

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.621.2:537.623

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПИН-ФЛОП СОСТОЯНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ СПИН-ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОЛНОГО МОСТА УИТСТОНА

© 2020 г. М. А. Миляев<sup>а</sup>, Л. И. Наумова<sup>а, \*</sup>, Р. С. Заворницын<sup>а</sup>, И. К. Максимова<sup>а</sup>,  
А. Ю. Павлова<sup>а</sup>, В. В. Проглядо<sup>а</sup>, В. В. Устинов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990 Россия

\*e-mail: [naumova@imp.uran.ru](mailto:naumova@imp.uran.ru)

Поступила в редакцию 23.03.2020 г.

После доработки 30.03.2020 г.

Принята к публикации 06.04.2020 г.

Найден способ единой термомагнитной обработки, формирующий попарно противоположный обменный сдвиг в спиновых клапанах, являющихся сенсорными элементами моста Уитстона. Способ основан на том, что при переходе синтетического антиферромагнетика в спин-флоп состояние в спиновом клапане формируются две магнитные фазы. Термомагнитная обработка в двухфазном состоянии приводит к формированию попарно взаимно противоположного обменного сдвига в разных элементах моста Уитстона. Направление формируемого обменного сдвига определяется одноосной анизотропией каждого элемента.

*Ключевые слова:* спиновый клапан, магнитосопротивление, синтетический антиферромагнетик, спин-флоп состояние, мост Уитстона

DOI: 10.31857/S0015323020080057

#### ВВЕДЕНИЕ

Обладающие гигантским магниторезистивным эффектом многослойные наноструктуры типа спиновый вентиль или спиновый клапан используются в микроэлектронике в качестве магниточувствительных материалов.

В состав спинового клапана входят два ферромагнитных слоя, которые разделены слоем меди. Один из ферромагнитных слоев (пиннингованный) соседствует со слоем антиферромагнетика и связан с ним обменным взаимодействием. В результате возникает однонаправленная анизотропия, характеризующая осью однонаправленной анизотропии (ООА). Петля гистерезиса перемагничивания этого слоя сдвинута в область больших полей. Второй ферромагнитный слой называется свободным и перемагничивается в малых полях.

Для увеличения термической стабильности характеристик спинового клапана пиннингованный слой замещают синтетическим антиферромагнетиком (САФ) [1–3]. САФ представляет собой трехслойную наноструктуру в которой два ферромагнитных слоя F1 и F2 разделены слоем рутения и связаны антиферромагнитным обменным взаимодействием. Слой F1 соседствует со слоем антиферромагнитного сплава и называется пиннингованным, а слой F2 – референтным.

В магниточувствительных устройствах часто соединяют четыре сенсорных элемента в мост Уитстона для уменьшения температурного дрейфа выходного сигнала. Для повышения уровня сигнала используют полный мост Уитстона, в котором каждый из элементов вносит вклад в выходной сигнал [4–6]. Для этого у двух элементов моста характеристика  $dR/dH$  должна быть положительной, а у двух других – отрицательной. В спиновых клапанах такие характеристики получаются, если ООА у них взаимно попарно противоположны. Известны разные способы получения такого расположения ООА.

Для спиновых клапанов с верхним расположением антиферромагнетика применяют двухэтапное напыление структур с противоположными ООА на разные части подложки. [7]. Еще один способ основан на том, что на одну часть подложки напыляют обычный спиновый клапан, а на другую – спиновый клапан с САФ. Противонаправленные ООА1 и ООА2 в разных частях подложки формируются в процессе термомагнитной обработки (ТМО) [8, 9]. В [7] показано как можно выборочно изменить ООА в двух элементах моста Уитстона, пропуская через них ток в процессе ТМО. При этом только эти два элемента прогреются до температуры блокировки ( $T_b$ ), при которой разрушается взаимодействие на границе ферромагнетик/антиферромагнетик.

При напылении в магнитном поле в спиновом клапане формируются два вида магнитной анизотропии: одноосная, характеризуемая осью легкого намагничивания (ОЛН), и однонаправленная, задающая ООА. После напыления ООА можно изменить при помощи ТМО, то есть отжига при  $T > T_b$  и последующего охлаждения в магнитном поле. После охлаждения формируется новая ООА, которая направлена также, как магнитный момент прилежащего к антиферромагнетика слоя. Для спиновых клапанов с САФ новая ООА зависит не только от направления, но и от величины приложенного при охлаждении поля. Причина состоит в том, что при определенной величине поля ( $H_{sf}$ ) САФ переходит в спин-флоп состояние [10, 11]. В спин-флоп состоянии магнитные моменты слоев F1 и F2 в плоскости пленки противоположны и перпендикулярны приложенному полю.

