

УДК 537.622

ВЛИЯНИЕ ПРОСЛОЙКИ Pt НА ДИНАМИКУ ДОМЕНОВ В УЛЬТРАТОНКИХ СЛОЯХ Co С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

© 2021 г. И. В. Шашков^a, *, Ю. П. Кабанов^a, В. С. Горнаков^a

^aИнститут физики твердого тела РАН, Черноголовка, 142432 Россия

*e-mail: shav@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 18.06.2021 г.

Принята к публикации 22.06.2021 г.

Исследована динамика доменных границ в ультратонких гетероструктурах Pt/Co(0.6 нм)/Pt(*t*)/Co(0.6 нм)/Pt с перпендикулярной магнитной анизотропией, где 0 нм < *t* < 10 нм. Обнаружен переход от коррелированного перемагничивания слоев к независимому при толщине прослойки платины *t* = 5.5 нм. В области перехода было обнаружено замедление и остановка границы в более “мягком” слое при постоянном поле, что указывает на изменение характера связи между слоями. Установлено, что энергия обменной связи между слоями Co в области перехода составляет примерно 17 мкДж/м². Усиление обменной связи между слоями приводит к релаксации намагниченности в “мягком” слое и к намагниченности в “жестком” при снятии внешнего поля, при этом движение границы описывается экспоненциальной зависимостью. Рассмотрена динамика доменных границ при независимом и связанном перемагничивании слоев, во всех случаях при малых полях она соответствует режиму ползучести. Показано, что скорости границ для разных слоев заметно отличаются и обусловлены разной шероховатостью интерфейсов.

Ключевые слова: магнитные домены, гетероструктуры, эффект Керра, ползучесть, перпендикулярная магнитная анизотропия, межслоевая обменная связь.

DOI: 10.31857/S1028096021110182

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные структуры (Co/Pt)_{*n*} с перпендикулярной магнитной анизотропией активно исследуются на протяжении длительного времени. Это связано как с фундаментальным интересом к таким магнитным структурам, так и с их возможным практическим применением в сверхбыстрой магнитооптической записи информации [1]. Процессы перемагничивания в слоях кобальта определяются не только магнитными свойствами отдельного ферромагнитного слоя, но и взаимодействием между слоями. В результате конкуренции между энергиями, включенными в процесс перемагничивания, наблюдается сложная картина формирования и эволюции доменной структуры [2–4].

Итоговое межслоевое взаимодействие возникает благодаря действию следующих механизмов: прямой обмен между слоями через точечные отверстия в немагнитной прослойке, осциллирующее взаимодействие Рудермана–Киттеля–Касуя–Иосида (РККИ) через электроны проводимости и магнитостатическое взаимодействие, обусловленное шероховатостью интерфейсов и

полями рассеяния, создаваемыми доменной структурой. Образующаяся связь между магнитными слоями может быть как ферромагнитной, так и антиферромагнитной (в зависимости от толщины прослойки). В работе [4] было показано, что под влиянием температуры характер связи может изменяться. В частности, было показано, что при понижении температуры усиливается обменная связь между слоями, что приводит к переходу от независимого перемагничивания слоев к коррелированному, когда намагниченности в слоях жестко связаны. При этом температура этого перехода меняется в зависимости от толщины немагнитной прослойки. В таких структурах возможны два типа центров зарождения доменов новой фазы: обычные, симметричные, которые активируются при любой полярности перемагничивающего поля, и специфические, асимметричные, величина поля переключения которых зависит от его полярности [5]. Кроме того, возникает сильная асимметрия в скоростях движения доменных границ в разных слоях, когда слои связаны достаточно слабо, чтобы влиять на направление намагниченности в соседнем слое.

Движение доменных границ в ультратонких слоях само по себе очень интересно, поскольку является примером динамики упругого интерфейса в среде со слабым беспорядком, наблюдающимся во многих физических системах [6–8]. В таких средах возможны разные режимы движения: ползучесть — термоактивационное преодоление препятствий, депиннинг — переходный режим от скачкообразного движения через препятствия к скольжению, а также равномерное течение, когда скорость линейно зависит от приложенной силы. В ультратонких пленках Pt/Co/Pt режим низких скоростей доменных границ соответствует режиму ползучести [6, 7, 9, 10]. Затем с увеличением поля происходит переход к вязкому течению, когда скорость границы становится пропорциональной приложенному внешнему полю. Доменные границы в многослойных пленках (Co/Pt)_n так же демонстрируют эти режимы, тем не менее, наличие обменной связи между слоями может изменять характер зависимости скорости от поля.

