получения тонких пленок методом термического резистивного испарения при давлении остаточного газа порядка 10^{-6} мм рт. ст.



Рисунок 26 - Установка УВН-71П-3

После того, как вакуумная установка подготовлена к работе, внутри рабочей камеры, снабженной «рубашкой» водяного охлаждения и смотровыми окнами, создавался предварительный низкий вакуум порядка 10^{-2} мм рт. ст., с

помощью форвакуумного насоса. Величина вакуума контролировалась с помощью манометрической лампой ПМТ-4М, подключенной к вакуумметру ВИТ-2. После достижения необходимого предварительного вакуума включался высоковакуумный паромасляный диффузионный насос. Давление в системе понижалось до высокого вакуума порядка 10^{-6} мм рт. ст. Величина высокого вакуума контролировалась манометрической лампой ПМИ-2, также подключенной к ВИТ-2, при этом форвакуумный насос продолжает работать. В форбаллоне должно поддерживаться постоянно пониженное давление порядка 10^{-2} мм рт. ст. Это необходимо для уменьшения перепада давления на входе и выходе высоковакуумного насоса, что способствует снижению коэффициента сжатия газа и, следовательно, уменьшению/предотвращению его конденсации. Давление в диффузионном насосе измерялось лампой ЛТ-2, подключенной к вакуумметру ВИТ-1А.

Для достижения у тонких магниторезистивных пленок желаемых магнитных и электрических свойств в процессе напыления, необходимо было поддерживать постоянной температуру подложки, равной 250 град. Такая температура позволяет не только снять внутреннее напряжение в пленке и улучшить ее адгезию, но и повысить температурную стабильность параметров магнитных параметров, уменьшить шероховатость. Также температура подложки воздействует на величину поля анизотропии, на рисунке 27 показан пример этого влияния на примере пленок пермаллоя. И хотя высокая температура снижает поле анизотропии ферромагнитных пленок, но и повышает эффект ряби намагниченности (явление, при котором нарушается устойчивое состояние намагниченности в пленке, характеризуется величиной угловой дисперсией α_{90} , которая определяется экспериментально, типичная величина составляет порядка нескольких градусов). Для разогрева подложек использовались две накальные ИК-лампы, расположенные в верхней части колпака камеры.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

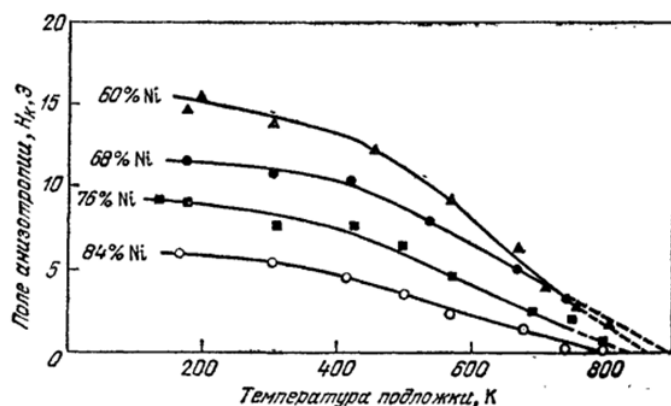


Рисунок 27 - Зависимость поля анизотропии от температуры подложки для пленок пермаллоя различного состава

Также в процессе напыления (и последующего охлаждения) пермаллоевой пленки, с помощью катушек Гельмгольца прикладывалось магнитное поле 50 Э, для наведения одноосной анизотропии с легкой осью намагничивания в плоскости подложки. При этом стоит отметить, что у пленки не должно быть деформаций и магнитострикционного эффекта, т.к. во время напыления при воздействии внешнего магнитного поля может проявиться и деформационно-магнитострикционная анизотропия, способная увеличить дисперсию намагниченности, о негативном влиянии которой говорилось ранее. Пленки сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и так считаются не магнитострикционными. Состав с нулевой магнитострикцией тройного сплава NiFeCo показан на рисунке 28.

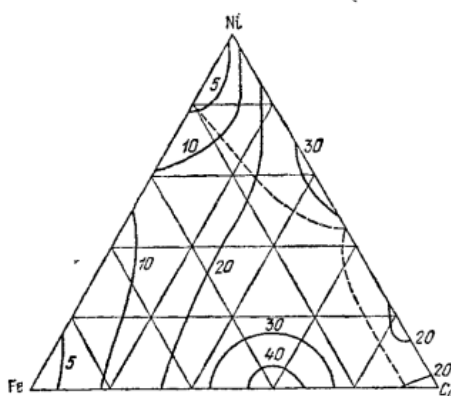


Рисунок 28 - Поле анизотропии для пленок NiFeCo различного состава (сплошные кривые). Пунктирные кривые соответствуют составу нулевой магнитострикции

По достижении необходимого рабочего вакуума (5×10^{-6} мм рт. ст.), температуры подложки (250 град.) и магнитного поля (50 Э) в системе можно

было приступать к напылению. Распыляемый материал был загружен в испаритель с вибропитателям (в УВН-71П-3В можно установить одновременно три испарителя). Магниторезистивный слой сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, напылялся с помощью резистивного нагрева, т.к. в этом случае лучше всего обеспечивается безопасность работы и достигается высокий КПД. Ток испарителя определялся экспериментально и составил 11 А, напряжение испарителя составило 5 В. Время напыления составило 65 с. Равномерность нанесения пленки обеспечивало расположение источника на значительном расстоянии от подложки, иначе бы наблюдалась анизотропия, обусловленная наклонным падением молекулярного пучка при напылении вещества, которая вызывает появление в магнитной пленке областей с хаотично направленными осями легкого намагничивания и вызывает увеличение дисперсии намагниченности [38].

Важно добавить, что Fe, Ni и Co имеют почти одинаковые величины давления паров, поэтому реализовать пленки из сплавов данных металлов не представляет сложности, к тому же у них практически отсутствует эффект фракционирования и состав получаемых пленок остается приблизительно тем же, что и у исходного вещества. Данные по испарению пленок пермаллоя приведены в таблице 6 [39].

Таблица 6 – Данные по испарению пермаллоя $\text{Ni}_{85}\text{Fe}_{15}$ при двух температурах

Наименование данных	1600 град.	2000 град.
Коэффициент активности	$f_{\text{Ni}}=0,97$	$f_{\text{Ni}}=0,97$
	$f_{\text{Fe}}=0,52$	$f_{\text{Fe}}=0,52$
Параметр вещества	1,1	0,9
Начальная скорость испарения, $\text{г} \times \text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-2}$
Начальное соотношение Ni:Fe в паре	85:15	87:13

Согласно данным из таблицы 6 следовало ожидать, что пленки пермаллоя можно испарять, не опасаясь сильного изменения исходного состава испаряемого вещества.

Весь процесс напыления управлялся с помощью шкафа системы управления установки УВН-71П-3, который включает в себя блоки управления вибропитателем, каруселью, заслонкой, испарителями, нагревателями подложек, а также приборы контроля толщины напыляемых пленок и температуры подложек. В нем также размещен источник питания испарителей. Вся система управления позволяет произвести откачку и напыление в автоматическом режиме по заранее установленным технологическим параметрам: остаточное давление газов, температура подложек, ток испарителя (определенный экспериментально) и толщина пленки. Последнее было задано электрическим сопротивлением напыляемого слоя методом резистивного «свидетеля».

Толщина магнитных пленок вообще один из наиболее важных параметров, т.к. от его значения зависят и электрические и магнитные характеристики магниторезистивных пленок. Практика показывает, что порог толщины пленки, при котором наблюдается уменьшение намагниченности насыщения, и температуры Кюри может составить порядка 150 ангстрем. Зависимость намагниченностей некоторых ферромагнитных материалов приведена на рисунке 29. Но этот порог можно увеличить до значений 20-30 ангстрем, при условии достижения максимально низкого значения давления (порядка 10^{-9} мм рт. ст.) в вакуумной камере и недопущения окисления пленок (которое само по себе приводит к уменьшению намагниченности и устранение в принципе почти всех магнитных свойств) [38].

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

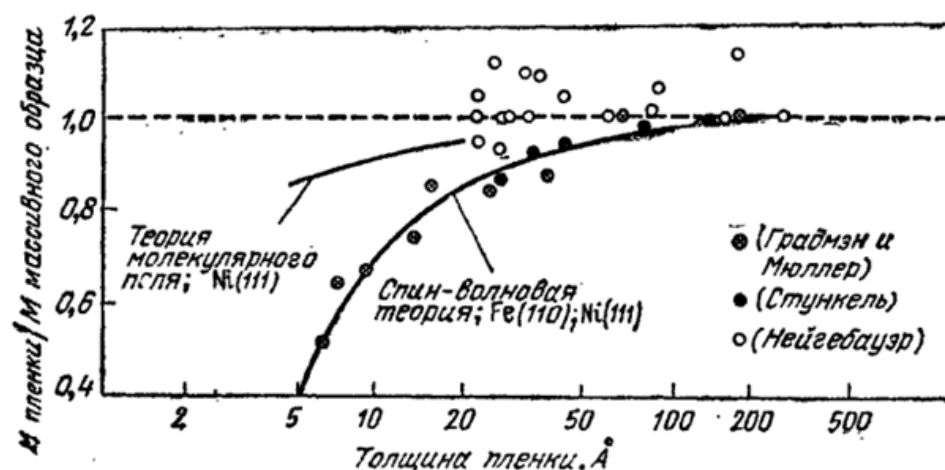


Рисунок 29 - Зависимость намагниченности, нормированной к намагниченности массивного образца, от толщины пленки для Ni (Нейгебауэр); Fe (Стункель), NiFe (Градмэн и Мюллер)

Для наилучшего значения магнитосопротивления (рисунок 30) верхним пределом толщины магнитной пленки являются значения порядка 150 ангстрем, т.к. выше нее расширяется область пленки, не способствующая рассеянию электронов. Нижний предел точно не определен, но на практике выявлено, что данный эффект уменьшается при достижении толщины значений порядка 10 ангстрем, которую еще и затруднительно контролировать [24].