Когда при переходе в спин-флоп состояние повороты магнитных моментов слоев F1 и F2 по и против часовой стрелки энергетически эквивалентны, то в пленке спиновое клапана образуются две магнитные фазы с взаимно противоположными ООА [12, 13]. Если поворот в одну из сторон энергетически более предпочтителен, то в спиновом клапане формируется одна ООА. В этом случае спиновый клапан обладает большой величиной магнитосопротивления и характерной прямоугольной формой полевой зависимости магнитосопротивления. Ранее мы показали, что при отклонении поля  $H_{sf}$  от ООА или ОЛН поворот магнитных моментов слоев F1 и F2 в одну из сторон становится энергетически более выгодным [14, 15]. При помощи такой ТМО формируют взаимно перпендикулярное расположение ООА и ОЛН [16], что значительно ослабляет гистерезис перемагничивания свободного слоя.

Основанный на свойствах САФ способ получения разных ООА в элементах моста Уитстона был предложен в [17]. Однако в том случае угол между ООА спин-вентильных элементов в мосте Уитстона существенно отличался от  $180^\circ$ , что снижает уровень выходного сигнала.

В настоящей работе мы исследуем процесс пошагового поворота ООА в спин-вентильных элементах моста Уитстона при последовательных термомагнитных обработках, направленных на формирование магнитных фаз с антипараллельными ООА в разных элементах. Для получения антипараллельных ООА используется двух фазное спин-флоп состояние синтетического антиферромагнетика и наведенная одноосная магнитная анизотропия.

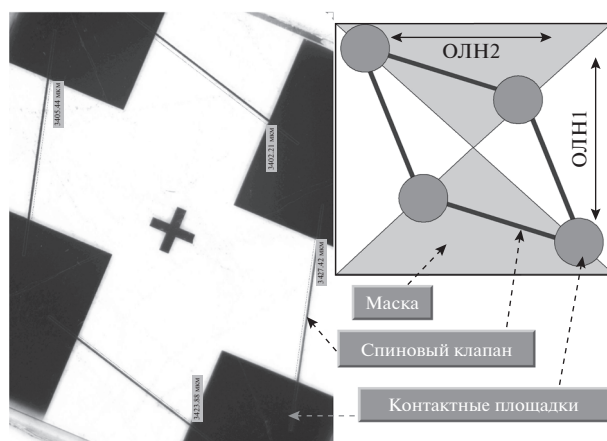


Рис. 1. Фотография (слева) и схематическое изображение (справа) микрополосок, образующих мост Уитстона, контактных площадок и расположения масок при напылении.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Спиновые клапаны композиции Ta(50 Å)/(Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>60</sub>Cr<sub>40</sub>(50 Å)/Co<sub>70</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>10</sub>(35 Å)/Cu(20 Å)/Co<sub>70</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>10</sub>(35 Å)/Ru(8 Å)/Co<sub>70</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>10</sub>(30 Å)/Fe<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub>(100 Å)/Ta(50 Å) были изготовлены методом магнетронного напыления. Толщины слоев указаны в скобках в ангстремах. Напыление проводилось в магнитном поле 80 Э, приложенном в плоскости подложки. Входящая в состав спинового клапана структура CoFeNi/Ru/CoFeNi является САФ. Изготовленные спиновые клапаны обладают высоким совершенством микроструктуры, гладкими межслойными границами и ярко выраженной текстурой <111>. Благодаря этим особенностям формируется антиферромагнитное обменное взаимодействие между свободным (FL) и референтным слоем. В результате максимальное магнитосопротивление достигает 11%, а сдвиг петли гистерезиса перемагничивания свободного слоя от  $H = 0$  составляет не более 1 Э [18].

Микрообъекты в виде мостов Уитстона, имеющих форму ромба с контактными площадками, расположенными по вершинам, изготавливали при помощи оптической литографии. Сторонами ромба являются спин-вентильные элементы длиной 3800 мкм и шириной – 30 или 20 мкм (рис. 1). Угол при вершине ромба составлял  $30^\circ$ .

Пленку спинового клапана напыляли в два этапа. На первом этапе при напылении часть подложки прикрывали маской. На втором этапе приложенное поле поворачивали на  $90^\circ$  градусов, расположение маски меняли и напыляли ту же наноструктуру на свободную часть подложки. В разных частях пленки получали взаимно перпендикулярные направления ОЛН1 и ОЛН2. После изготовления моста Уитстона это различие относилось к микрополоскам, образующим ромб.

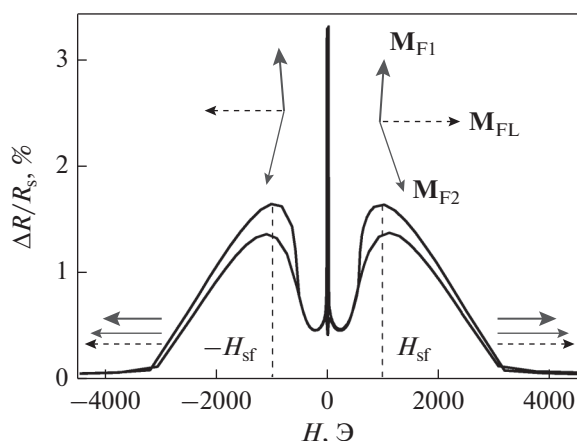


Рис. 2. Полевая зависимость магнитосопротивления спинового клапана при  $T = 175^\circ\text{C}$ . Жирная, тонкая и штриховая стрелки обозначают направление магнитных моментов слоев F1, F2 и свободного слоя.

