

НАНОТОЛЩИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИЗ ПЛЕНОК ПЕРМАЛЛОЕВ

Драпезо А.П., Прокошин В.И., Ярмолович В.А.

Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси,
Республика Беларусь, 220072 Минск, ул. П. Бровки 17

Планарный эффект Холла является хорошим инструментом как для изучения фундаментальных свойств ферромагнитных пленок, так и для технического использования этого эффекта в приборостроении: например, для детектирования слабых магнитных полей [1]. Причем, использование детекторов при уровне магнитных полей $B \leq 2$ мТл, изготовленных из тонких пленок пермаллоя, функционирующих на планарном эффекте Холла, в ряде случаев оказывается более предпочтительным, чем использование классического эффекта Холла в полупроводниковых пленках [1,2]. Это обусловлено тем, что диапазон магнитной чувствительности современных полупроводниковых элементов Холла на основе гетероэпитаксиальных структур n-InSb-i-GaAs, гомоэпитаксиальных структур n-GaAs-i-GaAs и др. составляет (300-600) мВ/Тл [2], что в 5-7 раз ниже этой величины для пермалловых элементов при маленьких полях. Известно применение тонких пленок пермаллоя для детектирования доменов в ЦМД микросхемах [3], что обуславливается их полной технологической совместимостью с элементами и устройствами на цилиндрических магнитных доменах, в то время как технология изготовления полупроводниковых детекторов магнитного поля принципиально не совместима с технологией изготовления ЦМД микросхем.

Пленочные структуры пермаллоя, преимущественно составов (Ni -81% Fe-19% и Ni-80%Fe-20%), изготавливались с помощью электронно-лучевого испарения на установке EBS-10А. Осаждение производилось на подложку из полированного ситалла марки ст-50-1, которая нагревалась до температуры $(300 \pm 5)^\circ\text{C}$. Затем проводился термический отжиг в течение часа при температуре 400°C без вскрытия вакуумной камеры с последующим медленным охлаждением. Толщина пленочной структуры контролировалась в процессе осаждения пленки с помощью градуированного кварцевого измерителя, сопряженного с микропроцессором. Набор толщин полученных и исследованных пленочных структур, находился в диапазоне (10 - 110) нм. Скорость конденсации поддерживалась приблизительно постоянной и составляла (0,15 - 0,20) нм в секунду. Такой технологический процесс позволяет получать сплошные пленки пермаллоя, которые изотропны в плоскости подложки. С целью изготовления пленочных структур пермаллоев, одноосно-анизотропных в плоскости подложки, применялось наложение постоянного магнитного поля в процессе осаждения, которое создавалось двумя массивными магнитами. Приложенное магнитное поле было параллельно плоскости подложки. Индукция магнитного поля превышала величину в 20 мТл.

С целью изготовления пленочных структур пермаллоев, однонаправленно-анизотропных в плоскости подложки, использовалось не только наложение постоянного внешнего магнитного поля в процессе осаждения, но и легирование состава добавками Mn (до 8%) или Cr (до 3%) с неоднородным распределением компонент по толщине. Направление легкого намагничивания (ЛН) совпадало с направлением вектора магнитной индукции внешнего поля (параллельно, но не антипараллельно). Известно, что добавки Mn, Cr, Ta придают магнитомягким пленкам пермаллоя элементы магнитной жесткости [4]. Все полученные

пленки были поликристаллическими. Их структура - беспорядочно ориентированные кристаллиты со средним диаметром (10-15) нм.

Разработана групповая технология изготовления нанотолщинных детекторов магнитных полей, функционирующих на планарном эффекте Холла. В основе изготовления положены следующие технологические циклы: - электронно-лучевое осаждение пленок пермаллоя на подложку из полированного ситалла, нагретую до температуры $(300 \pm 5)^\circ\text{C}$;

- термический отжиг в течении часа при температуре 400°C без вскрытия вакуумной камеры с последующим медленным охлаждением;

- контактная фотолитография, включающая следующие основные операции: нанесение фоторезиста ФН-11 или ФН-15 на поверхность пленки (установка фотолитографии и фотогравировки ЛФ-3, режимы - 200 об/мин, 20 секунд, транспортировка в светонепроницаемом контейнере), сушка фоторезиста (сушильный шкаф, режимы $90 \pm 5^\circ\text{C}$, 15 минут), экспонирование с хромовым шаблоном для миниатюрных элементов (4000 люкс, 1 минута) на установке средней точности ЭМ 526, проявление (толуол, 80 секунд), задубливание (не более 150°C , 30 минут), химическое травление при комнатной температуре под микроскопом МБС-3 в 30% растворе соляной кислоты в воде, промывка в трижды дистиллированной воде;

- групповая резка миниатюрных элементов детекторов на установке скрайбирования "Алмаз-1" (размер одного электронного элемента 0,5 x 0,5 мм, либо 5 x 5 мм, максимальная плотность элементов 400 см⁻²);

- приварка микроконтактов на установке сварки расщепленным электродом "Контакт -3А" (золотой микропровод, диаметром до 20 мкм, два токовых и два потенциальных вывода на каждом элементе, сварка 20-40 миллисекунд при электрическом напряжении на электроде 70-90 В). Элемент детектора располагался на плоском специальном держателе (приклеивался каплей клея БФ-2), состоящем из четырех проводов марки ПЭЛШО в шелковой изоляции, диаметром 0.2 мм, скрепленных эпоксидным универсальным клеем "ЭДП" ТУ 6-15-1070-02 и залуженных до образования плоских дорожек;

- подгонка начального напряжения смещения (выходного напряжения в отсутствии магнитного поля) по мере необходимости осуществлялась механическим подцарапыванием в области перехода пленки к контактными площадкам при включенном состоянии детектора до величины менее 10 мкВ;

- герметизация детекторов магнитных полей осуществлялась двумя компаундами-первоначально "Эластосилом", затем смесью эпоксидного клея универсального типа "ЭДП" в соотношении 50% и талька - 50%.