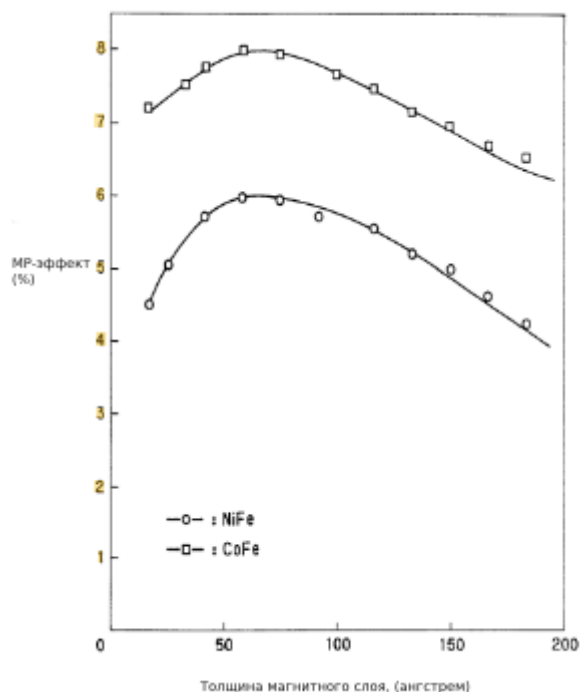


Рисунок 30 - Зависимость магнитосопротивления от толщины магнитного слоя на примере сплавов NiFe и CoFe

После напыления, полученные образцы выдерживались в вакууме в течение 30-40 минут, охлаждаясь до 70-80 град. Данный процесс необходим, т.к. не допускает окисления магнитных пленок, которое могло бы возникнуть, если бы образцы доставались из рабочей камеры сразу же после завершения распыления.

Толщина пленок d напыляемого сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ определялась экспериментально с помощью метода микровзвешивания подложек до напыления и после напыления по формуле (24) [41].

$$d = \frac{\Delta m}{S \times \rho} \quad (23)$$

Где Δm - приращение массы подложки после нанесения на нее пленки, кг; S - площадь пленки на подложке, м^2 ; ρ - удельная масса нанесенного вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При измерении толщины пленок обычно считают, плотность нанесенного вещества равной плотности исходного, но т.к. точная удельная плотность используемого сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ неизвестна, данный параметр был взят из [42] и равен $8600 \text{ кг}/\text{м}^3$, отсюда значение толщины оценочно составило 100-300 ангстрем.

Один из экземпляров с напыленной на ситалловую подложку полоской пермаллоя представлен на рисунке 31. Внешний вид проверялся с помощью исследовательского микроскопа со 100х крат. увеличением, который показал зеркальную, сплошную поверхность пленки, без явных дефектов или расслоений. Это означало, что подобранный режим термовакuumного напыления был подобран правильно.



Рисунок 31 - Изображение тонкой пленки пермаллоя, полученной термическим испарением в вакууме

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Затем на изготовленных образцах с помощью фотолитографии был сформирован рисунок топологии, показанной в приложении Б. В качестве фоторезиста использовался ФН-108 ХАО.028.077 ТУ. Травился слой в растворе, содержащий: хлорное железо (500 г/л), аммоний лимонно-кислый (80 г/л), натрий (10 г/л), скорость травления в таком случае составила 1,8 мкм/мин [43]. После формирования рисунка топологии магниторезистивного элемента, был произведен второй цикл напыления со съемными масками, для формирования контактных площадок. Распыляемым веществом был алюминий А99. Процесс его напыления идентичен напылению пермаллоя, отличие только в отсутствии прикладываемого магнитного поля и в других установленных технологических параметрах, которые представлены ниже:

- давление остаточного газа – 5×10^{-6} мм рт. ст.;
- температура подложки – 150 град.;
- ток испарителя – 5 А;
- напряжение испарителя – 2 В;
- время напыления – 20 с.

По окончании формирования контактных площадок масочным методом процесс реализации вакуумного напыления тонкопленочного магниторезистивного элемента из ферромагнитного сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, реализующего явление АМС можно считать завершенным, полученные образцы представлены на рисунке 32. У полученных образцов было измерено поверхностное сопротивление с помощью четырехзондового метода Кельвина [44], обладающего точностью измерения порядка 1%, и воспроизводимостью порядка 0,1. Значение поверхностного сопротивления экспериментальных образцов составляло 37-42 Ом/□.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

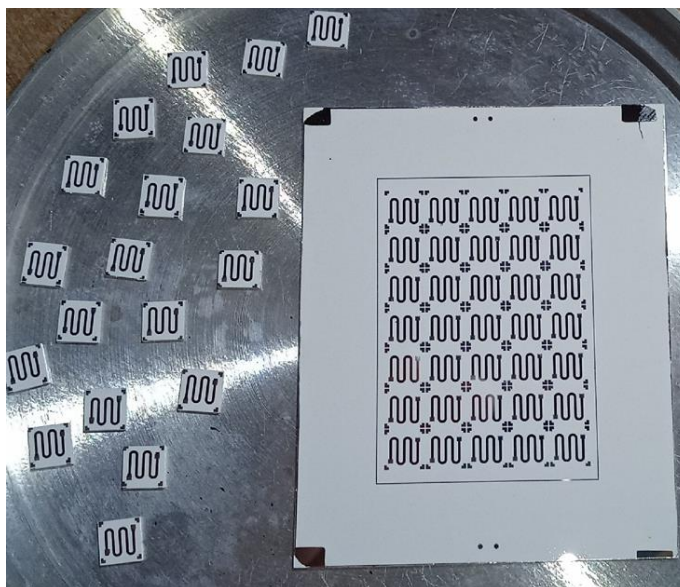


Рисунок 32 - Изготовленные образцы магниторезисторов с АМС из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$

Дальнейшее исследование магнитных и магниторезистивных свойств получившихся образцов и химического состава, к сожалению, не представлялось возможным из-за отсутствия подходящего оборудования.

Таким образом, была выбрана оптимальная конструкция магниторезистора, имеющего сложную форму и конфигурацию изгибов под углом 45 град, которая позволит сохранить стабильность, надежность работы элемента и простоту реализации фотошаблонов и масок. С учетом особенности распределения потенциала в магниторезисторе был составлен алгоритм расчетов магниторезистивных элементов, который успешно был применен на практике при расчете резистора из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ со следующими параметрами: номинальное сопротивление (в отсутствии магнитного поля) $R=2300$ Ом; допуск $\gamma=15\%$; мощность рассеяния $P=0,05$ Вт; диапазон рабочих температур $-40..+65$ град. Из результатов проведенных расчетов получилось создать чертеж топологического рисунка магниторезистора и после на его основе, с помощью термовакuumного напыления и фотолитографии, реализовать магниторезистивные элементы с эффектом АМС на практике.

4 Защита от электромагнитного излучения оператора вакуумных процессов

В обязанности оператора вакуумных процессов входит управление находящегося в его ведении оборудования, загрузка и извлечение обрабатываемых материалов, слежение за процессами обработки.

Рабочее место расположено в производственном помещении в цехе микроэлектроники.

На исследуемом рабочем месте расположено следующее оборудование:

- установка плазмохимического травления с емкостно-индукционной системой возбуждения ВЧ-разряда 08ПХТ-100Т-001

Данная установка представляет собой разрядную камеру с системой откачки воздуха и источником газа. Для возбуждения ВЧ-разряда в установке используется ВЧ-генератор, а также мощная катушка индуктивности и конденсатор.

- установка для терморезистивного нанесения тонких плёнок УВН-71П-3В с катушками Гельмгольца.

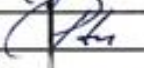
Основные составные части установки: вакуумная камера с магнитной системой, вакуумные насосы, баллоны с газом, смеситель газов.

Рассмотрим основные опасные и вредные производственные факторы, возникающие на исследуемом рабочем месте.

Естественное и искусственное освещение.

В цехе применяется смешанный вид освещения. Естественное освещение – боковое, т.е. свет проникает в помещение через оконные проёмы. Кроме того, в помещении используется общее искусственное освещение.

Необходимые уровни освещенности нормируются в соответствии со СНиП 23-05-95 "Нормы проектирования. Естественное и искусственное освещение".

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Защита от электромагнитного излучения оператора вакуумных процессов	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Горбунцов					65	113
Пров.		Головяшкин				гр. 20ПД1		
Н.контр.		Рыжова		10.06.04				
Утв.								

Производственный шум.

Шум в цехе создаётся множеством различных электроустановок, поэтому по характеру спектра шум является широкополосным со средней частотой 1000 Гц, по временным характеристикам шум – постоянный, звуковое давление 60..70 дБ. Непосредственно на рабочем месте источниками шума являются вакуумные насосы.

Нормируемые параметры шума на рабочих местах определены санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». В соответствии с данным документом ПДУ звукового давления для исследуемого рабочего места составляет 75 дБ. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ «Шум. Общие требования безопасности» ПДУ составляет 80 дБ.

Пожароопасность.

Общие требования к пожарной безопасности нормируются ГОСТ 12.1.004–91, а также СНиП 21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений».

Источником пожароопасности на исследуемом рабочем месте являются масла, электропроводка, а также баллоны с кислородом, утечка которого может привести к пожару.

Электроопасность

Источником электрической опасности на рабочем месте оператора являются электроустановки, а также электропроводка.

Нормирование ПДУ напряжений прикосновения и токов осуществляется по ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ.

Цех является помещением повышенной электрической опасности, т.к. имеет железобетонные полы, которые являются токопроводящими.

Электромагнитное излучение

Источником электромагнитного излучения (ЭМИ) являются различные генераторы, фидерные линии, катушки индуктивности, конденсаторы,

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

элементы высоковольтных электроустановок и т.д. На исследуемом рабочем месте таковыми являются ВЧ-генератор, индуктор, конденсатор, катушки Гельмгольца.

Нормирование ЭМИ радиочастотного диапазона осуществляется в соответствии с ГОСТ 12.1.006-84, а промышленной частоты – по ГОСТ 12.1.002-84.

Статическое электричество

Источниками опасности электростатического разряда и электрического поля являются множество диэлектрических материалов, с которыми приходится работать оператору. Это как сами обрабатываемые материалы, так и газы, используемые при их обработке.

Допустимые уровни напряженности электростатических полей установлены ГОСТ 12.1.045-84 "Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля".

Взрывоопасность

Источником данной опасности являются баллоны с кислородом. При соприкосновении кислорода с маслом образуется взрыв. При нагреве баллона с газом или его падении на твёрдую поверхность может произойти его разрыв. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов под давлением описаны в ПБ 10-115-96.

Кроме того, опасность взрыва обусловлена использованием вакуумного оборудования. Ошибка оператора может привести к резкой разгерметизации вакуумной камеры и, соответственно, к взрыву.

Вредные химические вещества

Данная опасность обусловлена использованием в процессе производства различных газов: азот, хладон-14, углекислота. Их возможная утечка снижает процент содержания кислорода в воздухе. Кроме того, хладон-14 содержит в своём составе токсичные газы.

ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны определены в ГОСТ 12.1.005-88 и ГН 2.2.5.686-98.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Одним из самых вредных факторов в условиях микроэлектронного производства является электромагнитное излучение. Это обусловлено использованием большого количества электроустановок, имеющих в своём составе множество различных высокочастотных блоков, индукторов, трансформаторов, постоянных и переменных магнитов, конденсаторов и т.д. Поэтому для детального анализа выберем именно этот фактор.

