

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

С. В. Горохов, А. В. Негин, В. Е. Сергеев

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седякова», г. Нижний Новгород

В настоящее время широкое применение находят анизотропные магниторезистивные датчики, предназначенные для бесконтактного измерения скорости и направления вращения зубчатых колес и многополюсных роторов энкодеров, определения угла поворота или величины линейного перемещения, бесконтактного измерения тока (мощности), а также для определения курса объекта по магнитному полю.

С повышением требований к точностным характеристикам магнитных датчиков для создания современных перспективных навигационных комплексов и систем контроля встает задача по разработке технологии изготовления отечественных первичных магниторезистивных преобразователей (МРП) магнитного поля на анизотропном магниторезистивном эффекте с характеристиками на уровне зарубежных аналогов – НМС 1021 производства Honeywell:

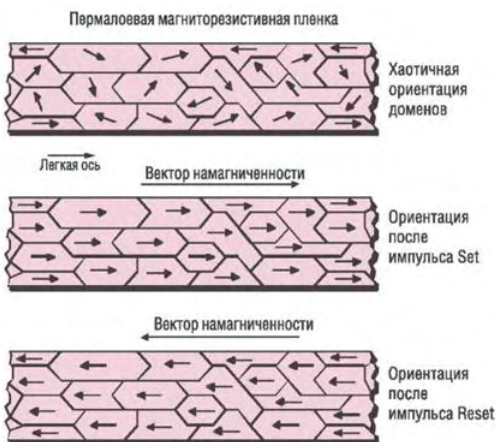
- удельная чувствительность, не менее 0,8 мВ/ВЭ;
- нелинейность передаточной характеристики – не более 0, % в диапазоне магнитных полей ± 1 Э;
- нестабильность выходного напряжения не более 6 мкВ, после подачи установочных импульсов «set/reset».

В работе представлены исследования, вносящие вклад в решение данной задачи и направленные на совершенствование технологии изготовления МРП.

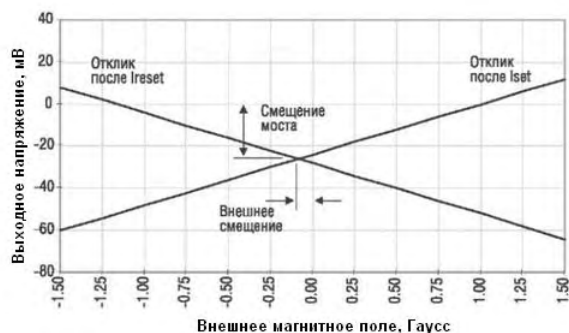
Конструкция МРП представляет собой многослойную структуру, состоящую из магниторезистивного моста Уинстона, и пленочной катушки индуктивности «set/reset», создающей установочные импульсы. В исходном состоянии магнитная (доменная) структура магниторезистивных полосок хаотична и измерение величины магнитного поля не производится. Подача короткого импульса тока длительностью 1–2 мкс через катушку «set/reset» формирует поле, ориентирующее магнитные домены всех магниторезистивных полосок в направлении оси легкого намагничивания (ОЛН), тем самым выводя магниторезистивный мост Уинстона в режим максимальной чувствительности. Катушка «set/reset» выполняет также еще одну важную функцию – инвертирование передаточной характеристики для исключения влияния температурного дрейфа элементов моста Уинстона, ошибки, вызванной нелинейностью передаточной характеристики, а также потерю слабого сигнала на фоне сильных паразитных полей [1]. Процесс перемагничивания доменной структуры и передаточная характеристика МРП при подаче импульсов «set/reset» представлены на рис. 1.

Ортогональное расположение двух и трех МРП позволяет изготовить датчики курса (азимута) по магнитному полю Земли – магнитометры для навигационных систем.

Одними из основных параметров, определяющих разрешающую способность МРП по магнитно-



а



б

Рис. 1. Воздействие импульсов «set/reset» на МРП: а – влияние на доменную структуру магнитной пленки; б – влияние на передаточную характеристику

му полю, являются чувствительность и стабильность выходного сигнала. Величина выходного напряжения магниторезистивного моста Уинстона, после подачи установочных импульсов «set» и (или) «reset» катушкой индуктивности, задает точность измерения величины магнитного поля. В составе датчика магнитного поля стабильность выходного напряжения будет определять точность измерения магнитного поля или среднеквадратичное отклонение (СКО) магнитного поля. Следует отметить, что стабильность выходного напряжения МРП зависит как от конструкции магниторезистивного моста Уинстона, так и от технологии его изготовления.