Входное и выходное электросопротивление изготовленных детекторов были приближенно одинаковыми и в зависимости от толщины магниточувствительной пленки могли варьироваться в пределах (5-30) Ом. Соответственно максимальный ток управления определялся величиной входного электросопротивления и геометрическими размерами элемента, и для 5 Ом -ных детекторов составлял 150 мА.

Исследованы полевые зависимости изготовленных детекторов: измерялась ЭДС планарного эффекта Холла U_x от приложенного в плоскости подложки внешнего магнитного поля B_0 , направленного под углом 45° к протекающему току J . В наиболее распространенных случаях зависимость $U_x(B_0)$ имеет форму "бабочки", поэтому магнитная чувствительность является в общем случае переменной величиной. В области где зависимость $U_x(B_0)$ близка к линейной значения магнитной чувствительности $\gamma = \Delta U_x / \Delta B_0$ не менее 10 мВ/мТл. В области магнитных полей превышающих 2мТл зависимость $U_x(B_0)$ выходит на насыщение и ветви гистерезиса соответственно схлопываются.

Установлено, что вольт-амперные характеристики U_x (J) при $B_0 = \text{const}$ аналогичны характеристикам полупроводниковых элементов Холла.

Для однонаправлено-анизотропных пленок зависимость $U_x(B_0)$ имеет такую же форму, как и для одноосно-анизотропных, но $U_x(B_0)$ сдвигается относительно начала координат по оси B_0 . Этот сдвиг является достаточно устойчивым по отношению к магнитным полям и температуре, однако он скачкообразно исчезает при достижении определенной температуры T , зависящей от легирующего элемента.

Для однонаправлено-анизотропных пленок величина гистерезиса $U_x(B_0)$ существенно зависит от ориентации вектора B_0 относительно направления легкого намагничивания (ЛН). Необходимым условием получения однонаправлено-анизотропных пленок NiFe является их осаждение в магнитном поле и легирование третьим компонентом, например Cr или Mn с градиентом легирующего элемента по толщине или, как частный случай, двухслойных пленки NiFe – Cr, NiFe – NiFe Mn. Однонаправленная анизотропия зависит от обменного взаимодействия между ферромагнетиками и антиферромагнетиками, находящимися в непосредственном контакте между собой, и антиферромагнитная компонента имеет температуру Нееля, меньшую, чем температура Кюри ферромагнетика, и обладает большой одноосной анизотропией. Благодаря ферромагнитно-антиферромагнитному обмену, направление ЛО антиферромагнетика фиксируется при охлаждении его ниже температуры Нееля. Этот механизм объясняет появление ЛН [4].

Таким образом установлено, что предельная зависимость планарной ЭДС Холла от внешнего намагничивающего поля $U_x(B_0)$ приложенного в плоскости пленки имеет гистерезис в форме «бабочки» для пленок пермаллоев, изготовленных как первоначально магнитно-изотропными в плоскости подложки, так и магнитно-анизотропными: одноосно-анизотропными и однонаправлено-анизотропными. Одним из недостатков детекторов на пленках пермаллоев являются процессы магнитной аккомодации. При квазистатическом циклическом перемагничивании пленки пермаллоя в поле $\pm H_0$, амплитуда которого близка к напряженности полного насыщения, в зависимостях планарной ЭДС Холла от напряженности наблюдаются процессы магнитной аккомодации, заключающиеся в том, что стационарное состояние U_x достигается не сразу, а после нескольких перемагничивающих циклов. Наличие гистерезиса в зависимостях $U_x(B_0)$ и процессов магнитной аккомодации вынуждает применять разработанные детекторы слабых магнитных полей в режиме ключа, т.е. наличия или отсутствия определенного уровня индукции магнитного поля.

Литература

Драпезо А.П., Прокошин В.И., Ярмолевич В.А. // Актуальные проблемы физики твердого тела: В сб. материалов международной научной конференции к 40 -летию ИФТТП НАН Беларуси и 90 - летию его основателя акад. Н.Н.Сироты, 4-6 ноября, 2003 г., Мн., изд. центр БГУ, 2003.- С. 253.

2. Прокошин В.И., Шепелевич В.Г., Ярмолевич В.А. Устройства автоматики и робототехники на эффекте Холла. Учебное пособие. Мн., РМ ИПК, 1991.-141 с.

3. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник/ А. М. Балбашов, Ф.В. Лисовский, В.К. Раев и др.; Под ред. Евтихьева Н.Н., Наумова Б.Н. -М., Радио и связь, 1987.- 488 с.

4. Технология тонких пленок (справочник). Под ред. Л. Майссела, Р. Гленга. - Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. Под. ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко, Т. 2. М., Сов. Радио, 1977.- 768 с.