В данной статье мы изучаем перемагничивание и динамические свойства доменных границ в многослойной пленке Pt/Co/Pt-клин/Co/Pt. Экспериментально изучен переход от слабой ферромагнитной связи между слоями, когда намагниченности в слоях практически не зависят друг от друга, к более сильной, когда намагниченности скореллированы между собой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Ультратонкая гетероструктура Pt(10 нм)/Co(0.6 нм)/Pt(t)/Co(0.6 нм)/Pt(3 нм) с прослойкой Pt в форме клина была выращена с помощью магнетронного напыления на кремниевой подложке длиной 50 и шириной 6 мм при комнатной температуре. Толщина прослойки из платины t линейно возрастала от 0 на одном конце до 10 нм на другом. После выращивания структуры ее разрезали на 10 равных частей по 5 мм длиной. Перемагничивание образцов исследовалось с помощью полярного магнитооптического эффекта Керра. Перпендикулярное плоскости образца магнитное поле создавалось с помощью соленоида в интервале ± 40 мТл. Локальные магнитооптические петли гистерезиса были измерены с помощью электромагнитного умножителя в поле, разворачивающемся с частотой 0.25 Гц. Для уменьшения отношения шум/сигнал проводилось сглаживание петель гистерезиса по 20 циклам. Измерение скорости движения доменных границ производилось в импульсном магнитном поле. Длительность импульсов варьировалась от 1 до 5 мс в зависимости от приложенной амплитуды внешнего поля. Перед каждым измерением скорости образцы намагничивались до насыщения в поле, перпендикулярном поверхности образца $\mu_0 H_{\text{sat}} = 40$ мТл.

Такая процедура требовалась, чтобы убрать вероятные центры зарождения доменов новой фазы. Затем прикладывалась серия измерительных импульсов противоположной полярности. Домены в нижнем и верхнем слое идентифицировали по различному магнитооптическому контрасту, обусловленному различной величиной отраженного света от нижнего и верхнего ферромагнитных слоев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подробное рассмотрение кинетики перемагничивания данной серии образцов проводилось в работе [5]. Было установлено, что для толщины прослойки $t < 1.6$ нм пленка имеет плоскостную анизотропию. Из приведенной на рис. 1а петли гистерезиса видно, что при намагничивании перпендикулярно плоскости образца магнитооптический сигнал линейно изменяется с полем, такое поведение характерно для перемагничивания вдоль трудной оси. При $t > 1.6$ (рис. 1б–1е) наблюдается сильная перпендикулярная анизотропия. При толщине прослойки до 5.5 нм наблюдается коррелированное зарождение и рост цилиндрических доменов в обоих слоях кобальта. Затем при $t > 5.5$ нм происходит резкий переход к независимому перемагничиванию слоев, при этом коэрцитивность слоев остается близкой. Наблюдаемый магнитооптический сигнал больше по амплитуде при совместном перемагничивании слоев, отношение сигнал/шум в этом случае равно 5, а при независимом перемагничивании слоев отношение составляет примерно 2.5.

На рис. 2 представлена доменная структура, наблюдаемая в области резкого перехода от коррелированного перемагничивания слоев к независимому. Правой и левой областям, отмеченным на рисунке пунктирными прямоугольниками, соответствуют петли на рис. 1в и 1г. В левой части изображения мы видим два домена (светлый и темный), соответствующие противоположным направлениям намагниченности в них. При этом намагниченности в слоях жестко связаны, т.е. перемагничивание в обоих слоях происходит одновременно. Соответствующая петля гистерезиса имеет прямоугольную форму без каких-либо значимых особенностей (рис. 1в). В правой части рис. 2 можно различить три контраста, которые указывают на три варианта намагниченности в слоях (темный — оба слоя намагничены вверх, серый — один вверх другой вниз, светлый — оба вниз). Петля гистерезиса (рис. 1г), измеренная в этой части образца, имеет ступенчатый вид с шириной ступеньки 1 мТл. При увеличении толщины прослойки платины наблюдается постепенное увеличение ширины ступеньки до 2 мТл (рис. 1е). Это наблюдение указывает на различие в коэрци-