Для напыления магниторезистивной структуры использовалась вакуумная установка электронно-лучевого испарения «Оратория-9М», содержащая две электронные пушки FerroTecEVM-8 позволяющая напылять до 8 различных материалов. На первых этапах исследований для формирования моста Уинстона использовалась структура 47НК – Та – Cu – 47НК [2], где 47НК – сплав с химическим составом Ni(65%)Co(20%)Fe(15%), Та – защитный слой, Cu – проводящий слой. Напыление магниторезистивной структуры производилось за один цикл откачки вакуумной камеры. Получаемые образцы имели характеристики на уровне зарубежных аналогов лишь на единичных образцах, выход годных составлял не более 1–3%. Основными параметрами по которым браковались получаемые МРП были высокий разбаланс моста Уинстона и нестабильность выходного сигнала. Величина разбаланса зависит в большей степени от выполнения операции фотолитографического травления, значения же нестабильности выходного сигнала напрямую зависят от толщины слоев, температуры напыления, времени выдержки и величины наведенного магнитного поля.

Для получения требуемых значений МРП и повышения процента выхода годных на следующем этапе исследований была выбрана магниторезистивная структура моста Уинстона на основе 47НК – Та – Al, взамен ранее использовавшейся. Изменение материалов структуры моста Уинстона обусловлено вероятностью появления контакта Cu-Al, с возникновением химического потенциала на границе до 1 В, при разварке алюминиевыми перемичками и присутствия дополнительного (защитного) магнитного слоя способного негативно повлиять на характеристики МРП. Для этого были проведены работы по отработке технологии получения стабильного напыления алюминия толщиной 0,7–1 мкм на установке «Оратория – 9М».

Следует отметить, что напыление алюминия электронно-лучевым методом является трудновыполнимой и труднопроизводимой задачей. Наиболее часто используемый метод напыления пленок алюминия – магнетронное распыление.

На первых этапах исследований было экспериментально определено, что при напылении проводящего слоя на сформированные отдельностоящие магниторезистивные полоски и последующего фор-

мирования проводящего слоя, образуется большое переходное сопротивление между проводящими и магниторезистивными элементами, вследствие образования на последнем окисного слоя. Изготовленные МРП имели неудовлетворительные характеристики. Для устранения данного факта было принято решение напылять пленки 47НК – Та – Al за один цикл откачки на установке «Оратория-9М».

Напыление алюминия из слитка, установленно-го в карман испарителя электронной пушки FerroTec установки «Оратория - 9М», оказалось невозможным (из за высокой теплопроводности алюминия и значительной температуры испарения порядка 1200 °С стабильного процесса испарения получить не удалось). Поэтому для отработки стабильного процесса напыления использовались дополнительные тигли – лайнеры из керамики и тугоплавких металлов устанавливающиеся в карман испарителя и представленные на рис. 2. Наиболее эффективно показал себя лайнер из молибдена (рис. 2е). Остальные испытываемые лайнеры были разрушены, из-за неравномерного нагрева от электронного луча (рис. 2а, 2б, 2в), либо не обеспечили стабильного напыления (рис. 2г, 2д).

За основу технологического процесса изготовления МРП взят процесс указанный в литературе [2]. Процесс изготовления МРП состоит из следующих этапов:

- напыление магниторезистивной структуры 47НК – Та – Al на установке электронно-лучевого испарения «Оратория - 9М»;
- фотолитография структуры 47НК – Та – Al с получением топологии моста Уинстона;
- нанесение изоляционного слоя лака АД-9103 с последующей его имидизацией;
- фотолитография изоляционного слоя;
- напыление проводниковой структуры V-Al;
- фотолитография проводникового слоя с получением топологии катушки «set/reset».

В качестве подложки использовалась пластина монокристаллического кремния, с нанесенными на нее изолирующими слоями. Для получения топологического рисунка моста Уинстона использовалась фоторезистивная маска фоторезиста – microposit S1813SP15.

- Травление структуры происходило в два этапа:
- травление слоя Al;
 - травление слоев 47НК – Та.