После напыления спинового клапана в магнитном поле ОЛН и ООА параллельны. В процессе ТМО направление ООА можно изменить, однако ОЛН сохраняется. При ТМО образец нагревали до  $T = 175^\circ\text{C}$  и потом охлаждали в поле ( $H_{\text{TMO}}$ ), приложенном вдоль длинной диагонали ромба. Мы использовали три последовательных ТМО при разных  $H_{\text{TMO}}$ .

ТМО и измерения полевой зависимости магнитосопротивления проводили в установке, собранной на базе электромагнита и температурного контроллера. Магнитосопротивление определяли как  $\Delta R/R_s = (R(H) - R_s)/R_s$ , где  $R(H)$  – сопротивление элемента в магнитном поле и  $R_s$  – сопротивление в поле насыщения ( $H_{\text{sat}}$ ). При измерении вольт-эрсредней характеристики моста Уитстона постоянное напряжение  $U_{\text{in}} = 1$  В подавали на контактные площадки в острых углах ромба. Измеряемый сигнал  $U_{\text{out}}(H)$  снимали с контактных площадок в тупых углах ромба.

Для наблюдения магнитной структуры использовали многофункциональный сканирующий зондовый микроскоп СОЛВЕР НЕКСТ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Формирование магнитных фаз в спин-флоп состоянии синтетического антиферромагнетика.** Для определения величины поля  $H_{\text{sf}}$  мы измерили полевую зависимость магнитосопротивления при  $T = 175^\circ\text{C}$ . При этой температуре обменное взаимодействие в интерфейсе  $\text{CoFeNi/FeMn}$  разрушено, и магниторезистивная кривая симметрична относительно  $H = 0$  (рис. 2). Пологие максимумы магнитосопротивления в положительной и отрицательной области полей обусловлены пере-

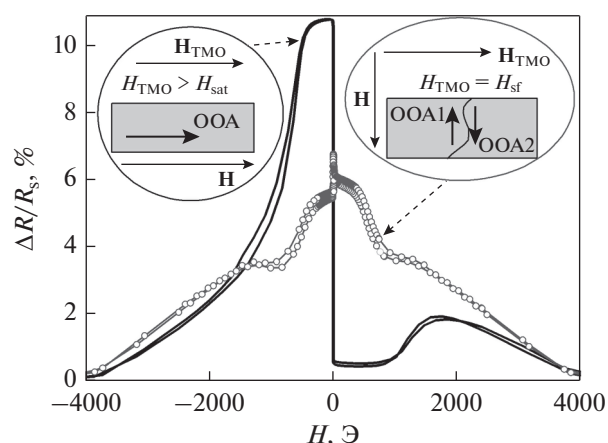


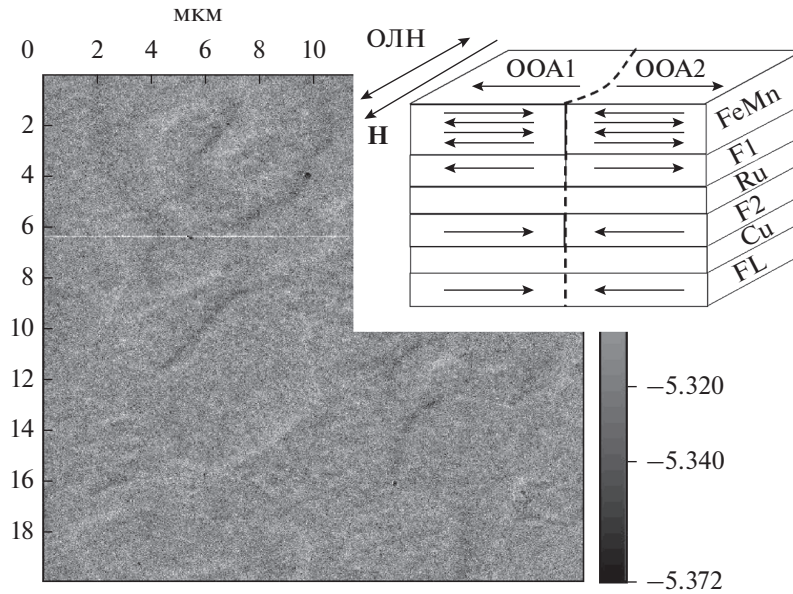
Рис. 3. Полевые зависимости магнитосопротивления, полученные после ТМО в поле, превышающем поле насыщения (линия), и в поле спин-флоп перехода (символы). На вставках показаны направления поля, приложенного при ТМО и при измерении, а также ООА, полученные после ТМО.