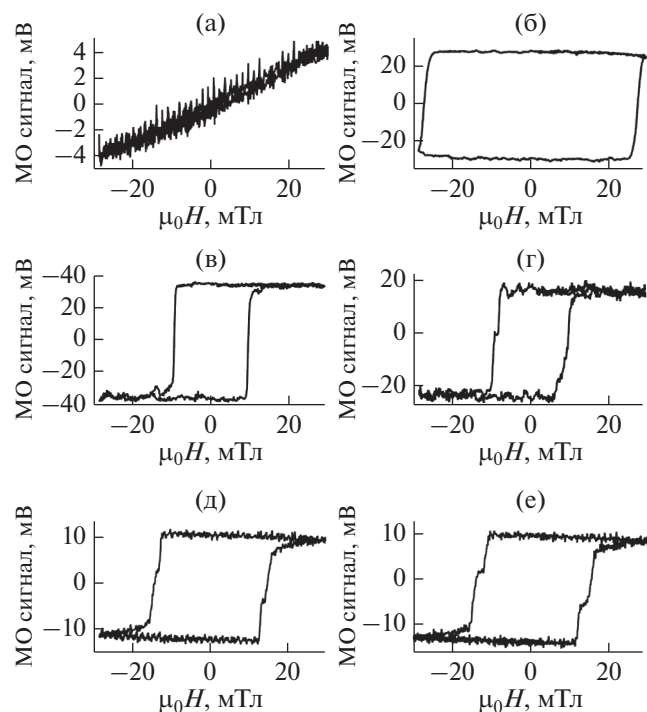


Рис. 1. Локальные петли гистерезиса для образцов с различной средней толщиной прослойки платины, нм: а – $t = 1.5$, б – $t = 2.5$, в и г – $t = 5.5$, д – $t = 7.5$, е – $t = 9.5$.

тивности слоев, которое не было замечено ранее при измерении петель на вибромагнетометре [5].

При перемагничивании в постоянном магнитном поле, близком по величине к коэрцитивной силе, при толщине прослойки $t < 5.5$ нм сначала наблюдается зарождение доменов новой фазы на случайных дефектах. Затем процесс перемагничивания продолжается за счет движения доменных границ. В случае прослойки $t > 5.5$ нм, также наблюдается зарождение на случайных дефектах доменов в обоих слоях с их последующим медленным ростом. Тем не менее, в одном из слоев, который назовем “мягким”, новый домен быстро закрывает всю площадь образца. При этом скорость роста домена новой фазы в другом слое, назовем его “жестким”, остается достаточно низкой. Движение доменных границ в магнитном поле ниже коэрцитивной силы указывают на их сильную ползучесть при комнатной температуре.

На рис. 3 представлены зависимости скоростей доменных границ от приложенного внешнего поля для пленки с прослойкой $t = 5.5$ нм. Мы наблюдали одинаковые скорости ДГ при приложении магнитного поля вверх и вниз, поэтому на рисунке приведены только скорости для магнитного поля, направленного вверх. Когда намагниченности в слоях не связаны между собой, скорость границы в “мягком” слое (светлые круги) в

