Министерство образования и науки Российской Федерации Московский физико-технический институт (государственный университет) Факультет общей и прикладной физики Кафедра физики твёрдого тела (Специализация «Прикладная математика и физика»)

Движение доменных границ в лентах пермаллоя под действием импульсного магнитного поля и спин-поляризованного тока.

Выпускная квалификационная работа бакалавра студента 022 группы Бердюгина Алексея Игоревича

> Научный руководитель д.ф. –м. н. Успенская Л. С.

## Содержание.

Введение	3
Литературный обзор.	
1. Причины возникновения доменной структуры	4
2. Типы доменных границ	4
3. Движение доменных границ магнитным полем	5
4. Движение доменных границ спин-поляризованным током	и6
Методика эксперимента	8
Образец	9
Экспериментальные результаты	
Обсуждение экспериментальных результатов	17
Выводы	
Список использованной литературы	19

#### Введение.

Управление токам магнитными и резистивными свойствами магнитных наноструктур даёт новые возможности для разработки энерго эффективной магнитной памяти нового типа, новых логических схем, переключателей, а так же новых типов записывающих/считывающих устройств [1]-[5]. Переключение сопротивления и изменение фазы тока, протекающего через гибридные структуры сверхпроводникферромагнетик, предоставляет новые возможности для развития криоэлектроники, изготовления новых устройств [6]. Использование спин-поляризованного тока вместо магнитного поля намного удобнее, так как действие тока более локально по сравнению с магнитным полем. Это делает возможным дальнейшее уменьшение размеров устройств.

По этим причинам, теоретическое предсказание возможности контролировать магнитные свойства материалов током [6],[8],[9]., вызвало большой интерес у исследователей [1], [10]. Перемещение доменной стенки током было продемонстрировано экспериментально, кроме того была исследована зависимость скорости движения доменной стенки от величины тока и продолжительности его импульса [11], [12], [13].

В данной работе была исследована структура Nb-Py, изготовленная методом магнетронного напыления в едином вакуумном цикле. Для применения данной структуры важно понимать, какими свойствами она обладает, как изменяется её коэрцитивность при понижении температуры. Так же было исследовано движение доменных границ под действием импульсного магнитного поля. Результаты сравнивались с работой Чугунова А. А. по движению доменных границ током.

#### 1. Причины возникновения доменной структуры.

Несколько конкурирующих видов энергии определяют формирование магнитной доменной структуры и отклик на внешнее воздействие.

- обменная энергия

$$\omega_{\text{обм}} = -2\sum_{i>j} J_{ij} s^2 \cos(\varphi_{ij})$$

Она определяет, как выстраиваются спины в ферромагнетике, параллельно или антипараллельно.

- энергия анизотропии

$$\omega_{a \mu u z o m p} = K_1 \sin(\theta)^2 + K_2 \sin(\theta)^4$$

Где θ – угол между осью анизотропии и намагниченностью. Она определяет направление намагниченности в ферромагнетике. Энергия анизотропии возникает из-за спин-орбитального и диполь-дипольного взаимодействия.

- энергия магнитного поля ферромагнетика

$$\omega_{\text{поля}} = \frac{H^2}{8\pi}$$

- магнитостатическая энергия

$$\omega_{\text{магнитостат}} = -\frac{1}{2} \boldsymbol{M} \boldsymbol{H}$$

Как и все физические системы, ферромагнетик стремится к минимуму энергии, поэтому, чтобы реализовать минимум энергии, у него появляется доменная структура. Он разбивается на области с противоположной намагниченностью. Области, в которых происходит изменение намагниченности, называются доменными границами.[14], [15]

При толщине кристалла намного большей, чем ширина доменов, их ширину можно оценить по формуле:

$$d = (\sigma \frac{h}{1,75I_s^2})^{1/2}$$

h- высота плёнки.

Is- магнитный момент единицы объема.

σ- плотность поверхностной энергии. [16]

## 2. Типы доменных границ.

Доменные границы бывают Блоховского и Неелевского типов. Если вектор намагниченности проворачивается в плоскости стенки, меняя своё направление на противоположное, то такая граница называется стенкой Блоха. Если перпендикулярно границе, то стенкой Нееля.



Изображение 1. Доменные границы Блоховского и Неелевского типов. Рисунок взят с wikipedia.org

Характерная толщина доменной границы 10-100 нм. Для доменной стенки блоховского типа её можно оценить по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{J}{K}}$$

Где Ј – обменная энергия, К – коэффициент энергии магнитной анизотропии.