ходом САФ в спин-флоп состояние. Поле  $H_{\text{sf}}$  оценивали по положению этих максимумов [14].

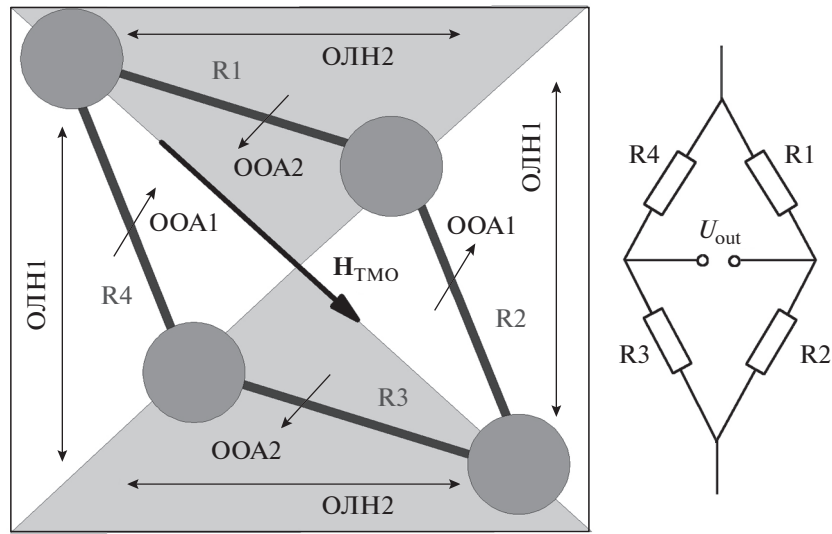
В пленке спинового клапана с САФ в зависимости от условий ТМО формируются одна или две магнитные фазы.

На рис. 3 показаны полевые зависимости магнитосопротивления спинового клапана, полученные после разных режимов ТМО в поле, направление которого совпадает с направлением поля, приложенного при напылении спинового клапана. Т.е.  $H_{\text{TMO}} \parallel$  ОЛН и параллельно ООА, сформированной при напылении. После ТМО в поле 9 кЭ, превышающем поле насыщения, во всей пленке сформировалась одна ООА. Магниторезистивная кривая имеет характерную для спинового клапана форму. Плато в отрицательной области полей соответствует состоянию с максимальным магнитосопротивлением. После ТМО в поле  $H_{\text{TMO}} = H_{\text{sf}} = 1$  кЭ магниторезистивная кривая имеет совершенно другую форму. В частности, максимальная величина магнитосопротивления стала в два раза меньше, и на кривой имеются два плато: одно – в положительных, а другое – в отрицательных полях. Такая форма магниторезистивной кривой получается, если в разных областях пленки спинового клапана сформировались взаимно противоположные ООА. Иными словами, после ТМО в поле  $H_{\text{sf}}$  в спиновом клапане сформировались две магнитные фазы.

На рис. 4 показаны результаты визуализации магнитной структуры, полученные для пленки спинового клапана после ТМО в поле  $H_{\text{sf}}$ . Видны области с разным магнитным контрастом, которые соответствуют областям с противоположным направлением ООА.



**Рис. 4.** Изображение магнитной структуры пленки спинового клапана после ТМО в поле спин-флоп состояния. На вставке показаны направления магнитных моментов в слоях наноструктуры для двух разных магнитных фаз.



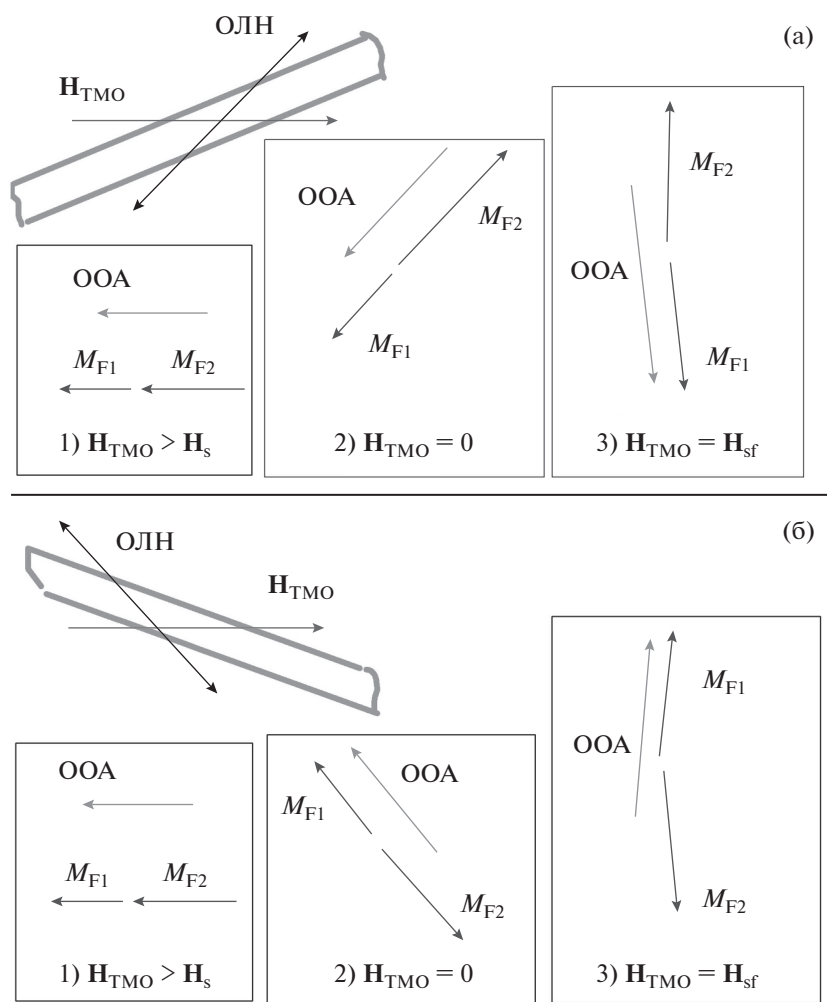
**Рис. 5.** Микрополоски R1, R2, R3 и R4, образующие мост Уитстона, контактные площадки, направления легких осей и поля, приложенного при ТМО, а также ООА, сформированные в результате ТМО. Справа – электрическая схема моста Уитстона.