Критериальными параметрами процесса являлись селективность травителя и отсутствие сквозных «дырок» (питтингов) в магниторезистивных полосках.

Был разработан состав травителя и отработан режим травления, при котором элементы МРП имеют четкие и ровные края. После травления структуры 47НК – Та – Al проводился контроль внешнего вида и измерение элементов магниторезистивного моста Уинстона на микроскопе МИКРО-200Т-01 при 320-х увеличении. Подтрав структуры составил до 4 мкм – для магниторезистивных полосок и до



Рис. 2. Тигли – лайнеры для напыления алюминия на установке электронно – лучевого испарения «Оратория - 9М»: а – лайнер из диборида титана; б – лайнер из керамики «Кортим»; в – литой лайнер из корунда; г – прессованный лайнер из корунда; д – лайнер-лодочка из тантала; е – лайнер из молибдена

2 мкм – для проводникового слоя, при этом отсутствовали питтинги на открытых участках магниторезистивных полосок. Обработка данного процесса фотолитографического травления позволила повысить процент годных образцов по разбалансу моста Уинстона в 1,5–2 раза по сравнению со структурой 47НК – Та – Cu – 47НК.

На изготовленных образцах МРП по данной технологии проверялась адгезия сварных соединений методом ультразвуковой сварки. Усилие отрыва алюминиевой перемычки (шириной 400 мкм и толщиной 50 мкм) составило более 20 г, отрыв происходил по переходу (сварное соединение – металлизация).

Были проведены исследования магнитных параметров структуры 47НК-Ta-Al с целью определения возникновений внутренних напряжений в магниторезистивной структуре. Измерения проводились на базе технологического центра МИЭТ (г. Зеленоград) магнитооптическим методом Керра.

Для измерений магнитных параметров были изготовлены следующие образцы:

- пленка сплава 47НК на пластине монокристаллического кремния с изоляционными слоями SiO_2 и Si_3N_4 ;

- структура 47НК-Ta-Al напыленная на кварцевое стекло.

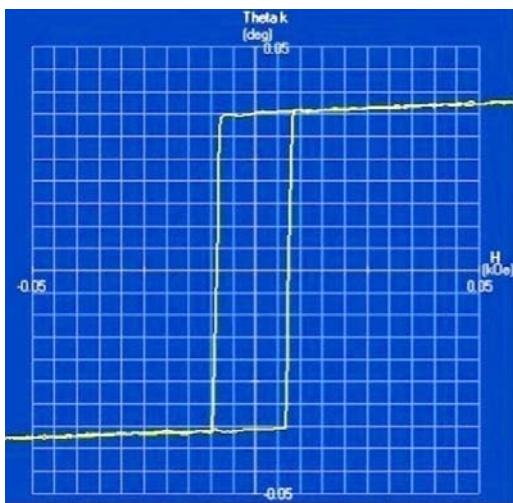
Использование двух образцов обусловлено особенностями определения магнитных характеристик оптическим методом Керра. При снятии петли гистерезиса методом Керра необходимо, чтобы луч от источника (лазера, светодиода) падал непосредственно

на поверхность магнитного материала (либо через прозрачные среды). Так как магнитный сплав 47НК в структуре 47НК-Ta-Al «скрыт» от луча проводящим слоем Al и защитным слоем Ta, то было принято решение напылять структуру на подложку из кварцевого стекла толщиной 0,15 мм. Для определения магнитных параметров образец просвечивался с обратной стороны кварцевой подложки – т. е. со стороны слоя сплава 47НК. Малая толщина кварцевого стекла обеспечивает минимальное влияние на измерения магнитных параметров.

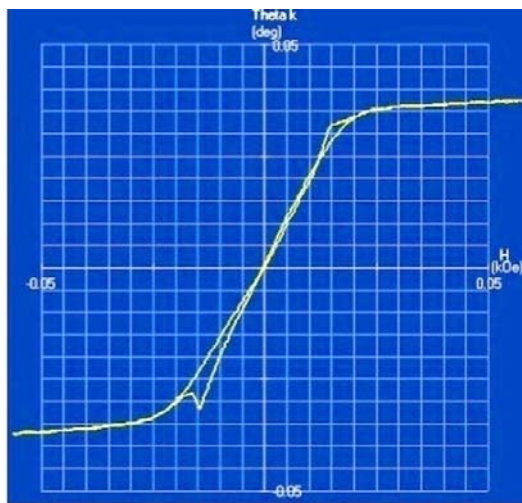
Графические представления петель гистерезиса образцов снятые в направлении осей легкого (ОЛН) и трудного (ОТН) намагничивания представлены на рис. 3. По осям отложены значения величины магнитного поля и условные единицы интенсивности света на приемнике.