3. Движение доменных границ магнитным полем.



Изображение 2. Вращение магнитного момента вокруг магнитного поля.

Рассмотрим детально процесс перемагничивания материала.

Движение магнитного момента в поле описывается уравнением Ландау-Лифшица.

$$\dot{\boldsymbol{M}} = \gamma \boldsymbol{M} \times \frac{dw}{d\boldsymbol{M}} + \frac{\alpha \dot{\boldsymbol{M}} \times \boldsymbol{M}}{M}$$

Можно ввести эффективное поле:  $H_e = -\frac{dw}{dM} - \frac{a\dot{M}}{\gamma M}$ 

Где первый член описывает вклад внешнего магнитного поля, вклад магнитной анизотропии, обменного взаимодействия и т.д.. Второй член описывает влияние диссипативных эффектов.

Рассмотрим магнитный момент во внешнем поле H<sub>a</sub>. Если принебречь затуханием, то он будет вращаться вокруг внешнего поля, как это показано на рисунке. Учёт вязкого члена приводит к тому, что прецессирующий магнитный момент

постепенно «ложится» на направление внешнего поля. Получается, что происходит перемагничивание. [17]

Теперь рассмотрим процесс движения доменной границы на примере схемы, показанной на рисунке 3.





Внешнее поле направленно вдоль намагниченности левого домена и против намагниченности правого. Центральная область, где намагниченность направлена вверх, моделирует доменную стенку.

Во внешнем поле на магнитные моменты действует момент сил:

$$T = M \times H$$

Получается, что на магнитные моменты в правом домене изначально не действует никаких моментов.

На магнитные моменты в стенки действует момент сил, который поворачивает их вправо. После того, как они начнали поворачиваться, они создают магнитное поле, направленное перпендикулярно внешнему. Таким образом появляется момент сил, действующий на спины в правом домене, который будет врощать намагниченность.

За счёт затухания спины в стенке будут выстраиваться по полю, а сама стенка будет смещаться вправо.

#### 4. Движение доменных границ спин-поляризованным током.

Существует два механизма влияния тока на намагниченость: поверхностный и объёмный.

При поверхностном механизме носители тока испытывают зависящее от спина рассеяние. В результате угловой момент передаётся системе локализованных спинов и это приводит к переориентации вектора намагничености.

При объёмном механизме, спин-поляризованный ток вносит в объем образца дополнительный магнитный момент. Ещё, они вносят дополнительное обменное взаимодействие в систему, тем самым способствуя изменению намагничености системы. [18]

#### Методика эксперимента.

В данной работе для визуализации магнитного поля использовался методт магнитооптической визуализации с помощью индикаторных плёнок. Разрешение данного метода не лучше 1 мкм (предел оптического разрешения).

В качестве индикаторных плёнок использовались плёнки иттрий железистого граната толщинами 2 и 6 мкм.

Плёнка, имеющая намагниченность, лежащую в плоскости, клалась на поверхность образца. С её помощью можно регистрировать распределение перпендикулярной компоненты магнитной индукции в образце. В частности, можно увидеть поля рассеяния, возникающие в границах Болховского типа.



Изображение 4. Схема методики исследования.

Под действием полей рассеяния индикаторная плёнка намагничивается и эту намагниченость можно наблюдать при помощи эффекта Фарадея в поляризационно оптический микроскоп. При эффекте Фарадея, выражение для поворота поляризации выглядет вледующим образом:

$$\theta = \nu H l$$

где v - постоянная Верде.

Данный метод позволяет регистрировать поля начиная с 1 Гс.



Изображение 5. Пример изображения, полученного с помощью данной методики.

В экспериментах проводились исследования коэрцитивности образца, поля полного перемагничивания, а так же скорости движения доменных границ.

Магнитное поле создавалось с помощью двух катушек, имеющих следующие параметры: после в центре между катышками 90 Oe/A, при пропускании импульсного тока, фронт нарастания тока составляет 20 мкс.

За коэрцитивность принималось магнитное поле, при котором изображение границы смещалось на расстояние порядка этого изображения.

Для определения коэрцитивности, источник тока, питающий катушки, ставился на постепенную развёртку, вместе с этим подавались сигналы на камеру. Таким образом, происходило перемагничивание и одновременная съёмка. По фотографиям можно было определить в какой момент началось перемагничивание и в какой момент оно закончилось.