**ОДНООСНАЯ МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ  
КАК ФАКТОР УПРАВЛЕНИЯ  
ФОРМИРОВАНИЕМ  
ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ АНИЗОТРОПИИ  
В ЭЛЕМЕНТАХ МОСТА УИТСТОНА**

На рис. 5 схематически показаны оси ОЛН1 и ОЛН2 в микрополосках моста Уитстона R2, R4 и R1, R3. Обозначенные на рис. 5 ООА1 и ООА2 были сформированы путем ТМО всей микроструктуры. Для формирования такого взаимного располо-

жения ООА в спин-вентильных элементах мы использовали три последовательных ТМО. Они проводились в едином цикле. Положение образца по отношению к приложенному вдоль большей диагонали ромба полю  $H_{ТМО}$  не изменялось.

На рис. 6 схематически показаны элементы моста Уитстона, направления ОЛН, поля  $H_{ТМО}$ , магнитных моментов обменно-связанных слоев F1 и F2 и ООА, полученные после каждой из трех ТМО. Эти направления для элементов R1, R3 и



**Рис. 6.** Схематическое изображение осей легкого намагничивания, поля, приложенного при ТМО, магнитных моментов слоев F1 и F2 и ООА, полученных после каждой ТМО в элементах R1, R3 (а) и R2, R4 (б).

R2, R4 показаны на рис. 6а и 6б, соответственно. Первая ТМО в поле  $H_{\text{TMO}} = -9$  кЭ проводилась для того чтобы сформировать во всех спин-вентильных элементах одинаковые ООА. Поле  $-9$  кЭ по величине больше поля насыщения, и магнитные моменты всех ферромагнитных слоев противоположны положительному направлению магнитного поля. После каждой ТМО новая ООА направлена так же как магнитный момент слоя F1, соседствующего с антиферромагнетиком.

Вторая ТМО проводилась в как можно более близком к  $H = 0$  поле. Если  $H_{\text{TMO}}$  меньше характерного поля антиферромагнитного обменного взаимодействия через слой рутения и характерного поля анизотропии, то магнитные моменты слоев F1 и F2 противонаправлены и параллельны оси анизотропии. Величина поля обменного взаимодействия через слой Ru составляет 1 кЭ. Для микрополосок шириной 20 и 30 мкм характерное поле наведенной при напылении одноосной ани-

зотропии составляет 10–15 Э, а поле анизотропии формы не превышает 4 Э. Эти оценки позволяют предположить, что в процессе второй ТМО для магнитных моментов  $M_{F1}$  и  $M_{F2}$  энергетически выгодно будет развернуться параллельно ОЛН. А именно, в элементах R1 и R3  $M_{F1}$  и  $M_{F2}$  будут ориентированы так как показано на рис. 6а, а в элементах R2 и R4 – как показано на рис. 6б. Тогда после второй ТМО оси однонаправленной анизотропии в элементах моста Уитстона будут параллельны ОЛН элемента и направлены по-разному в R1, R3 и R2, R4 (рис. 6). Такая ориентация ООА необходима для того, чтобы в третьей ТМО при переходе в спин-флоп состоянии в элементах R1 и R3 энергетически выгодным бы поворот  $M_{F1}$  и  $M_{F2}$  против часовой стрелки, а в элементах R2 и R4 – по часовой стрелке.

