

УДК 621.3.049.77

DOI 10.53403/9785951505170_2021_26_2_348

Разработка технологии изготовления магниторезистивных преобразователей

Разработана технология изготовления магниторезистивных преобразователей (МРП), являющаяся основой для создания датчиков магнитного поля: магнитометров с диапазоном магнитных полей ± 100 мкТл и бесконтактных пороговых датчиков и датчиков угла поворота с напряженностью магнитного поля более 8 мТл.

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

Магнитные элементы, благодаря таким своим свойствам и достоинствам, как энергонезависимость, широкий температурный диапазон, радиационная стойкость, возможность использования планарной интегральной технологии, совместимой с полупроводниковой технологией, занимают все больший объем в составе компонентов микроэлектроники. 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 возникает задача по разработке технологии изготовления отечественных первичных преобразователей магнитного поля на анизотропном магниторезистивном эффекте с характеристиками на уровне зарубежных аналогов (НМС 1021):

- удельная чувствительность не менее 0,8 мВ/ВЭ;
- нелинейность передаточной характеристики не более 0,1 % в диапазоне магнитных полей ± 100 мкТл;
- нестабильность выходного напряжения не более 6 мкВ, после подачи установочных импульсов «set/reset».

* Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Н. Новгород.

МРП представляет собой сложную многослойную структуру. Его функциональными слоями являются магниторезистивный мост Уинстона и пленочная катушка индуктивности «set/reset», выполняющая функцию выведения его в состояние с наибольшей чувствительностью. Ортогональное расположение двух и трех МРП позволяет изготовить датчики курса (азимута) по магнитному полю Земли – магнитометры для навигационных систем.

Одним из основных параметров, определяющим разрешающую способность МРП по магнитному полю, является стабильность выходного сигнала. Величина выходного напряжения магниторезистивного моста задает точность измерения величины магнитного поля после подачи установочных импульсов «set» и(или) «reset» катушкой индуктивности. В составе магнитометра стабильность выходного напряжения будет определять точность измерения магнитного поля или среднеквадратичное отклонение (СКО) магнитного поля. Нестабильность выходного напряжения МРП 6 мкВ соответствует СКО магнитного поля магнитометра в 150 нТл. Следует отметить, что стабильность выходного напряжения МРП зависит как от конструкции магниторезистивного моста Уинстона, так и от технологии его изготовления, при этом обеспечение стабильности выходного напряжения МРП является труднодостижимой и трудновоспроизводимой задачей.

Анизотропный (поперечный) магниторезистивный эффект проявляется в том, что сопротивление тонкой пермаллоевой полоски (сплав FeNi или FeNiCo), измеренное при приложении внешнего магнитного поля вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН), оказывается несколько выше, чем сопротивление полоски, измеренное при приложении внешнего магнитного поля вдоль оси трудного намагничивания (ОТН). Величина анизотропного магниторезистивного эффекта при комнатной температуре составляет 1,5–2,5 % в зависимости от материала магниторезистивного слоя [1, 2]. МРП наиболее чувствителен к полям, направленным перпендикулярно ОЛН.

В исходном состоянии МРП магнитная (доменная) структура магниторезистивных полосок хаотична и измерение величины магнитного поля не производится, ввиду нулевой чувствительности. Подача короткого импульса тока длительностью 1–2 мкс через катушку «set/reset» формирует поле, ориентирующее магнитные домены всех магниторезистивных полосок в направлении ОЛН, тем самым выводя магниторезистивный мост Уинстона в режим максимальной чувствительности. Катушка «set/reset» выполняет 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.

Для получения требуемых значений МРП была выбрана магниторезистивная структура моста Уинстона на основе 47НК–Ta–Al, где 47НК – сплав с химическим составом Ni(65 %)Co(20 %)Fe(15 %), Ta – защитный слой, Al – проводящий слой.

Технологический процесс изготовления МРП описан в [3]. Получение многослойной структуры проводилось на пластине монокристаллического кремния, с нанесенными на нее изолирующими слоями, с последующим вакуумным напылением слоев 47НК–Ta–Al на установке электронно-лучевого испарения «Оратория-9М» за один цикл откачки камеры.

Для получения топологического рисунка моста Уинстона использовалась фоторезистивная маска фоторезиста – microposit S1813SP15.

Травление структуры происходило в два этапа:

- 1) травление слоя Al;
- 2) травление слоев 47НК–Ta–Al.

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

Были разработаны состав травителя и режимы травления, при которых элементы МРП имеют четкие и ровные края. После травления структуры 47НК–Та–Al проводились контроль внешнего вида и измерение элементов магниторезистивного моста Уинстона на микроскопе МИКРО-200Т-01 при $320\times$ увеличении. Уход геометрических размеров составил до 4 мкм – на магниторезистивных полосках, а уход размеров элементов проводникового слоя – до 2 мкм, также отсутствовали питтинги на открытых участках магниторезистивных полосок.