Электромагнитное поле — это особая форма материи, представляющая собой взаимосвязанные электрическое и магнитное поля.

Электромагнитные волны, взаимодействуя с тканями тела человека, вызывают определенные функциональные изменения. При интенсивном облучении эти изменения могут оказать вредное воздействие на организм человека. Знание природы воздействия электромагнитных волн на организм человека, норм допустимых облучений, методов контроля интенсивности излучений и средств защиты от них является совершенно необходимым для специалистов приборостроения в их многогранной практической деятельности.

На анализируемом рабочем месте источниками электромагнитного излучения являются: ВЧ-генератор, индуктор, конденсатор в установке 08ПХТ-100Т-001, катушки Гельмгольца в установке УВН-71П-3В. ВЧ-генератор установки плазмохимического травления работает на частоте 13.56 МГц и имеет мощность 1кВт.

Действие электромагнитного излучения на организм человека в основном определяется поглощенной в нем энергией. Известно, что излучение, попадающее на тело человека, частично отражается и частично поглощается в нем. Поглощенная часть энергии электромагнитного поля превращается в тепловую энергию. Эта часть излучения проходит через кожу и распространяется в организме человека в зависимости от электрических свойств тканей (абсолютной диэлектрической проницаемости, абсолютной магнитной проницаемости, удельной проводимости) и частоты колебаний электромагнитного поля.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Существенные различия электрических свойств кожи, подкожного жирового слоя, мышечной и других тканей обуславливают сложную картину распределения энергии излучения в организме человека. Точный расчет распределения тепловой энергии, выделяемой в организме человека при облучении, практически невозможен. Тем не менее, можно сделать следующий вывод: волны миллиметрового диапазона поглощаются поверхностными слоями кожи, сантиметрового - кожей и подкожной клетчаткой, дециметрового - внутренними органами.

Кроме теплового действия электромагнитные излучения вызывают поляризацию молекул тканей тела человека, перемещение ионов, резонанс макромолекул и биологических структур, нервные реакции и другие эффекты.

Из сказанного следует, что при облучении человека электромагнитными волнами в тканях его организма происходят сложные физико-биологические процессы, которые могут явиться причиной нарушения нормального функционирования как отдельных органов, так и организма в целом.

Люди, работающие под чрезмерным электромагнитным излучением, обычно быстро утомляются, жалуются на головные боли, общую слабость, боли в области сердца. У них увеличивается потливость, повышается раздражительность, становится тревожным сон.

Допустимые уровни воздействия на работников и требования к проведению контроля на рабочих местах для электромагнитных полей радиочастот изложены в ГОСТ 12.1.006-84.

Напряженность электромагнитных полей на рабочих местах не должна превышать:

- 1) по электрической составляющей: в диапазоне частот 60 кГц—3 МГц — 50 В/м; 3—30 МГц — 20 В/м; 30—50 МГц — 10 В/м; 50—300 МГц — 5 В/м;
- 2) по магнитной составляющей: в диапазоне частот 60 кГц— 1, 5 МГц — 5 А/м; 30 МГц—50 МГц — 0, 3 А/м.

Таким образом, на исследуемом рабочем месте предельно допустимым уровнем воздействия ЭМИ по электрической составляющей составляет 20 В/м., по магнитной составляющей данный показатель не регламентируется.

Предельно допустимая энергетическая нагрузка также зависит от частотного диапазона. Для данного рабочего места она составляет для электрического поля $7000 \text{ (В/м)}^2 \cdot \text{ч}$, для магнитного поля данный показатель также не регламентируется.

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного облучения осуществляется рядом способов, основными из которых являются: уменьшение излучения непосредственно от самого источника, экранирование источника излучения, экранирование рабочего места, поглощение электромагнитной энергии, применение индивидуальных средств защиты, организационные меры защиты.

Для реализации этих способов применяются: экраны, поглотительные материалы, аттенюаторы, эквивалентные нагрузки и индивидуальные средства.

Экраны предназначены для ослабления электромагнитного поля в направлении распространения волн. Степень ослабления зависит от конструкции экрана и параметров излучения. Существенное влияние на эффективность защиты оказывает также материал, из которого изготовлен экран.

Толщину экрана, обеспечивающую необходимое ослабление, можно рассчитать. Однако расчетная толщина экрана обычно мала, поэтому она выбирается из конструктивных соображений. При мощных источниках излучения, особенно при длинных волнах, толщина экрана может быть принята расчетной.

Толщина экрана в основном определяется частотой и мощностью излучения и мало зависит от применяемого металла.

Очень часто для экранирования применяется металлическая сетка. Экраны из сетки имеют ряд преимуществ. Они просматриваются, пропускают

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

поток воздуха, позволяют достаточно быстро ставить и снимать экранирующие устройства.

Экранированию подлежат генераторы, фидерные линии, элементы высоковольтных электроустановок, разъемы рабочих контуров, индукционные катушки, рабочие конденсаторы, смотровые окна и установки в целом. Конструкция экрана в каждом отдельном случае должна обеспечивать наибольший эффект экранирования.

Для экранирования индукционной катушки применяется цилиндрический экран. Излучение при этом происходит через открытые концы цилиндра.

При экранировании ослабление излучения осуществляется за счет отражения части энергии от экрана. Следовательно, в тех случаях, когда отраженная энергия может представлять опасность или вносить помехи, применять экранирование нецелесообразно.

Поглотительный материал осуществляет защиту путем превращения энергии электромагнитного поля в тепловую. В качестве поглотительного материала применяют каучук, пенополистирол, ферромагнитный порошок со связывающим диэлектриком и другие материалы.

Для повышения поглотительной способности материала ему придают такую форму, чтобы волны испытывали многократное отражение. Это приводит к неоднократному прохождению электромагнитных волн через поглотительный материал, что обеспечивает хорошее поглощение при незначительной толщине материала. Кроме того, многократное отражение волн приводит к взаимному их уничтожению. Использование таких материалов особенно эффективно в диапазонах высоких и сверхвысоких частот излучения.

Хорошие результаты дает совместное применение экрана и поглотительного материала. Поглотительный материал наносится на металлический лист, выполняющий роль экрана. Эта конструкция обеспечивает двукратное прохождение электромагнитной волны через поглотительный материал. Если толщину поглотительного материала выбрать соизмеримой с четвертью длины волны, то прямая и отраженная волны будут иметь сдвиг по

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

фазе 180° и взаимно уничтожаются. Недостатком этой конструкции является то, что она эффективна только в узком диапазоне частот.

Индивидуальные средства предназначены для защиты человека или отдельных его органов при работе в сильных электромагнитных полях. Они применяются в тех случаях, когда другие меры защиты не могут быть использованы или не обеспечивают необходимого ослабления излучения. К индивидуальным средствам относятся защитные халаты, комбинезоны, очки. Все эти средства защиты являются своеобразными экранами. Их защитные свойства определяются степенью отражения волн.

В качестве материала для защитных халатов и комбинезонов используется специальная ткань, в структуре которой тонкие металлические нити скручены с хлопчатобумажными нитями, что придает ткани плотность, эластичность и теплозащитные свойства. Защитные свойства такой ткани следующие: длина волны - 0,8 см; 3,2 см; 10 см; 50 см; ослабление излучения – 20 дБ; 28 дБ; 38 дБ; 40 дБ.

Индивидуальные средства защиты должны применяться в исправном состоянии, а их защитные свойства периодически проверяться.

Организационные меры защиты должны быть направлены на обеспечение безопасных условий труда при использовании электромагнитной энергии. Они должны учитываться прежде всего при организации производства, рабочего места и режима труда. Наибольшее значение при этом необходимо уделять выбору расстояния от источника излучения до рабочего места и сокращению времени пребывания человека в электромагнитном поле.

С учетом эффективности защиты расстоянием санитарными нормами установлено, что на каждую действующую установку в закрытом помещении мощностью до 30 кВт должно приходиться не менее 25 м^2 площади и не менее 40 м^2 для установок большей мощности. Для вновь монтируемых установок площади должны быть предусмотрены в 1,5—2 раза больше.

Эффективность защиты временем не вызывает сомнения. Однако применять ее следует только в тех случаях, когда другие меры и средства не

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

обеспечивают безопасных условий труда. Это объясняется тем, что сокращение времени нахождения на рабочем месте под облучением практически всегда ведет к снижению производительности труда. Защита временем может осуществляться путем смены работающих, частичной автоматизацией процессов, дистанционным управлением установкой, перерывом в работе и т.д.

Контроль уровней облучения должен производиться путем измерения нормируемого параметра электромагнитного поля на рабочем месте не реже двух раз в год, а также при вводе в действие новых источников излучения при реконструкции действующих установок, после ремонтных работ; при опытных и исследовательских работах уровни облучения необходимо проверять при каждом изменении условий труда.

Измерения в каждой выбранной точке производятся не менее трех раз. Результат каждого измерения фиксируется в протоколе. За уровень электромагнитного облучения в данной точке принимается среднеарифметическое трех измерений. Измерения производятся специально разработанными для этой цели приборами ИЭМП (диапазон высоких частот), ПО-1 (диапазон сверхвысоких частот), ПЗ-1 (промышленная частота) и др.

В результате проведенного анализа условий труда оператора вакуумных процессов можно сделать следующие выводы. Наиболее вредными и опасными факторами являются электромагнитное излучение, опасность поражения электрическим током, пожаро- и взрывоопасность, а также производственный шум, менее опасными и вредными являются недостаточное освещение, негативное влияние электростатических полей и использование вредных химических веществ. С точки зрения эргономических и микроклиматических условий рабочее место можно назвать оптимальным, поэтому данные факторы в основной части исследования не рассматривались. Таким образом, для улучшения условий труда можно рекомендовать использование дополнительных средств защиты от электромагнитного излучения и шума, а также систематический контроль факторов производства, имеющих отношение к взрыво- и пожаробезопасности.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполнения данной работы были исследованы проблемы реализации магниторезистивных пленок на основе ферромагнитных сплавов и решены следующие задачи:

1. Изучены эффекты АМС и ГМС, рассмотрен принцип их работы и выявлены особенности каждого явления.

2. Указан критерий выбора материалов для изготовления элементов магнитного сенсора. Проанализированы магнитные и магниторезистивные параметры, свойства и характеристики материалов и сплавов, с помощью которых реализуются эффекты АМС и ГМС. Ими являются ферромагнитные металлы, состоящие из Ni, Fe и Co с низкими значениями коэрцитивной силы, остаточной намагниченности, магнитострикции и высокими значениями магнитной проницаемости, намагниченности насыщения и магниторезистивного эффекта с положительными константами анизотропии и безгистерезисностью.

3. Разработана оптимальная топология тонкопленочного магниторезистивного элемента сложной формы с трапециевидно-образными изгибами, позволяющая одновременно достичь однородности плотности электрического тока в изгибах и увеличение размеров магниточувствительных участков, при этом, одновременно, исключая криволинейность форм с низкой точностью изготовления.