Третья ТМО проводилась в поле  $H_{\text{TMO}} = H_{\text{sf}}$ . После третьей ТМО получилось близкое к анти-

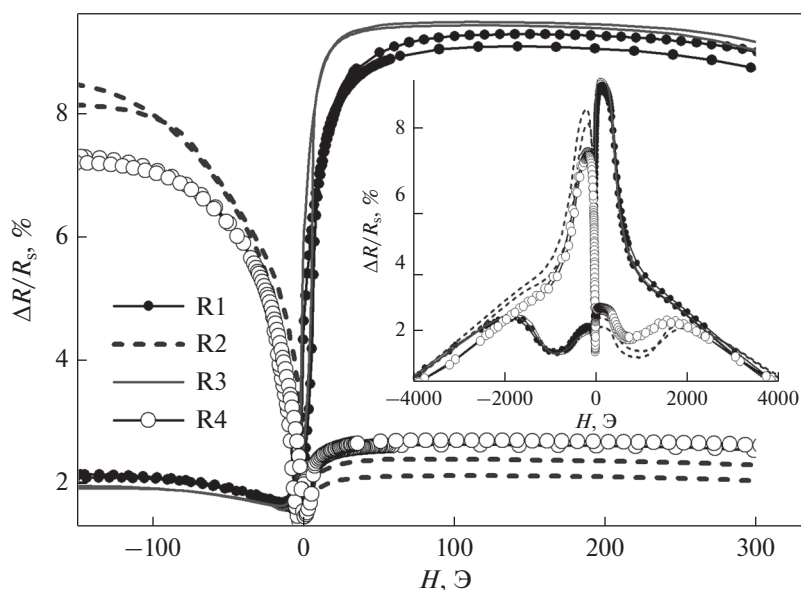


Рис. 7. Полевые зависимости магнитосопротивления спин-вентильных элементов моста Уитстона с шириной дорожек 30 мкм, полученные после трех ТМО. На вставке показаны те же магниторезистивные кривые в более широком интервале полей.

параллельному взаимное расположение ООА в элементах R1, R3 и R2, R4 (рис. 5, 6).

Ранее было показано, что для ослабления гистерезиса перемагничивания свободного слоя путем формирования скрещенной конфигурации ООА и ОЛН наиболее эффективной является ТМО в поле, незначительно превышающем поле перехода в спин-флоп состояние [15]. Были протестированы режимы ТМО, в которых величина поля, приложенного при третьей ТМО, была близка к  $H_{sf}$  и составляла 1.0, 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4 кЭ. Наиболее слабый гистерезис был получен при  $H_{ТМО} = 1.2$  кЭ.

На рис. 7 показаны полевые зависимости магнитосопротивления полученные для каждого элемента моста Уитстона с шириной дорожек 30 мкм после трех описанных выше ТМО. Элементы R1 и R3 имеют положительную характеристику  $dR/dH$ , а R2 и R4 – отрицательную. На вставке рис. 7 магниторезистивные кривые показаны в широком интервале полей. Во всех элементах помимо желательной магнитной фазы присутствует и нежелательная с противоположным направлением ООА. Особенно это заметно для элементов R1 и R3. Присутствие этой фазы видно по дополнительному плато на магниторезистивной кривой в отрицательных полях для элементов R1 и R3 и в положительных – для элементов R2 и R4. Однако величина магнитосопротивления в области этих дополнительных плато мала, следовательно, количество нежелательной фазы тоже мало. Проведенные ТМО привели к формированию в эле-

ментах моста Уитстона таких ООА, при которых мост будет работать как полный.

На рис. 8 показаны полевые зависимости напряжения  $U_{out}$  на измерительной диагонали от магнитного поля или так называемая вольт-эрстедная характеристика для моста Уитстона с шириной дорожек 30 мкм. Поле было приложено под углом  $\alpha = 0^\circ$  и  $30^\circ$  к короткой диагонали ромба. При  $\alpha = 0^\circ$  ширина петли гистерезиса  $U_{out}(H)$  составила 5 Э. При отклонении поля на  $\alpha = 30^\circ$  ширина петли уменьшилась до 2 Э. При  $\alpha = 0^\circ$  и  $30^\circ$

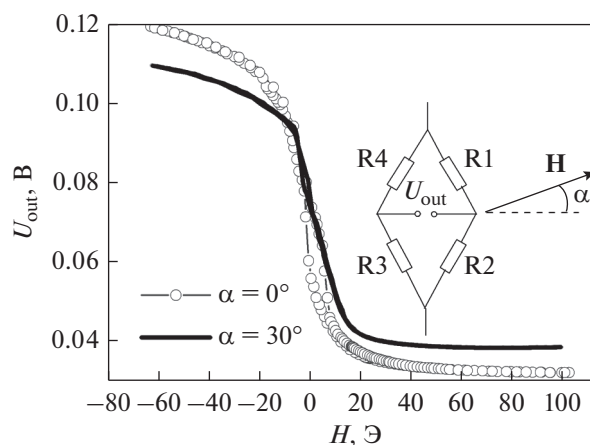


Рис. 8. Зависимости напряжения  $U_{out}$  от магнитного поля, приложенного вдоль короткой диагонали ромба (символы) и под углом  $30^\circ$  к ней (линия), полученные для моста Уитстона с шириной дорожек 30 мкм.