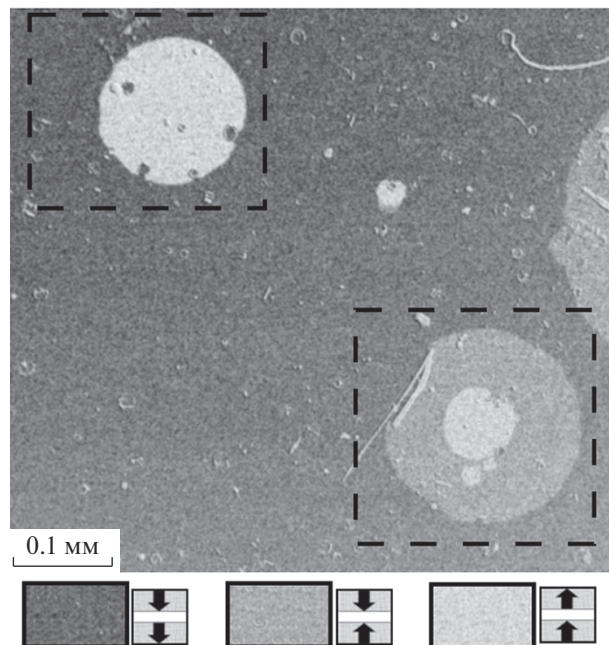


Рис. 2. Пример доменной структуры в образце со средней толщиной прослойки платины $t = 5.5$ нм. Петли гистерезиса на рис. 1в, г соответствуют левой и правой выделенным пунктиром областям. Снизу представлено направление намагниченности в слоях кобальта соответствующее магнитооптическому контрасту.

два–три раза превышала скорость в “жестком” (темные круги) при разных значениях приложенного поля. Тем не менее, характер зависимостей – подобный, т.е. при малых полях наблюдается близкая к линейной зависимость $\ln(v) \sim H^{-0.25}$ (вставка на рис. 3), затем при полях, значительно превышающих коэрцитивную силу, наблюдается отклонение от этой зависимости. При дальнейшем увеличении внешнего поля, происходит переход к линейной зависимости скорости доменных границ от приложенного поля. В случае, когда намагниченности в слоях жестко связаны, скорость составной границы (светлые квадраты) зависит от поля аналогичным образом. В малых полях она имеет заметно меньшую величину, чем скорости в отдельных слоях. В полях выше коэрцитивной силы скорость составной границы приближается к скорости границы в “жестком” слое. Вероятно, дефекты на интерфейсе “жесткого” слоя определяют движение составных границ. Число центров зарождения доменов быстро растет с увеличением прикладываемого внешнего поля, что, в свою очередь, затрудняет вычисление реальной скорости доменных границ в больших полях.

Представленные результаты указывают нам на изменение характера взаимодействия между слоями кобальта при увеличении толщины прослой-

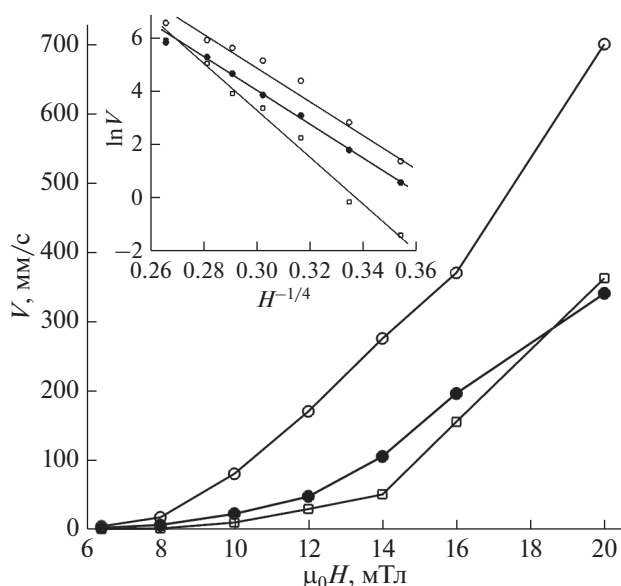


Рис. 3. Зависимость скорости доменной границы от внешнего магнитного поля в образце со средней толщиной прослойки платины $t = 5.5$ нм. Светлые круги — скорость границы в мягком слое; темные круги — скорость границы в жестком слое; светлые квадраты — скорость границы в случае жесткой связи намагниченностей в слоях. На вставке представлены зависимости логарифма скорости от магнитного поля в степени -0.25 .

ки платины. Наблюдаемая плоскостная намагниченность пленок при толщине прослойки платины до 1.6 нм, вероятно, обусловлена прямым обменным взаимодействием между слоями кобальта, обусловленным островковым ростом платины [5]. Увеличение толщины платины приводит к установлению намагниченности перпендикулярно плоскости пленки, типичному для ультратонких слоев Co (0.6 нм) [11]. Переход от коррелированного к несвязанному зарождению и распространению доменов в разных слоях при толщине Pt $t = 5.5$ нм может быть вызван ослаблением ферромагнитной межслоевой связи. Величина связи становится незначительной, чтобы взаимно ориентировать направления намагниченности в слоях. В то же время скорости доменных границ в “мягком” слое значительно больше скоростей, наблюдаемых в “жестком”. Один из механизмов, вызывающих такое различие в скоростях доменных границ в слоях, обусловлен тем, что перемагничивание “мягкого” слоя приводит к установлению антипараллельного направления намагниченности в слоях. Такое упорядочение увеличивает магнитостатическую энергию, с одной стороны, и уменьшает обменную энергию между слоями, с другой. Действительно РККИ-взаимодействие является осциллирующим и при толщинах прослойки 5.5 нм имеет положительную величину [12, 13]. Таким образом, антипа-