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–Та–Al с целью определения возникновений внутренних напряжений в структуре слоя 47НК при напылении слоя алюминия. Измерения проводились на базе технологического центра МИЭТ (г. Зеленоград) магнитооптическим методом Керра на установке ВН-1071 производства NEOARK Corporation (Япония).

Для измерений магнитных параметров были изготовлены образцы на подложках:

– монокристаллического кремния с изоляционными слоями SiO_2 и Si_3N_4 и напыленной пленкой сплава 47НК;

– кварцевого стекла со структурой 47НК–Та–Al.

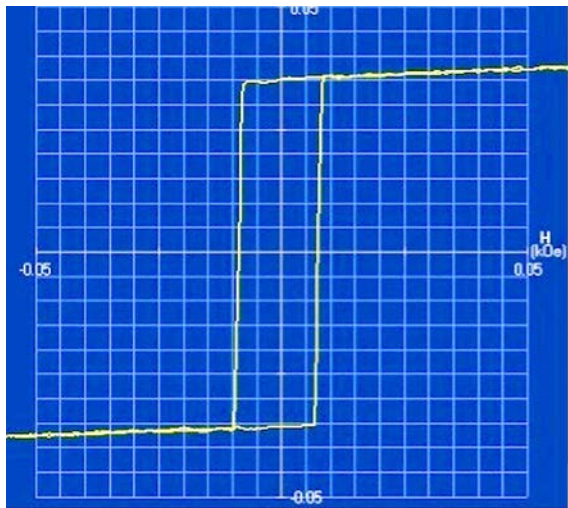
Использование двух образцов обусловлено особенностями определения магнитных характеристик оптическим методом Керра. При снятии петли гистерезиса методом Керра необходимо, чтобы луч от источника (лазера, светодиода) падал непосредственно на поверхность магнитного материала (либо через прозрачные среды). Так как магнитный сплав 47НК в структуре 47НК–Та–Al «скрыт» от луча проводящим слоем Al и защитным слоем Та, 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.

Графики измерения петель гистерезиса для обоих образцов, полученные при помощи программного обеспечения установки ВН-1071, представлены на рисунке. По осям отложены значения величины магнитного поля и условные единицы интенсивности света на приемнике.

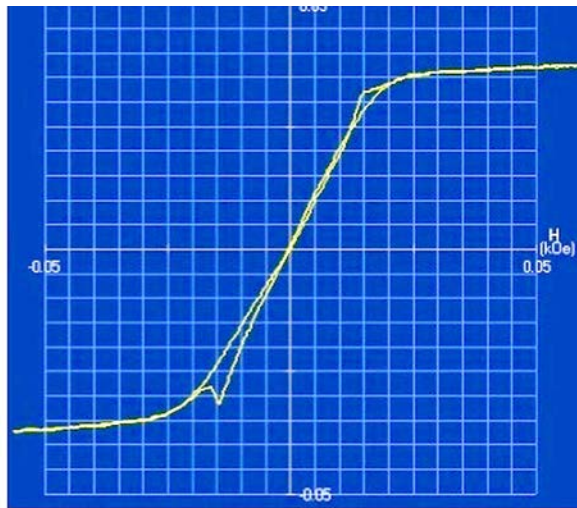
На петлях гистерезиса, снятых с образцов 47НК–Та–Al, присутствуют незначительные шумы (см. рисунки *в* и *г*), качественно не влияющие на форму петли гистерезиса. Скорее всего, это связано с наличием дополнительной прозрачной среды – кварцевой подложки. Полученная форма петли гистерезиса указывает на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

На монокристаллическом кремнии в районе поля анизотропии (см. рисунок *б*) присутствует сильный скачок на петле гистерезиса, который, скорее всего, вносит вклад в нестабильность выходного сигнала МРП.

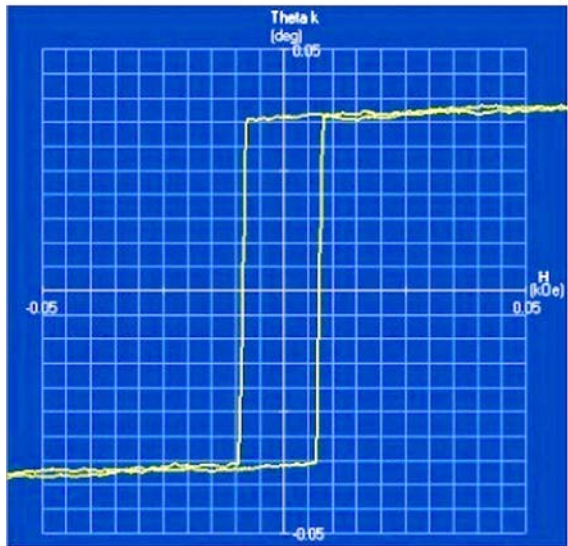
Принцип действия МРП заключается в способности магниторезистивной полоски изменять свое сопротивление в зависимости от ориентации протекающего через нее тока и внешнего магнитного поля. Для измерения магнитного поля пленочная катушка индуктивности магниторезистивного преобразователя формирует установочный импульс – «set» (или «reset»), который переводит магниторезистивные полоски плеч моста Уинстона в режим насыщения (горизонтальный участок на петле гистерезиса), при этом происходит «выстраивание» доменной структуры в направлении ОЛН. После снятия импульса «set» происходит измерение магнитного поля – внешнее поле поворачивает домены на угол θ , в результате чего в выходной диагонали моста Уинстона образуется сигнал от воздействующего поля.