На петлях гистерезиса снятых с образцов 47НК-Ta-Al присутствуют незначительные шумы (рис. 3в, 3г) качественно не влияющие на форму петли гистерезиса. Скорее всего, это связано с наличием дополнительной прозрачной среды – кварцевой подложки. Полученная форма петли гистерезиса указывает на отсутствие внутренних напряжений в структуре.

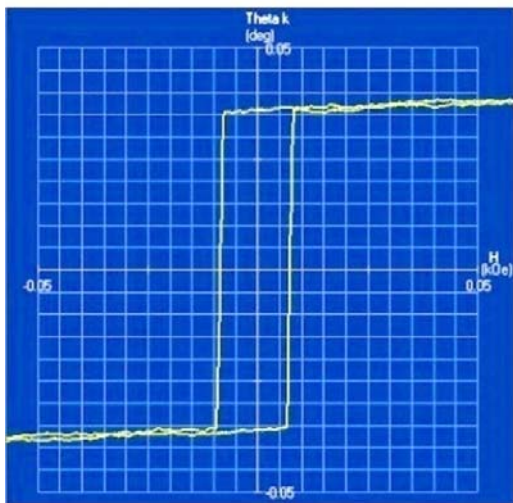
На образце монокристаллического кремния в районе поля анизотропии (рис. 3б) присутствует сильный скачок на петле гистерезиса, который, скорее всего, вносит вклад в нестабильность выходного сигнала МРП. При измерении магнитного поля пленочная катушка индуктивности формирует установочный импульс – «set» (или «reset»), который переводит магниторезистивные полоски плеч моста Уин-



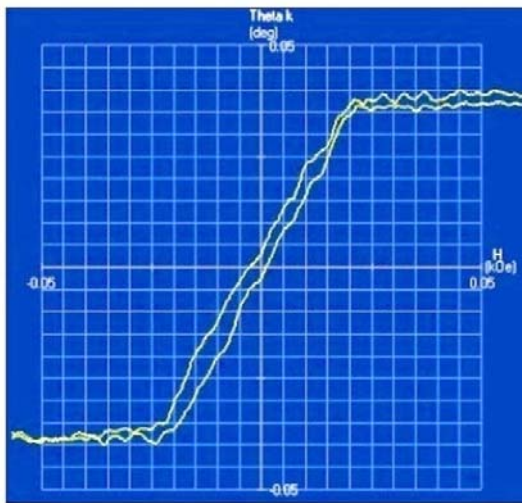
а



б



в



г

Рис. 3. Петли гистерезиса магниторезистивной пленки: а – 47НК на подложке монокристаллического кремния по ОЛН; б – 47НК на подложке монокристаллического кремния по ОТН; в – 47НК-Ta-Al на подложке из кварцевого стекла вдоль ОЛН; г – 47НК-Ta-Al на подложке из кварцевого стекла вдоль ОТН

стона в режим насыщения (горизонтальный участок на петле гистерезиса), при этом происходит «выстраивание» доменной структуры в направлении ОЛН. После импульса «set» (или «reset») происходит измерение магнитного поля в зависимости от ориентации протекающего тока в магниторезистивных полосках и внешнего магнитного поля, которое поворачивает домены на угол θ , в результате чего в выходной диагонали моста Уинстона образуется сигнал от воздействующего внешнего магнитного поля.

В идеальном случае, все домены должны быть ориентированы строго в одном направлении и после каждого импульса ориентироваться в одном и том же направлении в этом случае имеет место быть когерентное вращение. Повторяемость значений выходных напряжений в таком случае будет высока. За счет того, что на измеренных образцах наблюдается скачок на петле гистерезиса, часть доменов будет перемагничиваться некогерентным вращением, а скачкообразно. В результате исходное состояние

структуры магниторезистивных полосок (при каждом установочном импульсе) будет различным, а следовательно появится и значительная компонента нестабильности выходного напряжения магниторезистивного моста Уинстона.