раллельная конфигурация намагниченностей может являться взаимовыгодной, что способствует росту скорости доменных границ в “мягком” слое. При последующем перемагничивании “жесткого” слоя наблюдается уход от этого взаимовыгодного состояния, и граница в этом случае тормозится. Другой механизм связан с разной коэрцитивностью слоев, в первую очередь, из-за разной шероховатости интерфейсов, что так же будет отражаться на скоростях доменных границ.

Как было сказано ранее, пленка с прослойкой $t = 5.5$ нм сочетает оба варианта движения границ в ферромагнитных слоях. Кроме того, в данной пленке наблюдается переход между этими вариантами. При перемагничивании с помощью коротких импульсов граница в мягком слое движется от края с наиболее толстой прослойкой платины в сторону более тонкой. Эта граница останавливается на энергетическом барьере в области изменения межслоевой связи, после которого наблюдается “жесткая” связь между намагниченностями в слоях. В моменты между импульсами граница в “мягком” слое медленно возвращается назад (в сторону более слабой связи между слоями). Следующий импульс возвращает границу к этому барьеру, но дальше продвинуть ее не может. Движение границы в “мягком” слое за барьер при данном поле возможно только совместно с границей в более “жестком”. Увеличение амплитуды импульса позволяет несколько дальше продвинуть границу в область перехода, но далее граница опять упирается в энергетический барьер, который она может преодолеть только совместно с границей во втором слое. На рис. 4 приведена релаксация границы в области изменения межслоевой связи. В момент времени ($\tau = 0$ с) представлена сформированная стационарная доменная структура, которая сохраняется при снятии магнитного поля. Мы видим, что большую часть занимает область, где намагниченности в обоих слоях направлены вниз. Также присутствует область, где намагниченность “мягкого” слоя направлена вверх, а “жесткого” — вниз, и где намагниченности в обоих слоях смотрят вверх. К этой структуре прикладывается импульс магнитного поля ($\tau = 1$ мс, $\mu_0 H = 14$ мТл), что приводит к структуре на втором кадре, на котором достаточно большая часть изображения стала светлой, т.е. намагниченность в обоих слоях направляется вверх. Однако можно выделить область, где намагниченность направлена вверх только у “мягкого” слоя — серая область. В последующие моменты времени ($\tau = 3$ – 92 с) наблюдается медленное возвращение границы в “мягком” слое назад в направлении границы неперемагниченного “жесткого”. В конечном итоге граница в “мягком” слое релаксирует к некоторому равновесному значению, в данном случае к месту остановки границы в “жестком” слое ($\tau = 92$ с). Зависимость релаксации границы от