4. Смоделирован коэффициент формы у конструкции изгибов плёночных резисторов, выполненных под углом 45 град. в САПР «COMSOL Multiphysics» и проведен полноценный эксперимент по его нахождению, описанный в п. 3.2, который определил значение этого коэффициента в диапазоне значений 0,16-0,2.

5. Составлен алгоритм расчетов тонкопленочного магниторезистивного элемента сложной формы, примененный для расчета резистора из ферромагнитного сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ в диапазоне температур от -40 до +65 град. с параметрами: $R=2300 \text{ Ом}$; $\gamma=15\%$; $P=0,05 \text{ Вт}$.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						74
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

6. Разработан чертеж топологии магниторезистора с геометрическими размерами, полученными в ходе проведенных расчетов.

7. Проведен эксперимент по получению тонких пленок магниторезисторов с эффектом АМС терморезистивным вакуумным методом из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ с применением фотолитографии. Технологические параметры и особенности данного процесса приведены в п. 3.3. В ходе этого технологического процесса были получены образцы пермалловых магниторезисторов с контактными площадками на ситалловых подложках. Внешний вид показал зеркальную, сплошную поверхность пленки, без явных дефектов или расслоений, означающий правильность выбранного режима тех. процесса.

8. Проведены измерения по определению поверхностного сопротивления полученных тонкопленочных магниторезисторов из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и толщины напыляемых пленок. Четырехзондовый метод Кельвина показал, что значение поверхностного сопротивления у экспериментальных образцов лежало в диапазоне 37-42 Ом/□. Толщина полученных магниторезистивных пленок благодаря обычному методу взвешивания оценочно оказалась порядка 100-300 ангстрем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://ioffe.ru/sol/pdf/giant_magnetoresistance_ru.pdf [дата обращения: 06.04.2024].
2. Lisa Jogschies, Daniel Klaas, Rahel Kruppe, Johannes Rittinger, Piriya Taptimthong, Anja Wienecke, Lutz Rissing and Marc Christopher Wurz. *Recent Developments of Magnetoresistive Sensors for Industrial Applications. Sensors.* - 2015. - 15. - 28665-28689 с.
3. Борисов Александр. Современные АМР датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей. Компоненты и технологии. - 2006. - №60. - 56-60 с.
4. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. Пер. с япон. А. И. Леонова. - Москва: Мир, 1987. - 420 с.
5. Шамсутдинов М.А., Назаров В.Н., Харисов А.Т. Введение в теорию доменных стенок и солитонов в ферромагнетиках. Учебное пособие. - Уфа: БашГУ, 2010. - 148 с.
6. Dieny B., Dieny V.S., Speriosu S. Metin, S.S.P. Parkin, B.A. Gurney, B. Baumgart, D.R. Wilhoit. *Magnetotransport properties of magnetically soft spin-valve structures. J. Appl. Phys.* -1991. - V. 69. - № 8. - P. 4774 4779.
7. Johnson M. T., Bloemen P. J. H., Broeder den F., J. A. de Vries. *Magnetic anisotropy in metallic multilayers. Reports on Progress in Physics.* - 1996. - 59(11). - 1409-1458 с.
8. Tsymbal, E.Y. and D. Pettifor, *Perspectives of giant magnetoresistance. Solid State Physics.* - 2001. - 56. - P. 113 – 237.
9. Ramli Ramli, Haryanto Freddy, Khairurrijal Khairurrijal, Djamal Mitra. *GMR Biosensors for Clinical Diagnostics in book Biosensors for Health, Environment and Biosecurity. Edited by Pier Andrea Serra.* - DOI, 2011. - 552 с.
10. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://magnetism.eu/esm/2009/abs/dieny-abs1.pdf> [дата обращения: 16.04.2024].

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

11. *Lenczowski, S. K. J. Giant magnetoresistance of magnetic multilayers. Technische Universiteit Eindhoven. - 1995. – 124 с.*
12. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1412.7691> [дата обращения: 01.05.2024].
13. М. А. Миляев, Н. С. Банникова, Л. И. Наумова, В. В. Проглядо, Е. И. Патраков, И. Ю. Каменский, В. В. Устинов. Магнитосопротивление сверхрешеток CoFeNi/Cu с различным составом ферромагнитного сплава. Физика металлов и металловедение. - 2019. - Т. 120, № 9. - 905-912 с.
14. *T. Mcguire, R. Potter. Published. Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys. Physics, Materials Science. IEEE Transactions on Magnetism. - 1975. - 1018-1038 с.*
15. Дюжев Н. А., Мазуркин Н.С., Поздняков В.С., Юров А.С., Чиненков М.Ю. Преобразователи магнитного поля на основе анизотропных магниторезистивных тонкопленочных структур для работы в широком диапазоне температур. Известия высших учебных заведений. Электроника. - 2015. - №2 . - 5-11 с.
16. Кистенева М. Г. Химия радиоматериалов: Учебное пособие. - Томск: ТУСУР, 2009. - 266 с.
17. *Gomes Tristan, de la Torre Medina Joaquín, Lemaitre Matthieu, Piraux, Luc. Magnetic and Magnetoresistive Properties of 3D Interconnected NiCo Nanowire Networks. Nanoscale Research Letters. - 2016. - 11 с.*
18. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/cobalt-iron-alloys> [дата обращения: 05.05.2024].
19. Карпенков С. Магниторезистивные материалы. Исследования не прекращаются. Электроника: наука, технология, бизнес. - 2000. - № 1 (25). - 50-53 с.
20. *Coehoorn R., Kools J. C. S., Rijks T. G. S. M., Lenssen K. M. H. Giant magnetoresistance materials for read heads. Philips Journal of Research. - 1998 - 51(1). - 93-124 с.*

21. Synashenko O.V., Tkach Olena, Buryk Ivan, Odnodvoretz L.V., Protsenko S., Shumakova N.I. *Magnetoresistive properties of multilayer nanodimensional film systems. Problems of atomic science and technology.* - 2010. - 6. - 169-174 с.

22. Зайончковский В. С., Аунг Чжо Чжо, Миляев И. М., Перов Н. С., Шкилев В. Д. Многослойная тонкая пленка для продольного магнитного смещения магниторезистивных преобразователей. Патент номер: RU 2018 121 313 А.

23. Kisała Jakub, Kociubiński Andrzej, Jartych, Elżbieta. *Influence of the NiFe/Cu/NiFe Structure Dimensions and Position in External Magnetic Field on Resistance Changes under the Magnetoresistance Effect. Materials.* - 2023. - 16. – 4810 с.

24. Jun-ichi Fujikata; Masafumi Nakada. *Magnetoresistance effect film and method for making the same. United States Patent. Patent Number: 6,051.309.* - 2000. - P 13

25. Юдинцев В. GMR-датчики. Глаза, нервы, мозг электронных систем. Электроника: наука, технология, бизнес. - 2008. № 1(83). - 52-59 с.

26. . Fuke, K. Saito, M. Yoshikawa, H. Iwasaki, M. Sahashi. *NI nfluence of crystal structure and oxygen content on exchange-coupling properties of IrMn/CoFe spin-valve films. J. Appl. Phys.* - 2002. - V. 91. - № 10. - P. 7113-7115.

27. H. Umbayashi and Y. Ishikawa, *Antiferromagnetism of y Fe-Mn Alloys. J. Phys. Soc. Japan.* - 1966. - V. 21. - P. 1281-1283.

28. A.E. Berkowitz, K. Takano., *Exchange anisotropy. J. Magn. Magn. Mat.* - 1999. - V. 200. - P. 552-570 .

29. Toney, / M. F., Thickness dependence of exchange bias and structure in MnPt and MnNi spin valves/ M. F. Toney and M. G. Samant// *Appl. Phys. Lett.* - 2002. - V. 81. - No. 24. - P. 4565-4567.

30. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник в трех томах/ - М.: Машиностроение, 2001. - 872с.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

31. M. Saito, N. Hasegawa, F. Koike, H. Seki, and T. Kuriyama. PtMn single and dual spin valves with synthetic ferrimagnet pinned layers. *J. Appl. Phys.*-1999. - V. 85. - № 8. - P. 4928- 4930.

32. Ю. И. Дикарев, В. М. Рубинштейн. Проектирование топологии гибридных микросхем : учебно-методическое пособие. - Воронеж : ВГУ, 2009. - 35 с.

33. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/21920/1/Otchet_po_GK_02.740.11.0171_Vaskovskii.pdf [дата обращения: 12.05.2024].

34. Коледов Л. А., Волков В. А., Докучаев Н. И. и др. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов по спец. «Конструирование и производство радиоаппаратуры» и «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры»; Под ред. Л. А. Коледова. - М.: Высш. шк., 1984. - 231 с., ил.

35. А.А. Шульгинов, С.Ю. Гуревич. Низкочастотные флуктуации проводимости пермаллоя при температуре магнитного фазового перехода. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. - 2003. - №8. - 33-36 с.

36. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: Учебник для вузов. - М.: Радио и связь, 1989. - 400 с.: ил.

37. Бозорт Ричард М. Ферромагнетизм [Текст]: пер. с англ. Е. И. Кондорского и Б. Г. Лифшица. - М.: Издательство иностранной литературы, 1956. - 784 с.

38. Л. Майссел, Р Р. Глэнг. Технология тонких пленок (справочник) Т 2. Пер. с англ. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. - Нью-Йорк, 1970. – М.: «Сов. радио», 1977. - 768 с.

39. Л. Майссел, Р Р. Глэнг. Технология тонких пленок (справочник) Т 1. Пер. с англ. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. - Нью-Йорк, 1970. – М.: «Сов. радио», 1977. - 664 с.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

40. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://el-scada.ru/izmereniya/special-machinery-and-equipment/promyishlennoe-termicheskoe-oborudovanie/ustanovki-vyikuumnogo-napyileniya/ustanovki-vakuumnogo-napyileniya-tipa-uvn-71-uvn-74/> [дата обращения: 14.05.2024].

41. Б.А. Лапшинов. Нанесение тонких пленок методом вакуумного термического испарения: Метод. указания к лабораторной работе по дисциплинам «Технология материалов и изделий электронной техники» и «Технология создания технических систем». – М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2006. - 30с.

42. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://magnetlab.ru/page.php?id=1> [дата обращения: 17.05.2024].

43. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0001275060_19861207_A1_SU/ [дата обращения: 17.05.2024].