На пластину монокристаллического кремния, прошедшую исследование петли гистерезиса оптическим методом Керра, была допылена структура Ta-Al для формирования целостной структуры 47НК-Ta-Al с последующим получением топологии мостов Уинстона. Изготовленные на основе полученных мостов Уинстона МРП были установлены на макет датчика магнитного поля, на котором определялась удельная чувствительность и СКО магнитного поля. Измеренная чувствительность имела удовлетворительные значения более 0,8 мВ/ВЭ, но СКО магнитного поля значительно превышало требования разработчиков и составило более 300 нТл (необходимый уровень не более 150 нТл).

По результатам измерений магнитных параметров было выдвинуто предположение о влиянии неравномерного прогрева монокристаллического кремния. Конструкция установки «Оратория – 9М» включает в себя четыре группы нагревателей расположенные через 90° и над каждым испарителем располагается по одной группе нагревателей.

Технологический процесс напыления на установке пленки сплава 47НК и магниторезистивной структуры 47НК-Ta-Al происходит с поворотом карусели на 180° . При переводе карусели с подложкой на позицию распыления происходит понижение температуры с последующим ее нагревом. Ввиду высокой теплопроводности кремния ($149 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$), используемые подложки на его основе, не позволяют получать магниторезистивную пленку с высокой однородностью доменных структур. Малая теплопроводность кварцевого стекла ($1,38 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$) позволяет получать пленки с однородной доменной структурой, однако подложки из данного материала значительно уступают по механическим свойствам подложкам из монокристаллического кремния. Кроме того в процессе исследований была измерена шероховатость поверхности подложек с помощью атомно-силового микроскопа. Качество поверхности подложек из кварцевого стекла так же уступает качеству поверхности пластин монокристаллического кремния. Таким образом, использование подложек из кварцевого стекла настоящими исследованиями признано нецелесообразным.

Дальнейшие исследования были направлены на уменьшение неравномерного прогрева пластин монокристаллического кремния. С этой целью были проведены экспериментальные работы по напылению магниторезистивных структур на монокристаллический кремний с использованием «аккумулятора тепла» и дополнительными выдержками в процессе отжига и напыления структуры. На полученных структурах, данным способом напыления, были изготовлены образцы МРП. Образцы МРП имели удельную чувствительность $0,8\text{--}0,9 \text{ мВ}/\text{ВЭ}$, нелинейность не более $0,1\%$ в диапазоне магнитных полей $\pm 1 \text{ Э}$, а СКО составило $60\text{--}80 \text{ нТл}$. Выход годных образцов составил порядка 20% .

МРП изготовленные по разработанной технологии успешно прошли испытания на длительное хранение (имитация $17,5$ лет хранения в отапливаемом хранилище и 3 (трех) лет хранения под навесом) и на стойкость к пониженной и повышенной температурам (от минус 40°C до плюс 60°C). Были получены зависимости ключевых параметров МРП от значения температуры в диапазоне от минус 40°C до плюс 60°C . Это позволит при создании датчика учесть температурное влияние и тем самым повысить точность измерения магнитного поля при различных температурах его использования.

Выводы

В ходе выполнения исследований была разработана технология изготовления МРП с характеристиками на уровне зарубежных аналогов, и с выходом годных образцов не менее 20% . Проведены испытания получаемых МРП на имитацию длительного хранения и стойкость к пониженным и повышенным температурам. Данные МРП являются основой для создания различных датчиков магнитного поля:

– магнитометров с диапазоном магнитных полей $\pm 1 \text{ Э}$;

– бесконтактных пороговых датчиков и датчиков угла поворота с напряженностью магнитного поля более 8 мТл .

Проведенные исследования вносят вклад в решение задачи по созданию отечественного первичного преобразователя магнитного поля взамен импортных МРП.

Литература

1. Маргелов А. Модульные и компонентные магниторезистивные датчики и компасы Honeywell. Часть I // // Новости электроники, 2006. № 10.

2. Пат. 2617454, РФ, МПКС1 Н01L 43/12. Способ изготовления магниторезистивного датчика / Гусев В. К., Негин А. В., Андреева Т. Г., Горохов С. В. // Изобретения, полезные модели. Официальный бюллетень. 2017. № 12.