Для определения скорости движения доменных границ под действием импульсного поля на катушки подавался импульс тока. Образец фотографировался до и после импульса поля. Таким образом, фиксировалось смещение доменных границ. Так повторялось несколько раз. Строился график смещения доменных границ от времени импульса тока. Из него находилась скорость движения доменных границ.

## Образец.

В данной работе изучался образец Nb-Py (Nb — 100 нм, Py — 40 нм). Он состоял из 4х полосок типа «миандр» с подведёнными контактами.(см рисунок) Двуслойная плёнка изготавливалась методом магнитронного напыления Nb и Py в едином вакуумном цикле.

Структура изготавливалась методом взрывной фотолитографии в лаборатории профессора Резанова В.В..

Ширина толстых полосок составляет 7мкм. Ширина тонких полосок составляет 2мкм. Длина полос 1 мм.(изображение 6)



Изображение 6. Фотография образца

Основная работа велась с нижней полоской толщиной 7 мкм



```
Изображение 7. Фотография образца.
```

Экспериментальные результаты.

# 1. Зависимость коэрцитивности образца от угла приложения перемагничивающего поля.

Поле намагничивания 290е.

 A) намагничивание образца происходило полем, направленным под таким же углом, как и поле перемагничивания



1. График зависимости коэрцитивности от угла приложения перемагничивающего поля. Намагничивающее поле направленно под углом к полоскам.

Видно, что в начале, коэрцитивность падает, при увеличении угла, но затем при больших углах опять растёт.

Наблюдался рост числа доменных границ, возникающих при перемагничивании при увеличении угла.





45 градусов.



.Б) Намагничивание образца происходило полем, направленным вдоль полос.

2. График зависимости коэрцитивности от угла приложения перемагничивающего поля. Намагничивающее поле направленно вдоль полосок

Видно, что коэрцитивность монотонно растёт с увеличением угла.

#### 2. Зависимость коэрцитивности от времени намагничивания.

Измерения были проведены при трёх различных значениях поля намагничивания.



3. График зависимости коэрцитивности от времени намагничивания.

Можно видеть, что в пределах ошибки, коэрцитивность образца не зависит от времени намагничивания.

#### 3. Зависимость коэрцитивности от температуры.

В процессе измерения температура изменялась от 210К до 12К.







#### 5. График зависимости коэрцитивности от 1/Т.

Как видно, коэрцитивность выросла в несколько раз при уменьшении температуры. Кроме того, наблюдалось сильное увеличение числа доменных границ, возникающих при перемагничивании с понижением температуры. Это продемонстрировано на подборке фотографий, представленных ниже.





- 12K
- 4. Минимальное время импульса магнитного поля, необходимое для начала движения доменных границ.



Эксперимент проводился как при комнатной температуре:

6. График зависимости минимального времени импульса магнитного поля, необходимого для начала движения доменных границ при комнатной температуре.

#### так и при пониженной



7. График зависимости минимального времени импульса магнитного поля, необходимого для начала движения доменных границ при различных температурах.

Для температуры 12К времена имеют другие масштабы, поэтому результаты показаны на отдельном графике.



8. . График зависимости минимального времени импульса магнитного поля, необходимого для начала движения доменных границ при температуре 12К.

5. Скорость движения доменной границы импульсным магнитным полем.

Измерение скорости проводилось при различных значениях импульсного поля:



9. График зависимости скорости движения доменных границ импульсным магнитным полем от температуры при различных значениях поля.

6. Скорость движения доменной границы спин-поляризованным током в зависимости от температуры.

В дипломной работе Чугунова А. А. было экспериментально определена зависимость максимальной скорости движения доменной границ спинполяризованным током 1mA, длительность импульса 0,1 мкс. Результаты представлены на графике.

Видно, что при понижении температуры, скорость увеличивается на несколько порядков.



10. График зависимости скорости движения доменной границы спин-поляризованным током от температуры.

#### Обсуждение экспериментальных результатов.

Было обнаружено, что при понижении температуры, коэрцитивность образца возрастает. При этом, увеличивается число доменных границ, возникающих при перемагничивании. Можно предположить, что это связанно с тем, что при понижении температуры становятся более заметными дефекты спонтанной намагниченности, в роли которых могут выступать бугорки или места, где направление намагниченности отлично от нормального. При приложении поля, эти дефекты выступают в роли зародышей доменов. Эту гипотезу подтверждает тот результат, что при увеличении угла приложения намагничивающего и перемагничивающего поля, увеличивается число доменных границ. С увеличением угла спинам становится легче переворачиваться, так как в начальном состоянии они уже частично повёрнуты и вокруг дефектов становится проще зародить доменную границу.