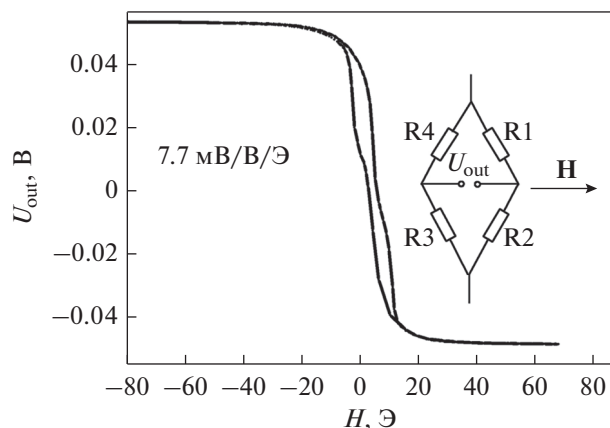


Рис. 9. Зависимость напряжения  $U_{out}$  от магнитного поля, приложенного вдоль короткой диагонали ромба, полученная для моста Уитстона с шириной дорожек 20 мкм.

градусов была получена чувствительность 3.8 и 2.5 мВ/В/Э, соответственно.

Процедура из трех последовательных ТМО была проведена и для моста Уитстона с шириной дорожек 20 мкм. На рис. 9 показана вольт-эрстедная характеристика, измеренная в поле, приложенном параллельно короткой диагонали ромба. Ширина петли гистерезиса  $U_{out}(H)$  в самой широкой части не превышает 5 Э. Чувствительность составляет 7.7 мВ/В/Э.

Для полного моста Уитстона, в котором каждый из четырех элементов сопротивлением  $R$  изменяет в магнитном поле сопротивление на величину  $\Delta R$ , соотношение между напряжением питания  $U_{in}$  и величиной измеряемого сигнала  $U_{out}$  можно оценить [4] как

$$U_{out} = U_{in} \frac{\Delta R}{R}. \quad (1)$$

Для спиновых клапанов, которые являются магниточувствительными элементами, в исследуемом мосте Уитстона отношение  $\Delta R/R$  составляет 0.11 (рис. 3). В свою очередь, соотношение между амплитудой снимаемого сигнала и поданным на мост напряжением питания для образца с шириной дорожек 30 мкм равно  $U_{out}/U_{in} = 0.10$ . Эти оценки позволяют заключить, что магнитное состояние спиновых клапанов в мосте близко к однофазному, и направления пиннинга в R1, R3 и R2, R4 антипараллельны. Иными словами, мы получили полный мост Уитстона, в котором каждый элемент вносит вклад в измеряемый сигнал.

Отметим, что величины чувствительности 2.5 и 7.7 мВ/В/Э в случае безгистерезисной и слабо гистерезисной  $U_{out}(H)$  характеристики являются достаточно высокими. Для сравнения, чувствительность 1.6 мВ/В/Э была получена для моста

Уитстона с двумя активными элементами и концентраторами магнитного потока [19]. На сегодняшний день типичные значения чувствительности, получаемые для сенсоров со слабым гистерезисом при использовании моста Уитстона с двумя активными элементами и магнитными концентраторами, не превышают 4.2 мВ/В/Э. В случае конфигурации полного моста Уитстона типичные значения чувствительности составляют от 0.1 до 3 мВ/В/Э [7, 9, 17].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком, объединенных в имеющий форму ромба мост Уитстона, найдена последовательность и режимы термомагнитных обработок, приводящих к формированию антипараллельных осей однонаправленной анизотропии. Различие в направлении формируемого на границе ферромагнетик/антиферромагнетик обменного сдвига вызвано различиями в направлении оси одноосной анизотропии в спин-вентильных элементах моста Уитстона.

Найденная последовательность состоит из трех термомагнитных обработок, проведенных в магнитном поле разной величины, но одинакового направления. Последняя термомагнитная обработка проводится в спин-флоп состоянии синтетического антиферромагнетика так, что магнитные фазы с противоположными осями однонаправленной анизотропии формируются в разных спин-вентильных элементах моста Уитстона.

Предлагаемый способ позволяет проводить термомагнитную обработку после литографического изготовления микрообъектов. Такая обработка необходима для восстановления магниторезистивных характеристик спиновых клапанов. Эта особенность является преимуществом данного способа перед двухэтапным напылением на одну подложку спиновых клапанов с противоположным обменным сдвигом.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме "Спин" АААА-А18-118020290104-2 и при поддержке РФФИ (грант 19-02-00057 и 20-42-660018 p\_a).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huai Y., Zhang J., Anderson G.W., Rana P., Funada S., Hung C.Y., Zhao M., Tran S. Spin valve heads with synthetic antiferromagnet CoFe/Ru/CoFe/FeMn // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. P. 5528–5530.
2. Li Y.F., Yu R.H., Dimitrov D.V., Xiao J.Q. Memory effect and temperature behavior in spin valves with and without antiferromagnet subsystems // J. Appl. Phys. 1999. V. 80. P. 5692–5695.
3. Lenssen K.-M.N., Kuiper A.E.T., van der Broek J.J., van der Rijt R.A.F., van Loon A. Sensor properties of a robust