44. И. Васильев Особенности измерения удельного и поверхностного сопротивлений четырехзондовым методом. ВЕКТОР высоких технологий. – 2020. - №2 (47), - 7-14 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на ВКР

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						81
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

«Утверждаю»
Зав. кафедрой НИМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«05» июня 2024 г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент гр. 20ПД1 факультета информационных технологий и электроники

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

Горбунцов Алексей Андреевич

(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Головяшкин Алексей Николаевич

(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Разработка технологии вакуумного напыления магниторезистивных пленок на основе ферромагнитных сплавов

Тема утверждена приказом ПГУ № 396 а/о от «17» апреля 2024 г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)

Разработать технологию вакуумного напыления магниторезистивных пленок, для этого:

1. Изучить явления анизотропного магнитосопротивления (АМС) и гигантского магнитосопротивления (ГМС); принцип работы, требования к материалам

2. Проанализировать соотношение магнитных и магниторезистивных параметров, свойств и характеристик материалов с АМС и ГМС, таких как: магниторезистивный эффект, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, намагниченность насыщения, константы анизотропии

3. Разработать оптимальную топологию тонкопленочного магниторезистивного элемента сложной формы

4. Разработать алгоритм расчетов тонкопленочного магниторезистивного элемента сложной формы с учетом особенности его конструкции и рассчитать магниторезистор со следующими заданными параметрами: сопротивление (в отсутствии магнитного поля) – 2,3 кОм, допустимое отклонение номинала – 15%, мощность – 0,05 Вт, рабочий диапазон температур – -40...+65 град.

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1 Гигантское магнитосопротивление (ГМС) и анизотропное магнитосопротивление (АМС). Требования к материалам магнитных датчиков

1.1 Явление и особенности АМС

1.2 Явление и особенности ГМС

2 Материалы для ГМС и АМС

3 Расчет и проектирование магниторезистивных датчиков

3.1 Конструкции элементов магниторезистивных датчиков

3.2 Алгоритм расчетов элементов магниторезистивных датчиков

3.3 Технология вакуумного напыления магниторезистивных пленок

4 Защита от электромагнитного излучения оператора вакуумных процессов

5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)

1. Разработка технологии вакуумного напыления магниторезистивных пленок на основе ферромагнитных сплавов (1 слайд)

2. Цель и задачи ВКР (1 слайд)

3. Актуальность работы (1 слайд)

4. Явление анизотропного магнитосопротивления (1 слайд)

5. Явление гигантского магнитосопротивления (2 слайда)

6. Анализ магниторезистивных материалов (2 слайда)

7. Разработка тонкопленочных магниторезистивных элементов (4 слайда)

8. Вредные и опасные производственные факторы (1 слайд)

9. Заключение (1 слайд)

10. Спасибо за внимание (1 слайд)

11. Топология магниторезистора А4×1

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1.

Консультант _____

7. Календарный график по выполнению бакалаврской работы

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Гигантское магнитосопротивление (ГМС) и анизотропное магнитосопротивление (АМС). Требования к материалам магнитных датчиков	20%	05.06.2024	
Материалы для ГМС и АМС	25%	06.06.2024	
Расчет и проектирование магниторезистивных элементов	35%	07.06.2024	
Защита от электромагнитного излучения оператора вакуумных процессов	10%	08.06.2024	
Иллюстративная часть	5%	08.06.2024	
Оформление пояснительной записки	5%	08.06.2024	

Руководитель бакалаврской работы

подпись

Годовяшкин А.Н.

фамилия, инициалы

Дата выдачи задания

«05»

июня

2024 г.

Задание к исполнению принял

подпись

Горбунцов А.А.

фамилия, инициалы

«05»

июня

2024 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

Декан факультета

подпись

Кревчик В.Д.

фамилия, инициалы

« 11 »

июня

2024 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Расчет магниторезистивного элемента в среде программирования

MathCAD

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		85

Исходные данные

Параметры магниторезистора:

Номинальное сопротивление, Ом

$$R_n := 2300$$

Допустимое отклонение сопротивления резистора, %

$$\gamma := 1\%$$

Мощность рассеяния, Вт

$$P := 0.05$$

Параметры материала Fe₂₀Ni₈₀:

Удельное электрическое сопротивление, Ом/мм²

$$\rho := 0.4 \cdot 10^{-6}$$

Толщина пленки, м

$$d := 10 \cdot 10^{-9}$$

Модуль температурного коэффициента сопротивления, 1/град

$$\alpha_T := 1.9 \cdot 10^{-3}$$

Удельная допустимая мощность рассеяния, Вт/мм²

$$P_0 := 0.05$$

Максимальная рабочая температура, град

$$T_{max} := 125$$

Технологические ограничения метода фотолитографии:

Точность изготовления линейных размеров пленочных элементов и расстояний между ними:

Длина, мм

$$\Delta l := 0.01$$

Ширина, мм

$$\Delta b := 0.01$$

Минимально допустимый размер резистора:

Длина, мм

$$l := 0.1$$

Ширина, мм

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						86
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$b := 0.1$$

Минимально допустимые расстояния между пленочными элементами, расположенными в одном слое, мм

$$a := 0.1$$

Перекрытия для совмещения пленочных элементов, расположенных в разных слоях, мм

$$e_{xx} := 0.1$$

Расчет тонкопленочного магниторезистора

1. Определение удельного поверхностного сопротивления магниторезистивной пленки.

Удельное поверхностное сопротивление, Ом/□

$$\rho_s := \frac{\rho}{d} = 40$$

2. Проверка правильности выбранного материала с точки зрения точности изготовления резистора.

Погрешность воспроизведения удельного поверхностного сопротивления, %

$$\gamma_{ps} := 2.5$$

Погрешность, обусловленная старением пленки, %

$$\gamma_{st} := 1.5$$

Погрешность переходных сопротивлений контакта, %

$$\gamma_{tr} := 1.5$$

Температурная погрешность, %

$$\gamma_{rt} := \alpha_r \cdot (T_{max} - 20) \cdot 100 = 19.95$$

Допустимая погрешность коэффициента формы, %

$$\gamma_k := \gamma - \gamma_{ps} - \gamma_{st} - \gamma_{tr} = 9.5$$

3. Определение конструкции резистора, по значению коэффициента формы.

Коэффициент формы резистора

$$K_f := \frac{R}{\rho_s} = 57.5$$

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4. Конструктивный расчет резистора сложной формы.

Ширина резистора, определяемая точностью изготовления, мм

$$b_t := \frac{\Delta b + \left(\frac{\Delta l}{K_f} \right)}{\frac{\gamma_k}{100}} = 0.107$$

Минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается заданная мощность, мм

$$b_p := \sqrt{\left(\frac{P}{P_0 \cdot K_f} \right)} = 0.209$$

Расчетное значение ширины резистора, мм

$$b_r \geq \max(b, b_t, b_p)$$

$$b_r := 0.25$$

Длина резистора, мм

$$l_{sr} := b_r \cdot K_f = 14.375$$

$$l_{sr} := 14.4$$

Расстояние между пленочными элементами, расположенными в одном слое, мм

$$a := 1.4 b_r + b_r = 0.6$$

Шаг одного звена резистора сложной формы, мм

$$t := a + b_r = 0.85$$

Оптимальное число звеньев резистора сложной формы

$$n_{opt} := \sqrt{\frac{l_{sr}}{t}} = 4.116$$

$$n_{opt} := 4$$

Длина резистора сложной формы, мм

$$L := n_{opt} \cdot t = 3.4$$

Ширина резистора сложной формы, мм

$$B := \frac{l_{sr} - a \cdot n_{opt}}{n_{opt}} = 3$$

Площадь резистора сложной формы, мм²

$$S := B \cdot L = 10.2$$

5. Уточненный расчет магниторезистора.

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						88
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Число изгибов

$$m := 4$$

Сопротивление изгиба, Ом

$$R_{iz} := (5 + 4 \cdot 0.19) \cdot \rho_s = 228.8$$

Длина прямолинейных участков, мм

$$l_p := \left(\frac{R - m \cdot R_{iz}}{\rho_s \cdot n_{opt}} \right) \cdot b_r = 2.164$$

$$l_p := 2.16$$

Уточненная габаритная ширина резистора, мм

$$B_{yt} := l_p + 5.4 b_r = 3.5$$

Уточненная габаритная площадь резистора, мм²

$$S_{yt} := B_{yt} \cdot L = 11.9$$

6. Проверка параметров магниторезистора.

Действительная удельная мощность, Вт/мм²

$$P_{01} := \frac{P}{S} = 4.902 \times 10^{-3}$$

Действительная допустимая погрешность коэффициента формы, %

$$\delta_k := 100 \left[\left(\frac{\Delta l}{a} \right) + \left(\frac{\Delta b}{b_r \cdot n_{opt}} \right) \right] = 2.667$$

Действительное допустимое отклонение сопротивления резистора, %

$$\delta_{\Delta} := \delta_k + \gamma_{ps} + \gamma_{rst} + \gamma_{tr} = 8.167$$

Точность расчета номинала:

Расчетное сопротивление, Ом

$$R_r := n_{opt} \cdot \left(\frac{l_p}{b_r} \right) \cdot \rho_s + m \cdot R_{iz} = 2.291 \times 10^3$$

Относительная погрешность номинального значения сопротивления, %

$$\gamma_r := 100 \frac{|R_r - R|}{R} = 0.383$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Топология магниторезистивного элемента

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						90
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ПГУ 2. 11.03.04. 005 МП