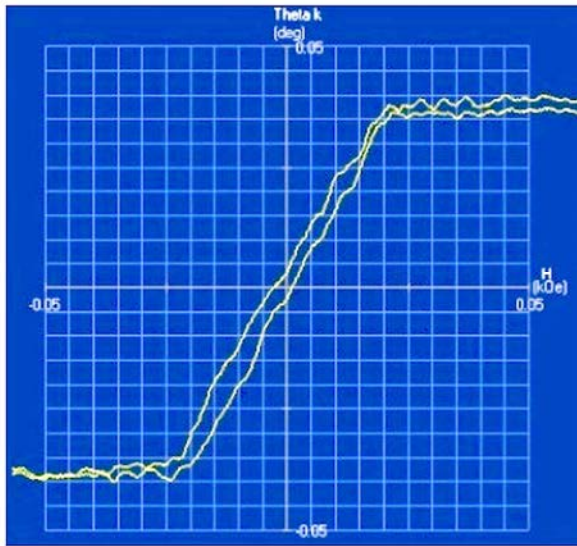
а



б



в



г

Петли гистерезиса магниторезистивной пленки: а – 47НК на подложке монокристаллического кремния по ОЛН; б – 47НК на подложке монокристаллического кремния по ОТН; в – 47НК–Та–Аl на подложке из кварцевого стекла вдоль ОЛН; г – 47НК–Та–Аl на подложке из кварцевого стекла вдоль ОТН

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. 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 подложку 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 магнитометра, на котором определялись удельная чувствительность и СКО магнитного поля. Измеренная чувствительность имела удовлетворительные значения более 0,8 мВ/ВЭ, а СКО магнитного поля значительно превышало требования и составило более 300 нТл.

Одной из причин большой нестабильности выходного напряжения МРП является неоднородность доменной структуры магниторезистивной пленки за счет неравномерного прогрева монокристаллического кремния в процессе напыления на установке «Оратория-9М». Технологический процесс напыления магниторезистивной структуры 47НК–Ta–Al происходит поочередно с двух испарителей с поворотом «карусели» на 180°. Четыре группы нагревателей расположены через 90°, и над каждым испарителем располагается по одной группе нагревателей. При переводе «карусели» с позиции на позицию происходит понижение температуры с последующим нагревом.

С целью уменьшения неравномерности прогрева были проведены экспериментальные работы по напылению магниторезистивных структур на монокристаллический кремний с использованием «аккумулятора тепла». На полученных структурах данным способом напыления были изготовлены образцы МРП, которые имели удельную чувствительность 0,8–0,9 мВ/ВЭ, нелинейность не более 0,1 % в диапазоне магнитных полей ± 100 мкТл, а СКО составило 60–80 нТл.

Выводы

В ходе выполнения исследований была разработана технология изготовления МРП с характеристиками на уровне зарубежных аналогов. Данные МРП являются основой для создания различных датчиков магнитного поля: магнитометров с диапазоном магнитных полей ± 100 мкТл и 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.

Список литературы

1. Борисов А. Современные АМР датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей // Компоненты и технологии. 2006. № 7. С. 56–60.
2. Воробьев А. В. Математическая модель анизотропного магниторезистивного датчика для инженерных расчетов // Вестник УТАТУ. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. 2012. Т. 16, № 1. С. 112–118.
3. Пат. 2617454 РФ, МПКС1 Н01L 43/12. Способ изготовления магниторезистивного датчика / В. К. Гусев, А. В. Негин, Т. Г. Андреева, С. В. Горохов // Изобретения, полезные модели. Официальный бюллетень. 2017. № 12.

Development of Technology of Manufacturing of Magnetic Resistant Converters

S. V. Gorokhov, A. V. Negin, V. E. Sergeev

A technology has been developed for the manufacture of magnetoresistive transducer, which is the basis for magnetic field sensors: magnetometers with a range of measured fields $\pm 100 \mu\text{T}$ and non-contact threshold sensors and angle sensors with a magnetic field strength of not more than 8 mT.