Что касается скорости движения доменных границ, под действием импульсного магнитного поля, то тут мы получили ожидаемый результат, а именно, что скорость падает с понижением температуры, так как ухудшаются диссипативные эффекты и спинам нужно большее время, чтобы лечь на направление поля.

Сравнивая этот результат с результатом для скорости движения доменной границы под действием тока, можно понять, что границы движутся именно за счет давления тока, а не создаваемого им поля.

## Выводы.

Выполнен ряд экспериментов с гетероструктурой Nb-Py.

Исследована зависимость коэрцитивности от способа намагничивания, угла перемагничивания и температуры. Показано, что коэрцитивность при изменении температуры меняется обратно пропорционально температуре и в рассматриваемом диапазоне температур меняется в несколько раз с 50е до 200е.

Найдена зависимость минимального времени импульса поля от величины импульса при различных температурах.

Измерена зависимость скорости движения доменных границ под действием импульсного магнитного поля от температуры под действием различных значений магнитного импульса. Показано, что при понижении температуры до 12К скорость падает на 3 порядка.

Обнаружено интенсивное зародышеобразование границ при низкотемпературном перемагничивании.

## Список использованной литературы.

[1] C. H. Marrows, "Spin-polarised currents and magnetic domain walls" Advances in Physics, vol. 54, pp. 585-713, 2005.

[2] Y. Fukuma, L. Wang, H. Idzuchi, S. Takahashi, S. Maekawa and Y. Otani, "Giant enhancement of spin accumulation and long-distance spin manipulation inmetallic lateral spin valves, "Nature Materials", vol. 10, pp. 527-531, 2011.

[3] V. E. Demidov, S. Urazhdin, H. Ulrichs, V. Tiberkevich, A. Slavin, D. Baither, G. Schmitz and S.
O. Demokritov, "Magnetic nano-oscillator driven by pure spin current", Nature Materials Vol 11(12), pp. 1028-1031, 2012.

[4] W. S. Torres, P. Laczkowski, Van D. Nguyen, J.-C. R. Sanchez, L. Vila, A Marty, M. Jamet and J.-P. Attane, "Switchable spin-current source controld by magnetic domain walls", Nano Lett., 2014 to be published.

[5] A. Slavin and V. Tiberkevich, "Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current" IEEE Trans. Magn., vol. 45, pp. 1875-1918, 2009.

[6] A. I. Buzdin, "Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures", Rev. Mod. Phys., vol. 235, pp. 160-162, 2014.

[7] L. S. Uspenskaya, S. V. Egorov, "Memory effects in permalloy-niobium hybrid structures", Physiza B, vol. 235, pp. 160-162, 2014.

[8] J. C. Slonczewski, "Current-driven excitation of magnetic multilayers", J. Magn. Magn. Mater, vol. 159, pp. L1-L7, 1996.

[9] L. Berger, "Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current", Phys Rev B, vol 54, pp 9353-9358, 1996.

[10] I Zutic, J Fabian and S Das Sarme, "Spintronics: Fundamentals and applications", Rev Mod Phys, vol 76, pp 323-410, 2004.

[11] J Grollier, P Boulenc, V Cros, A Hamzic, A Vaures, A Fert and G Faini, "Switching a spin valve back and forth by current induced domain wall motion", Appl Phys Lett, vol 83, pp 509-511, 2003.

[12] N Vernir, D A Allwood, D Atkinson, M D Cooke and R P Cowburn, "Domain wall propagation in magnetic nanowires by spin-polarized current injection", Europhys Lett, vol 65, pp 526-532, 2004.

[13] L Thomas, M Hayashi, X Jiang, R Moriya, C Rettner and S S P Parkin, "Oscillatory dependence of current driven magnetic domain wall motion on current pulse length", Nature, vol 443, pp 197-200, 2006.

[14] К. Киттель, Физическая теория доменной структуры ферромагнетиков. УФНб 50, 452,1950

[15] Ч. Киттель, Введение в физику твёрдого тела.

[16] Г. С. Кринчик, Физика магнитных явлений. М., Изд-во Моск. ун-та, 1976

[17] А Малоземов, Дж Слонзуски, "Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами", Москва «Мир», 1982.

[18] Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Р Дж Эллиотт, Э. М. Эпштейн, "Движение доменных границ под влиянием поляризованного по спину тока в магнитном поереходе", Журнал технической физики, 2002, том 72, вып. 7.