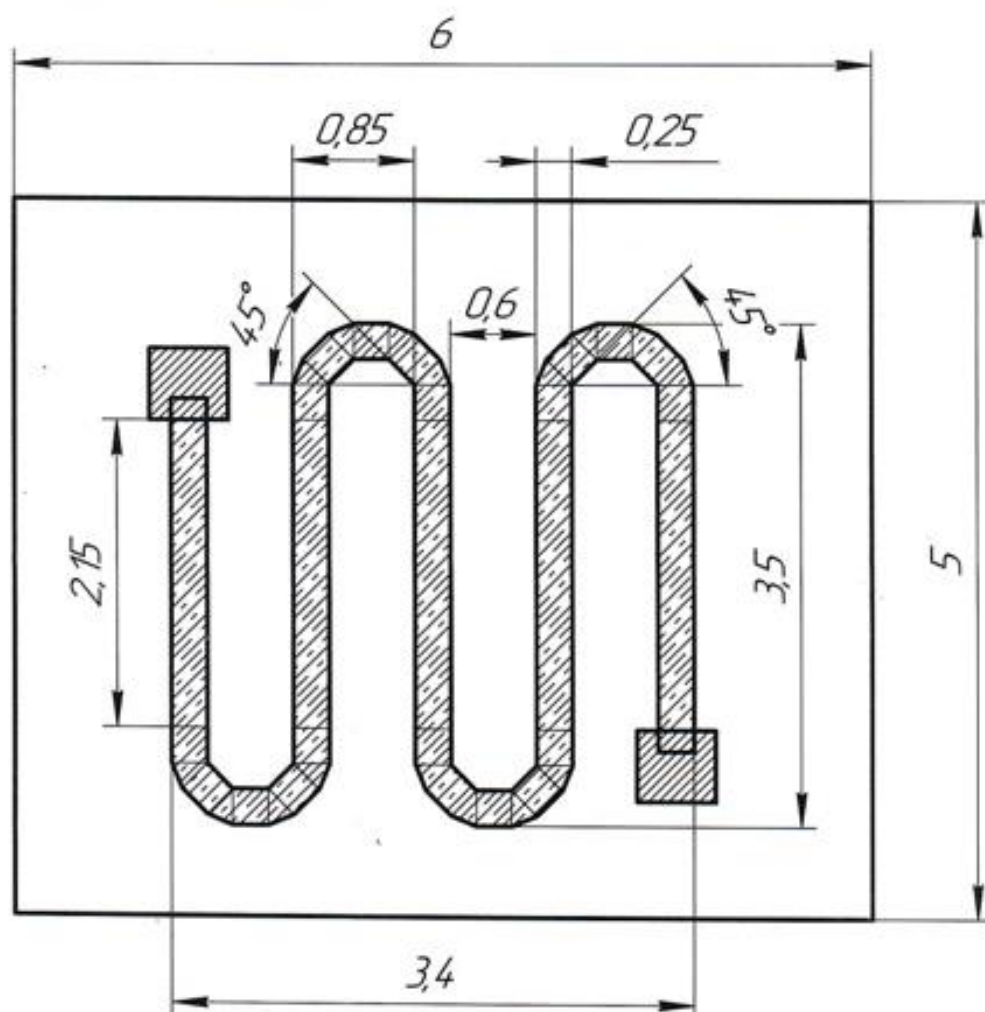


Таблица 1

Условное обозначение слоя	Наименование слоя	Материал слоя		
		Наименование марка	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Электрическая характеристика
	Резистор	Сплав $Fe_{20}Ni_{80}$	ГОСТ 10160-75	$\rho_{\sigma} = 40 \text{ Ом/}\square$
	Контактные площадки	Алюминий А99	ГОСТ 11069-64	$\rho_{\sigma} \leq 0,2 \text{ Ом/}\square$

ПГУ 2. 11.03.04. 005 МП

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Горбунцов		
Пров.		Головяшкин		
Т.контр.				
Н.контр.		Рыжова		18.06.24
Утв.				

Топология
магниторезистора

Сигнал СТ50-1
НТХ0. 027. 029

Лит.	Масса	Масштаб
		20:1
Лист	Листов	1

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Результат проверки ВКР в системе Антиплагиат. ВУЗ

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						92
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Ректору Пензенского государственного
университета Гулякову А.Д.
студента 4 курса ФИТЭ очной формы
обучения
Горбунцова Алексея Андреевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Горбунцов Алексей Андреевич, студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, Микроэлектроника и твердотельная электроника, прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» бакалаврской выпускной квалификационной работы на тему «Разработка технологии вакуумного напыления магниторезистивных пленок на основе ферромагнитных сплавов», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.


подпись студента

10.06.2024
дата

ВКР представлена на проверку 10.06.2024

Руководитель ВКР



Головяшкин А.Н.

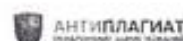
Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной
бакалаврской работы на тему «Разработка технологии вакуумного напыления
магниторезистивных пленок на основе ферромагнитных сплавов»

студента 4 курса Горбунцова Алексея Андреевича

направления подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника,
профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Руководитель ВКР Головяшкин Алексей Николаевич



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Пензенский государственный университет

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Горбунцов Алексей Андреевич
Самодитерование: Горбунцов Алексей Андреевич
рассчитано для: Горбунцов Алексей Андреевич
Название работы: Разработка технологии вакуумного напыления магниторезистивных пленок на основе ферромагнитных сплавов
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОПИРОВАНИЯ (наименование файла) (путь к файлу) (результаты проверки для корректности)

СОВПАДЕНИЕ	текст	25.21%	СОВПАДЕНИЕ	текст	25.21%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	текст	66.74%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	текст	66.74%
ЦИТИРОВАНИЕ	текст	8.04%	ЦИТИРОВАНИЕ	текст	8.04%
САМОДИТЕРОВАНИЕ	текст	0%	САМОДИТЕРОВАНИЕ	текст	0%

дата последней проверки 10.06.2024

дата и время копирования 10.06.2024 14:54

Структура документа: Проверенные разделы: библиография с 76-80, титульный лист с 1, содержание с 2, основная часть с 3-75
Модуль поиска: Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; ИПС Адилет; Переводные заимствования; Школьные фразы; Цитирование; Публикации eLIBRARY; Коллекция ИВУ; Диссертации ИВУ; Библиография; СМТ России и СНГ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Перефразирование по коллекции IEEE; Перефразирование по Интернету (EN); IEEE, Коллекция вузов; Публикации РГБ; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по Интернету (EN); Матрица; Перефразирование по Интернету; СПС ГАРАНТ; аналитика; Перефразирование по СПС ГАРАНТ; аналитика; Переводные заимствования (RuEn); СПС ГАРАНТ; нормативно-правовая документация; Переводные заимствования по коллекции Гарант; аналитика; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Сводка

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ВКР приемщика

Дата подписи: 10.06.24

Подпись приемщика



Человек убрался
в подлинности скрина, используя QR код,
который содержит ссылку на сайт.

Отчет на копирование, который не одобрен системой,
корректируется, система отвечает на электронные сообщения.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

Руководитель ВКР

« 10 » июня 2024 год

Головяшкин А.Н.
фамилия, инициалы



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Пензенский государственный университет

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Горбунцов Алексей Андреевич
Самоцитирование
рассчитано для: Горбунцов Алексей Андреевич
Название работы: Разработка технологии вакуумного напыления магниторезистивных пленок на основе ферромагнитных сплавов
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ		25.22%	СОВПАДЕНИЯ		25.22%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		66.74%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		66.74%
ЦИТИРОВАНИЯ		8.04%	ЦИТИРОВАНИЯ		8.04%
САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 10.06.2024

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 10.06.2024 14:54

Структура документа: Проверенные разделы: библиография с.76-80, титульный лист с.1, содержание с.2, основная часть с.3-75
Модули поиска: Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; ИПС Адилет; Переводные заимствования*; Шаблонные фразы; Цитирование; Публикации eLIBRARY; Коллекция НБУ; Диссертации НББ; Библиография; СМИ России и СНГ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Перефразирования по коллекции IEEE; Перефразирования по Интернету (EN); IEEE; Кольцо вузов; Публикации РГБ; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Медицина; Перефразирования по Интернету; СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Переводные заимствования (RuEn); СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Сводная

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 10.06.24


Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
БАКАЛАВРА

Выпускная квалификационная работа бакалавра на тему
«Разработка технологии вакуумного напыления магниторезистивных пленок на основе
ферромагнитных сплавов»

Выполнена студентом А.А. Горбунцовым
(инициалы, фамилия)

Факультет ИТЭ

Кафедра «НиМЭ» Группа 20ПД1

Направление подготовки, профиль .
11.03.04. «Электроника и нанoeлектроника»,
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Квалификация (степень) Бакалавр

Руководитель Головяшкин Алексей Николаевич
(фамилия, имя, отчество)
к.т.н., доцент, кафедра «НиМЭ»
(должность и место работы)

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы бакалавра.

В ходе выполнения ВКР Горбунцов А.А. продемонстрировал навыки и умения самостоятельного решения задач в области расчёта параметров и моделирования характеристик интегральных элементов и технологии тонкоплёночной электроники, а также отличные знания дисциплин, формирующих общепрофессиональные компетенции. Следует отметить высокий уровень освоения профессиональных компетенций, особенно в области тонкоплёночной технологии и материалов электронной техники. При выполнении задач по проектированию конструкции и технологии чувствительных элементов магниторезистивных датчиков студент продемонстрировал высокий уровень практической и теоретической подготовленности по профильным дисциплинам ОПОП. На заключительном этапе работы студент самостоятельно разработал подход для расчета и моделирования основных параметров и характеристик чувствительного магниторезистивного элемента типа «меандр» с трапециевидными элементами звена, а также разработал алгоритм и автоматизацию расчёта на примере конкретных исходных данных.

Заключение

ВКР выполнена в полном объёме и в соответствии с техническим заданием. Уровень соответствия подготовленности выпускника соответствует требованиям к результатам освоения ОПОП бакалавриата ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». На основании вышеизложенного считаю, что ВКР заслуживает оценки «отлично», а ее автор, Горбунцов А.А., присвоения квалификации «бакалавр» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

«10» июня 2024 г.

Руководитель


(подпись)

А.Н. Головяшкин

(инициалы, фамилия)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(обязательное)
Презентация ВКР

					ПГУ 2. 11.03.04. 005 ПЗ	Лист
						98
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ФГБОУ ВО ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет информационных технологий и электроники

Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

**Разработка
технологии вакуумного напыления
магниторезистивных пленок на основе
ферромагнитных сплавов**

Выполнил: ст. гр. 20ПД1
Горбунцов Алексей Андреевич

Научный руководитель: к.т.н., доцент кафедры
«Нано- и микроэлектроника» ПГУ
Головяшкин Алексей Николаевич

Цель и задачи ВКР

Цель работы: разработать вакуумную технологию реализации тонких магниторезистивных пленок, изучить эффекты анизотропного магнитосопротивления (АМС) и гигантского магнитосопротивления (ГМС), а также ферромагнитные материалы реализующие данные явления, их основные параметры, характеристики, свойства, определить среди них лучших представителей для создания дешевого и качественного магнитного сенсора, создать алгоритм расчетов и оптимальную топологию магниторезистивных элементов.

Задачи работы

- ◆ изучить эффекты АМС и ГМС, принцип работы, требования к материалам;
- ◆ проанализировать соотношение основных параметров и характеристик материалов с АМС и ГМС;
- ◆ указать критерии выбора конструкции элементов магниторезистивных датчиков, а также составить для них алгоритм расчетов;
- ◆ указать особенности получения тонких пленок магниторезистора и разработать для них технологию вакуумного напыления;
- ◆ на основе полученной информации, сделать заключительные выводы.