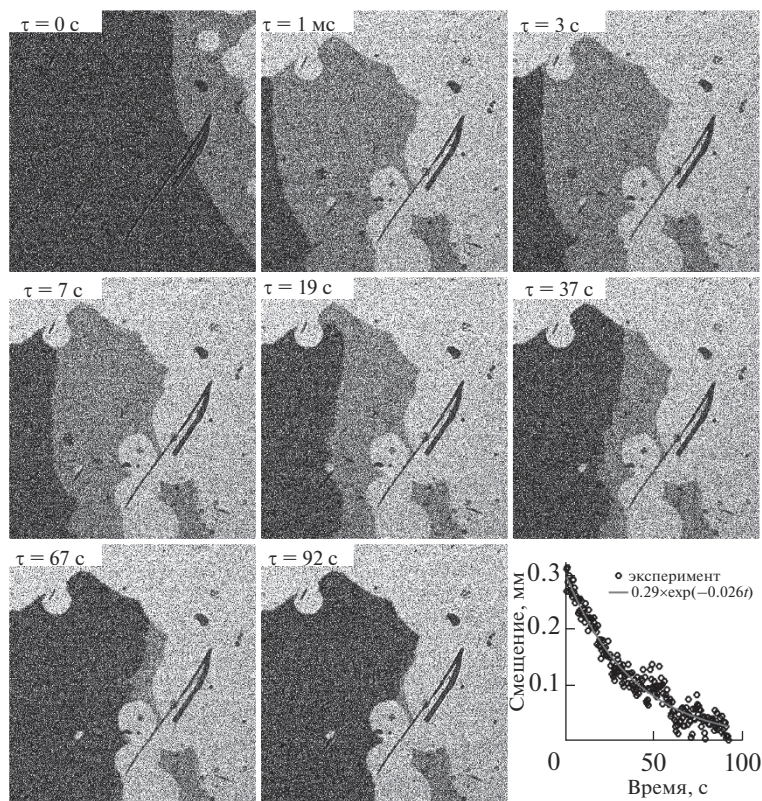


Рис. 4. Смещение доменной границы в мягком слое после приложения импульса магнитного поля амплитудой $A = 14$ мТл и $\tau = 1$ мс. Темный, серый и светлый контрасты соответствуют трем вариантам упорядочения намагниченностей в слоях. На графике приведено смещение границы контраста темный–серый в выделенной пунктиром области.

времени измерялась по смещению границы “темный–серый” контраст в области, выделенной пунктиром на серии кадров, приведенной на рис. 4. Из графика на рис. 4 видно, что зависимость смещения границы от времени хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью.

Переход от несвязанного перемагничивания слоев к коррелированному при толщине прослойки $t = 5.5$ нм дает возможность напрямую оценить энергию связи между слоями, при которой происходит переход от одного механизма к другому. С учетом того, что клин разделяющей прослойки Pt утолщается на 0.2 нм на 1 мм образца, в исследуемой под микроскопом области наблюдается утонение прослойки только на один слой. Этого утонения достаточно, чтобы кардинально изменить механизм перемагничивания структуры. Рассмотрим прямолинейные участки границ в “мягком” и “жестком” слое вблизи области перехода. При включении импульса магнитного поля границы в каждом слое начинают движение и перемещаются на расстояния s_m и s_j соответственно. Поскольку при этом поле в “мягком” слое далее доменных границ сдвинуться не может, то энергия запасенная в границе будет равна энергии обменной связи между слоями, и, таким образом, кон-

станта обмена $J_{\text{ies}} = -2\mu_0 M H t_{\text{Co}} = -17$ мкДж/м², где $M = 1 \times 10^6$ А/м – намагниченность слоя и $\mu_0 H = 14$ мТл – внешнее поле, $t_{\text{Co}} = 0.6$ нм – толщина “мягкого” ферромагнитного слоя. Эта величина обмена между слоями близка к значениям, получаемым из петель гистерезиса в подобных структурах [14]. Движение границы после снятия магнитного поля можно описать обычным уравнением гармонического осциллятора с затуханием. Затухание в этой системе велико, так как в среде много энергии тратится на преодоление потенциального рельефа, поэтому скорость возврата границы в область уменьшения энергии связи между слоями будет экспоненциально затухать, как видно из графика на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серия коротких импульсов внешнего магнитного поля использовалась для изучения перемагничивания многослойных пленок Pt/Co(0.6 нм)/Pt(t)/Co(0.6 нм)/Pt с перпендикулярной магнитной анизотропией. С помощью эффекта Керра показана сильная ферромагнитная связь при малых толщинах прослойки платины. С увеличением толщины прослойки связь между слоями осла-

бекает, что отражается в доменной структуре и измеряемых петлях гистерезиса. В работе удалось напрямую оценить величину энергии обмена между слоями, при которой происходит изменение механизма перемещения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья выполнена авторами в рамках государственного задания в ИФТТ РАН.