- giant magnetoresistance material system at elevated temperatures // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 87. P. 6665–6667.
4. *Reig C., Cubells-Beltran M.-D., Munoz D.R.* Magnetic Field Sensors Based on Giant Magnetoresistance (GMR) Technology: Applications in Electrical Current Sensing // *Sensors.* 2009. V. 9. P. 7919–7942.
  5. *Ueberschär O., Almeida M.J., Matthes P., Müller M., Ecke R., Rückriem R., Schuster J., Exner H., Schulz S.E.* Optimized Monolithic 2-D Spin-Valve Sensor for High-Sensitivity Compass Applications // *IEEE Trans. Magn.* 2015. V. 51. № 1. P. 4002404.
  6. *Cubells-Beltran M.-D., Reig C., Munoz D.R.F., Cardoso de Freitas S.I.P., de Freitas P.J.P.* Full Wheatstone Bridge Spin-Valve Based Sensors for IC Currents Monitoring // *IEEE SENSORS J.* 2009. V. 9. № 12. P. 1756–1762.
  7. *Freitas P.P., Ferreira R., Cardoso S.* Spintronic Sensors // *Proc. IEEE.* 2016. V. 104. P. 1894–1918.
  8. *Ferreira R., Paz E., Freitas P.P., Ribeiro J., Germano J., Sousa L.* 2-Axis Magnetometers Based on Full Wheatstone Bridges Incorporating Magnetic Tunnel Junctions Connected in Series // *IEEE Trans. Magn.* 2012. V. 48. № 11. P. 4107–4110.
  9. *Luong V.S., Nguyen A.T., Tran T.H.D.* Antiparallel-Pinned Spin Valves With Modified Artificial Antiferromagnetic Layer for Full-Bridge Magnetic Sensors // *IEEE Trans. Magn.* 2018. V. 54. № 11. P. 4001705.
  10. *Tong H.C., Qian C., Miloslavsky L., Funada S., Shi X., Liu F., Dey S.* The spin flop of synthetic antiferromagnetic films // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 87. P. 5055–5057.
  11. *Son J., Lee S., Lee San., Kim S., Hong J.* Dependence of exchange coupling direction on cooling-field strength // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 110. P. 053908-1.
  12. *Negulescu B., Lacour D., Hehn M., Gerken A., Paul J., Duret C.* On the control of spin flop in synthetic antiferromagnetic films // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 109. P. 103911(1–9).
  13. *Milyaev M.A., Naumova L.I., Chernyshova T.A., Proglyado V.V., Kulesh N.A., Patrakov E.I., Kamenskii I.Yu., Ustinov V.V.* Spin-flop states in a synthetic antiferromagnet and variations of unidirectional anisotropy in FeMn-based spin valves // *Phys. Met. Metal.* 2016. V. 117. P. 1179–1184.
  14. *Milyaev M.A., Naumova L.I., Chernyshova T.A., Proglyado V.V., Kamenskii I.Yu. and Ustinov V.V.* Spin-flop states in a synthetic antiferromagnet and variations of unidirectional anisotropy in FeMn-based spin valves // *Phys. Met. Metal.* 2016. V. 117. P. 1179–1184.
  15. *Chernyshova T., Naumova L., Pavlova A., Maksimova I., Milyaev M., Proglyado V., Patrakov E., Ustinov V.* An hysteretic magnetic reversal of meander-shaped spin valve with synthetic antiferromagnet // *Sensors and Actuators A.* 2019. V. 285. P. 73–79.
  16. *Beach R. S., McCord J., Webb P., Mauri D.* Orthogonal pinning of two ferromagnetic layers in a synthetic spin valve // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 80. P. 4576–4578.
  17. *Yan S., Cao Z., Guo Z., Zheng Z., Cao A., Qi Y., Leng Q., Zhao W.* Design and Fabrication of Full Wheatstone-Bridge-Based Angular GMR Sensors // *Sensors.* 2018. V. 18. P. 1832.
  18. *Naumova L.I., Milyaev M.A., Zavornitsin R.S., Pavlova A. Yu., Maksimova I.K., Krinitsina T.P., Chernyshova T.A., Proglyado V.V., Ustinov V.V.* High-Sensitive Sensing Elements Based on Spin Valves with Antiferromagnetic Interlayer Coupling // *Physics of Metals and Metallography.* 2019. V. 120. № 7. P. 653–659.
  19. *Qian Z., Wang D., Daughton J., Tondra M., Nordman C., Popple A.* Linear Spin-Valve Bridge Sensing Devices // *IEEE Trans. Magn.* 2004. V. 40. № 4. P. 2643–2645.