Актуальность работы

Автомобильная электроника



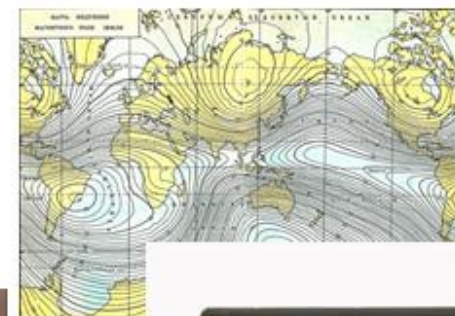
Бесконтактное измерение угла поворота, линейного перемещения, детектирования скорости объекта

Геодезия и системы навигации



Определение курса объекта по магнитному полю Земли

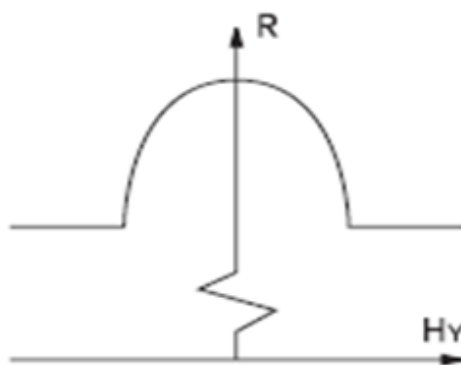
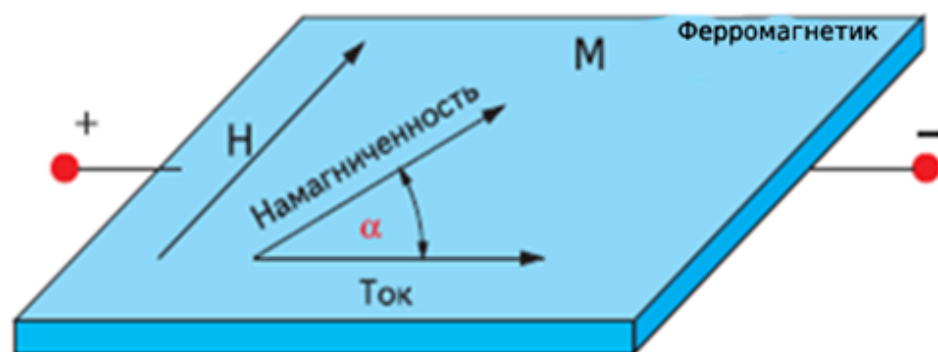
Магнитометрия



Принципы построения магнитометрической аппаратуры, технологии измерений, магнитной картографии

Анизотропное магнитосопротивление

Анизотропное магнитосопротивление (анизотропный магниторезистивный эффект) — квантовомеханический эффект, заключающийся в изменении электрического сопротивления ферромагнитных материалов в зависимости от их ориентации относительно внешнего магнитного поля ¹.



$$R = R_0 + \Delta R \cos^2 \alpha$$

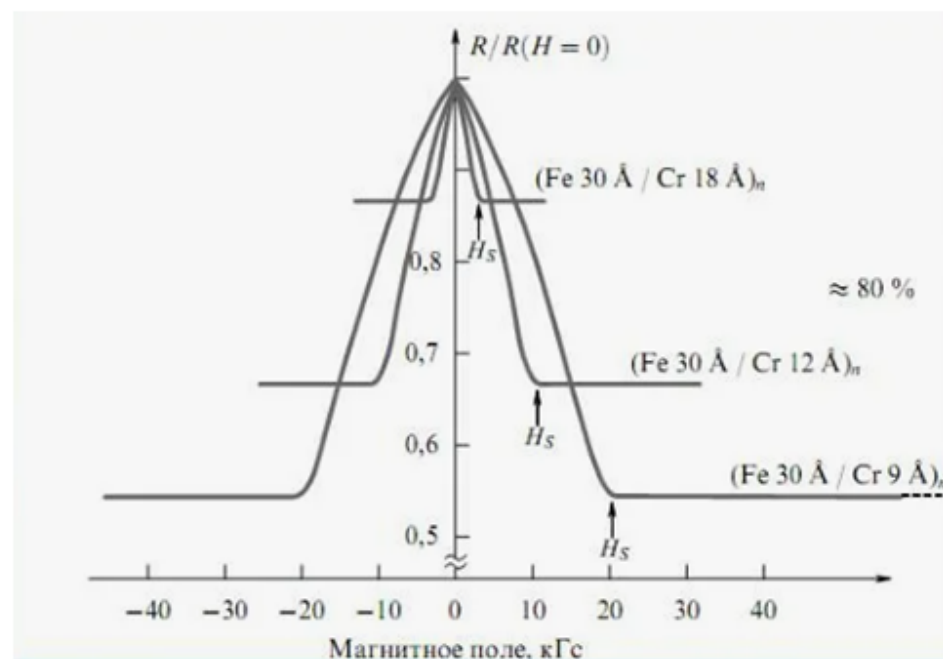
$$\alpha = 0^\circ \Rightarrow R_{\max}$$

$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow R_{\min}$$

¹ Lisa Jogschies, Daniel Klaas, Rahel Kruppe, Johannes Rittinger, Piriya Taptimthong, Anja Wienecke, Lutz Rissing and Marc Christopher Wurz. Recent Developments of Magnetoresistive Sensors for Industrial Applications. Sensors. -2015. - 15. - 28665-28689 с.

Гигантское магнитосопротивление

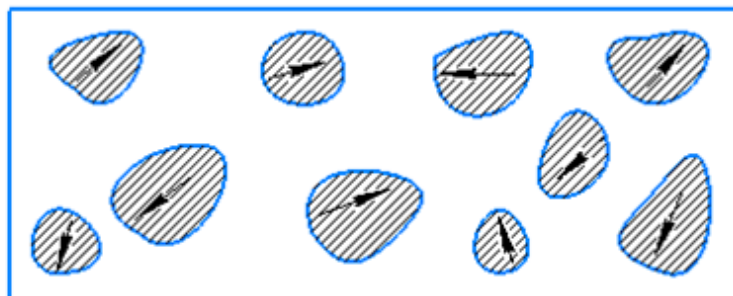
Гигантское магнитосопротивление (гигантский магниторезистивный эффект) квантовомеханический эффект, наблюдаемый в тонких металлических плёнках, состоящих из чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоёв. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоёв. Направлением намагниченности можно управлять приложением внешнего магнитного поля ².



² Tsymbal, E.Y. and D. Pettifor, *Perspectives of giant magnetoresistance. Solid State Physics.* - 2001. - 56. - P. 113 – 237.

Гигантское магнитосопротивление

◆ Гранулированная структура

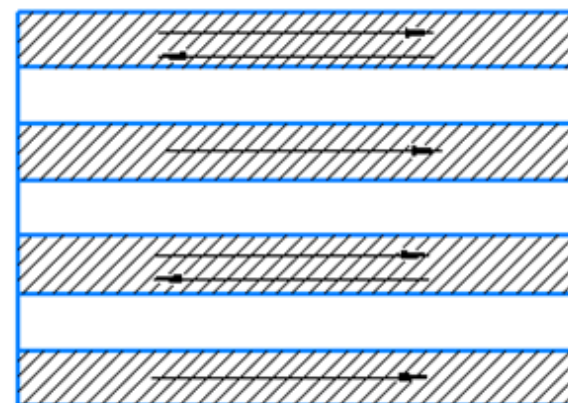


Магнитный
материал



Немагнитный
материал

◆ Многослойная структура

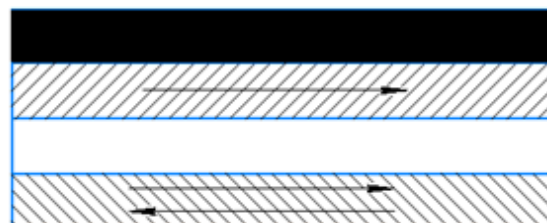


Ферромагнитный
слой



Немагнитный
слой

◆ Структура спиновой вентиль



Ферромагнитный
"свободный"
слой



Немагнитный
слой



Ферромагнитный
"фиксированный"
слой

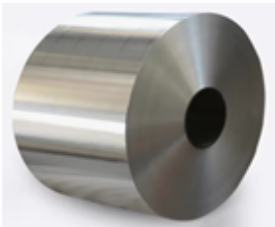
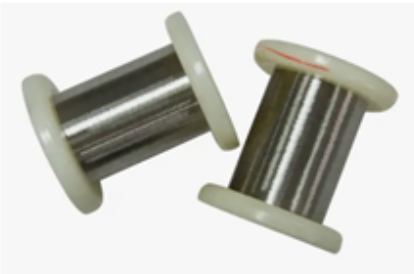


Слой
антиферромагнетика

Анализ магниторезистивных материалов

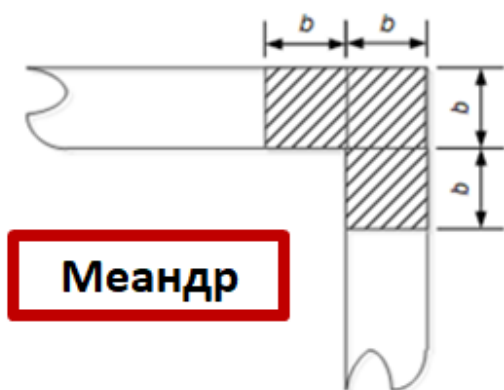
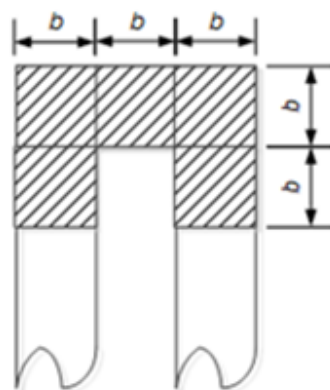
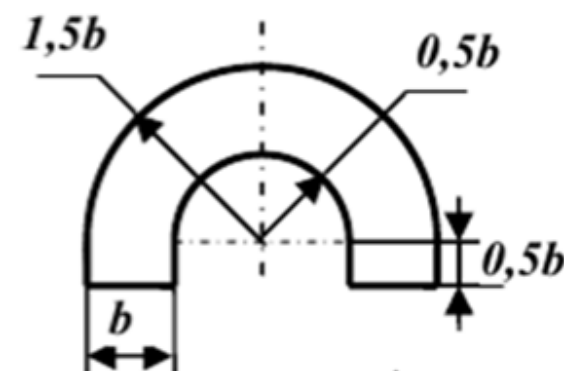
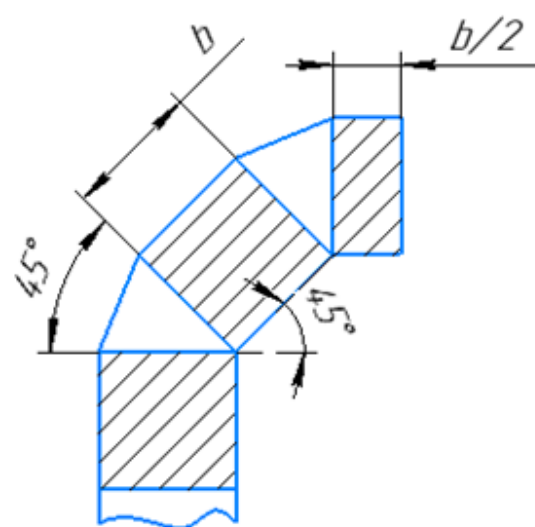
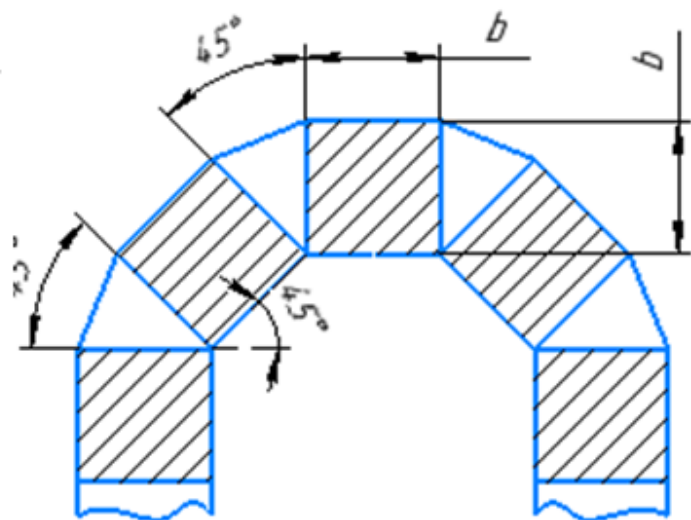
Материал	Преимущество	Недостатки	Изображение
Железо	- наилучшая магнитная восприимчивость	- ОЦК решетка снижает магниторезистивный эффект и увеличивает площадь петли гистерезиса	
Никель	- большой магниторезистивный эффект (для одиночного элемента); - малая коэрцитивная сила	- низкое значение температуры Кюри	
Кобальт	- большой магниторезистивный эффект (для одиночного элемента)	- редкий химический элемент; - наибольшая коэрцитивная сила	
Сплав железо-никель	- высокие значения относительной магнитной проницаемости; - малая коэрцитивная сила; - можно легировать; - нулевые значения констант магнитострикции	- низкий магниторезистивный эффект (для сплава); - низкое значение температуры Кюри	
Сплав никель-кобальт	- малая коэрцитивная сила; - нулевые значения констант магнитострикции	- низкий магниторезистивный эффект (для сплава); - содержит редкий химический элемент	