ЗАЯВЛЕНИЕ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСАХ

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих, финансовых интересов или личных отношений, которые могли повлиять на работу, представленную в этой статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Lu B., Klemmer T., Wierman K., Ju G.P., Weller D., Roy A.G., Laughlin D.E., Chang C.H., Ranjan R. // *J. Applied Physics*, 2002. V. 91. № 10. P. 8025. <https://doi.org/10.1063/1.1452269>
2. Matczak M., Schäfer R., Urbaniak M., Kuświk P., Szymański B., M. Schmidt M., Aleksiejew J., Stobiecki F. // *J. Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 422. P. 465. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.042>
3. Robinson M., Au Y., Knepper J.W., Yang F.Y., Sooryakumar R. // *Physical Review B*. 2006. V. 73. P. 224422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.224422>
4. Xie X.P., Zhao X.W., Knepper J.W., Yang F.Y., Sooryakumar R. // *Physical Review B*. 2007. V. 76. P. 184433. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.184433>
5. Shull R.D., Iunin Y.L., Kabanov Y.P., Nikitenko V.I., Skryabina O.V., Chien C.L. // *J. Applied Physics*. 2013. V. 113. № 17. P. 17C101. <https://doi.org/10.1063/1.4793703>
6. Lemerle S., Ferre J., Chappert C., Mathet V., Giamarchi T., Le Doussal P. // *Physical Review Letters*. 1998. V. 80. P. 849. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.849>
7. Metaxas P.J., Jamet J.P., Mougín A., Cormier M., Ferré J., Baltz V., Rodmacq B., Dieny B., Stamps R.L. // *Physical Review Letters*. 2007. V. 99. P. 217208. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.217208>
8. Shashkov I.V., Lebyodkin M.A., Gornakov V.S. // *Solid State Phenomena*. 2014. V. 215. P. 35. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.215.35>
9. Feigel'man M.V., Geshkenbein V.B., Larkin A.I., Vinokur V.M. // *Physical Review Letters*. 1989. V. 63. P. 2303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.63.2303>
10. Morgunov R.B., Yurov A.V., Yurov V.A., Talantsev A.D., Bezverhnyi A.I., Koplak O.V. // *Physical Review B*. 2019. V. 100. P. 144407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.144407>
11. Iunin Y.L., Kabanov Y.P., Nikitenko V.I., Cheng X.M., Clarke D., Tretiakov O.A., Tchernyshyov O., Shapiro A.J., Shull R.D., Chien C.L. // *Physical Review Letters*. 2007. V. 98. P. 117204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.117204>
12. Moritz J., Garcia F., Toussaint J.C., Dieny B., Nozières J.P. // *Europhysics Letters*. 2004. V. 65. № 1. P. 123. <https://doi.org/10.1209/epl/i2003-10063-9>
13. Li L., Liu Z., Lv Y., Zhang Y., Liu S., Hao C., Lv W. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. V. 325. P. 117. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.08.018>
14. Matczak M., Szymanski B., Urbaniak M., Nowicki M., Glowinski H., Kuswik P., Schmidt M., Aleksiejew J., Dubowik J., Stobiecki F. // *J. Applied Physics*. 2013. V. 114. № 9. P. 093911. <https://doi.org/10.1063/1.4819380>

Effect of Pt Spacer on the Domain Dynamics in Ultrathin Co Layers with Perpendicular Anisotropy

I. V. Shashkov¹, Y. P. Kabanov¹, and V. S. Gornakov¹

¹*Institute of Solid State Physics Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

*e-mail: shav@issp.ac.ru

The dynamics of domain walls in ultrathin Pt/Co (0.6 nm)/Pt (*t*)/Co (0.6 nm)/Pt heterostructures with perpendicular magnetic anisotropy, where 0 nm < *t* < 10 nm, has been studied. A transition from correlated to independent magnetization reversal of the Co layers was revealed at the Pt interlayer thickness *t* = 5.5 nm. In the transition region, the domain wall slowdown and its stop in the “soft” layer was also observed at constant magnetic field which indicates a change in the nature of interlayer coupling. It was directly estimated that the energy of interlayer coupling between Co layers in the transition region was nearly 17 μJ/m². Growth of interlayer exchange coupling leads to magnetization relaxation in “soft” layer to magnetization in “hard” after removing magnetic field. The domain wall relaxation obeys exponential law. The domain wall dynamics was considered for independent and coupled magnetization reversal of Co layers. For all cases the creep regime was found at low magnetic fields. It is shown that domain wall velocities for different layers is very different and defined interface roughness.

Keywords: magnetic domains, heterostructures, Kerr effect, creep, perpendicular magnetic anisotropy, interlayer exchange coupling.