Анализ магниторезистивных материалов

Материал	Преимущество	Недостатки	Изображение
Сплав железо-кобальт	<ul style="list-style-type: none"> - наибольший магниторезистивный эффект (для сплава); - высокие значения температуры Кюри 	<ul style="list-style-type: none"> - содержит редкий химический элемент; - более сильный гистерезис; - увеличенная коэрцитивная сила; -химическая нестабильность 	
Сплав никель-железо-кобальт	<ul style="list-style-type: none"> - наибольший магниторезистивный эффект (для сплава); - высокие значения магнитной проницаемости; - высокие значения намагниченности насыщения; - малая коэрцитивная сила; - широкий диапазон изменения свойств 	<ul style="list-style-type: none"> - содержит редкий химический элемент 	

Разработка тонкопленочных магниторезистивных элементов

◆ Конструкции магниторезистора



Трапецевидно-образный изгиб

Разработка тонкопленочных магниторезистивных элементов

◆ Алгоритм расчетов

1. Выбор материала по оптимальному сопротивлению квадрата пленки резистора

2. Проверка правильности выбора материала, с помощью нахождения суммарной относительной погрешности

3. Определение коэффициента формы магниторезистора

4. Нахождение геометрических параметров магниторезисторов (ширина квадрата, число прямолинейных участков, длина/ширина магниторезистора и т.п.)

5. Уточненный расчет сопротивления резистора с учетом неравномерности плотности тока в изгибах

6. Проверка расчетов

Разработка тонкопленочных магниторезистивных элементов

◆ Основные формулы и параметры магниторезистора

$$\rho_z = \frac{\rho}{d} \quad \text{- удельное поверхностное сопротивление, Ом/□}$$

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R} = \gamma_{K\phi} + \gamma_{\rho z} + \gamma_{Rt} + \gamma_{Rcn} + \gamma_{Rx} \quad \text{- суммарная относительная погрешность, \%}$$

$$K_{\phi} = \frac{R}{\rho_z} = \frac{l}{b} \quad \text{- коэффициент формы}$$

$$b_{расч} \geq \max \{b_{точн}, b_{техн}, b_p\} \quad \text{- ширина квадрата пленки, мм}$$

$$n_{онт} = \sqrt{\frac{l_{cp}}{t} \times \frac{B}{L}} \quad \text{- число прямолинейных участков резистора}$$

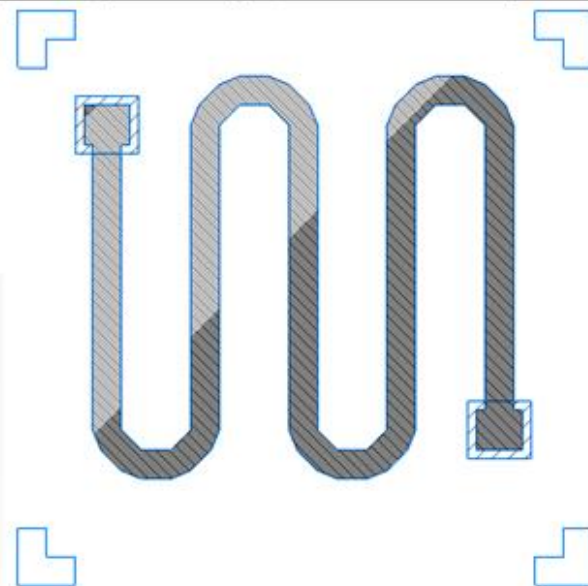
$$L = n_{онт} \times t \quad \text{- длина резистора, мм}$$

$$B = \frac{l_{cp} - a \times n_{онт}}{n_{онт}} \quad \text{- ширина резистора, мм}$$

$$R_{изг} \approx (w + 0,18v) \times \rho_z \quad \text{- сопротивление изгиба резистора, Ом}$$

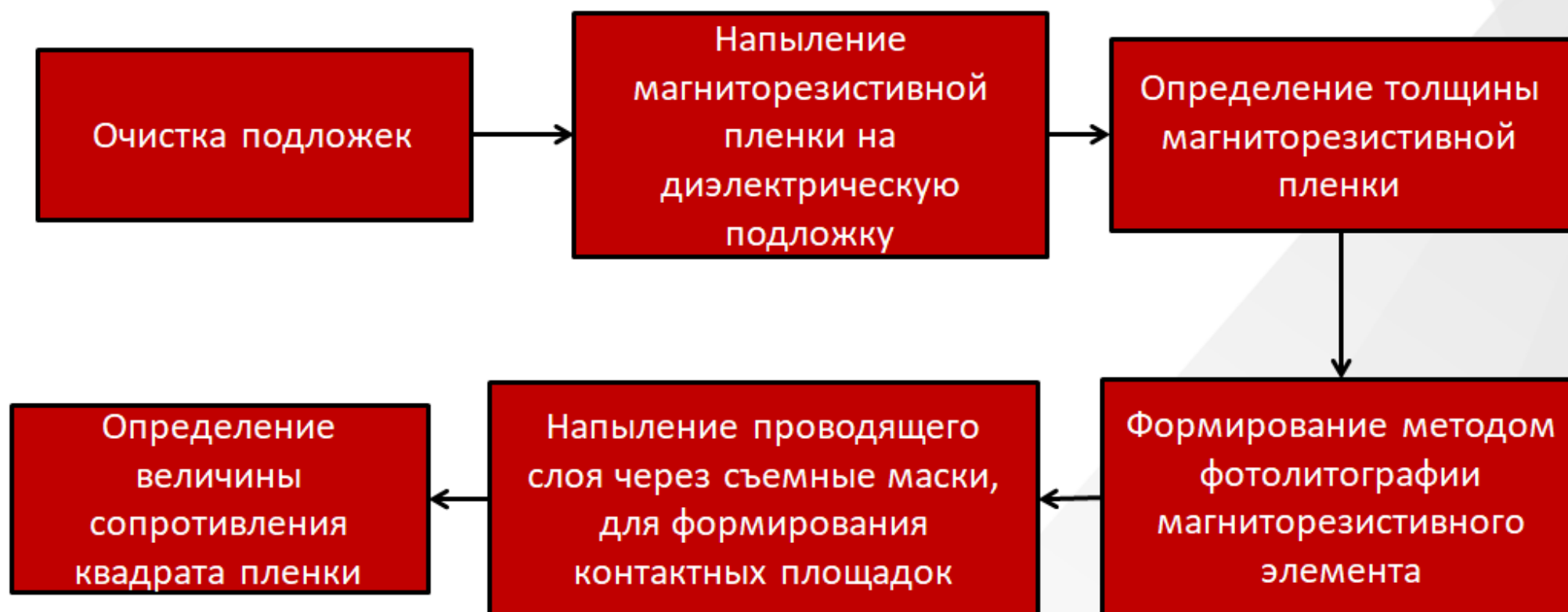
$$R_{расч} = (m \times R_{изг}) + \left(\frac{l_n}{b_{расч}} \times n_{онт} \times \rho_z \right) \quad \text{- полное сопротивление резистора, Ом}$$

Параметр	Значение
Сопротивление, Ом	2300
Допуск, %	15
Мощность, Вт	0,05
Диапазон рабочих температур, град.	-40..+65
Коэффициент формы	57,5
Ширина квадрата пленки, мм	0,25
Длина резистора, мм	3,4
Ширина резистора, мм	3,5



Разработка тонкопленочных магниторезистивных элементов

◆ Технология изготовления



Вредные и опасные производственные факторы



электромагнитное излучение

опасность поражения
электрическим током



пожаро- и взрывоопасность

вредные химические вещества



производственный шум



Заключение

1 Изучены эффекты АМС и ГМС, рассмотрен принцип их работы и выявлены особенности каждого явления;

2 Проанализированы магнитные и магниторезистивные параметры, свойства и характеристики материалов и сплавов, с помощью которых реализуются эффекты АМС и ГМС;

3 Разработана оптимальная топология тонкопленочного магниторезистивного элемента сложной формы;

4 Смоделирован и экспериментально найден коэффициент формы у трапециевидно-образных изгибов плёночных резисторов;

5 Составлен алгоритм расчетов тонкопленочного магниторезистивного элемента сложной формы;

6 Разработан чертеж топологии магниторезистора с геометрическими размерами, полученными в ходе проведенных расчетов.

7 Проведен эксперимент по получению тонких пленок магниторезисторов с эффектом АМС терморезистивным вакуумным методом из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ с применением фотолитографии.

8 Проведены измерения по определению поверхностного сопротивления полученных тонкопленочных магниторезисторов из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и толщины напыляемых пленок.

Спасибо за внимание!

