

The University of the Basque Country Faculty of Chemistry Department of Material Physics Magnetism Research Group

# Быстрое перемагничивание и движение доменных границ в аморфном микропроводе

<u>Жуков А.</u><sup>1,2,3</sup>, Ипатов М.<sup>1,3</sup>, Талаат А.<sup>1,3</sup>, Бланко Х.М.<sup>3</sup>, В. Жукова В, <sup>1,3</sup> <sup>1</sup>Dpto. Fisica de Materiales, Fac. Quimicas, UPV/EHU, 20009 San Sebastian, Spain <sup>2</sup>IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, 48011 Bilbao, Spain <sup>3</sup>Dpto. de Fisica Aplicada, EUPDS, UPV/EHU, 20009 San Sebastian, Spain (вклад В Родионовой, К, Чичай, из Балтийского Федерального университета)



## Екатеринбург 14 ноября 2014





## Содержание

- -Введение.
- Методы и образцы
- Исследования аморфных микропроводов, их магнитных свойств, динамики ДГ, зависимость этих свойств от различных видов технологической обработки.
  Способы управления динамикой ДГ микропровода и магнитными свойствами. Внутренние напряжения и наведенная анизотропия, магнитосктриция.
- Выводы и заключение

Мотивация: предложенные устройства памяти и логики на

#### основе контролируемого движения ЛГ



2

Сравнение скорости ДГ в аморфном тонком (2 мкм)  $Fe_{72.75}Co_{2.25}B_{15}Si_{10}$  микропроводе и планарном нанопроводе Fe-NI.





Развитие современных отраслей промышленности тесно связано с получением новых магнитных материалов. Быстрая закалка расплава- получение аморфных, нанокристаллических и метастабильных

#### Α

В

Быстрая закалка расплава приводит к получению твёрдых тел со структурой подобной жидкому – металлических стёкол. Отсутствие дефектов –высокие магнито-мягкие свойства и эффект ГМИ.

Для аморфных материалов магнитокристаллическая анизотропия является пренебрежимо малой

## Получение микропровода

 Составы на основе Со, Ni , Fe и Cu d<sub>metal</sub>





типочные рассеран Общий пассер 3-40 лог Далетр четалиятся сой жила 1-30 лог Топциа: эте акциото покрытал1-10 лог Дина: - от 100 гг до 10 юг аз 1 жоушке

> Метод был известен в СССР с 60-х годов, но не был применён к магнитным материалам 5

Введение Сравнение микропровода с другими аморфными Годы

магнитными материалами Ленты, поперечное сечение,  $\Phi \ge 4 * 10^4$  мкм<sup>2</sup>, быстрый 1-100мм ↓ № и дешёвый процесс получения, высокие магнито-60-е мягкие свойства, слишком велики для микросенсоров 80-120мкм Провода, поперечное сечение  $\Phi \ge 2*10^3$  мкм<sup>2</sup>, быстрый и дешёвый процесс получения, высокие магнитомягкие свойства, слишком велики для микросенсоров (критическая длина для бистабильности около 7 см) Тонкие плёнки, поперечное сечение  $0.1 \le \Phi \le 10^2$  мкм<sup>2</sup>, медленный и дорогостоящий процесс получения, 60-е магнито-мягкие свойства хуже, хорошее сочетание с 1-30мкм процессом получения интегральных схем, влияние подложки микропровод, поперечное сечение  $4 \le \Phi \le 2 * 10^3$  мкм<sup>2</sup>, быстрый и дешёвый процесс получения, высокие магнитомягкие свойства, размеры удобные для микросенсоров Масштаб

#### Введение

# Свойства интересные с точки зрения фундаментальной науки и применений:

- -Тонкие диаметры (влияние размагничивающего фактора мало) и разнообразная и идеально Цилиндрическая геометрия (диаметры от ~1 - 50 мкм)
- Возможность использования широкого спектра

составов

-Высокие механические и коррозионные свойства



- Со второй половины 80-х годов известен аморфный провод (Ф≈120 мкм) с рядом уникальных магнитных свойств.
- Для применений в микросенсорах интересны провода с пониженной размерностью.
- Магнитомягкие свойства и эффект ГМИ представляют интерес для микросенсоров
- Магнитная бистабильность и быстрое перемагничивание- для устройств памяти и логики (в перспективе)

<u>Цель настоящей работы</u>: исследование быстрого перемагничивания аморфныхмикропроводов, и взаимосвязи динамики ДГ с магнито-упругой анизотропией и структурными свойствами в аморфныхмикропроводов.

# Введение **В чем интерес к микропроводу?**



8

#### Введение



Тенденции: уменьшение размеров, повышение частоты Промышленное производство в Смартфонах Методы и образцы

## Образцы:

## Микропровод





Метод был известен в СССР с 60-х годов, но не был применён к магнитным материалам







Динамика доменных границ в магнитомягком микропроводе Перемагничивание магнито-бистабильных микропроводов: движение ДГ



прямоугольная форма петли гистерезиса определяет высокую скорость распространения ДГ

Движение ДГ возникает в поле выше 70 А/м. Поле старта составляло около 100А/м.





H(А/м)

12





































Срыв ДГ замыкающего домена и ее движение



Н Возможность исследовать роспространение одиночной ДГ в микропродове

# Исследование динамики движения ДГ

• Sixtus–Tonks метод (1931)



# Исследование динамики движения ДГ • Sixtus–Tonks метод (1931)



# Исследование динамики движения ДГ



# Measurements of the single domain wall dynamics

• Sixtus–Tonks methods (1931)



#### Методика эксперимента

# Установка для измерения петель гистерезиса индукционным методом







магнитострикцией проявляют магнитно-бистабильный характер, с околонулевой магнитострикцией - высокие магнитно-мягкие свойства, тогда как аморфный микропровод с отрицательной магнитострикцией демонстрирует пологую петлю гистерезиса.

#### Внутренние напряжения



 $K_{My} \approx 3/2 \lambda_s \sigma_i,$   $\lambda_s - f$  (хим. состав)  $\sigma_i - f$  (параметры получения – разные коэфф. термического расширения металла и стекла)  $\sigma_{\phi} = \sigma_r = P = \varepsilon E k \Delta / (k/3+1) \Delta + 4/3$  (1);  $\sigma_z = P(k+1) \Delta + 2/(k \Delta + 1) \approx 3\sigma_r$  (2) где  $\sigma_{\phi}, \sigma_r$  и  $\sigma_z$  - напряжения,  $E_m, E_g$  – модули Юнга,  $\Delta = (1 - \rho^2)/\rho^2$ ,  $k = E_g/E_m,$  $\varepsilon = (\alpha_m - \alpha_g)(T_m - T_{room}), \alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты

термического расширения и T<sub>m</sub>, T<sub>room</sub> – температурры плавления.









#### H. Chiriac, T.-A. Ovari, A. Zhukov, J. Magn. Magn. Mater. 254–255 (2003) 469–471 30

#### магнитоупругая энергия

# Внутренние напряжения Влияние магнитоупругой анизотропии

Петли гистерезиса микропровода  $Fe_{70}B_{15}Si_{10}C_5 \lambda_s > 0$  при разных диаметрах и соотношениях  $\rho = 0.63$ , d=15 мкм(a);  $\rho = 0.48$  d= 10,8 мкм (б);  $\rho = 0.26$ , d= 6 мкм (в);  $\rho = 0.16$ , d= 3 мкм (г).



Управление магнитными свойствами - не только через хим. состав, но и изменяя геометрию, т.е. отношение  $\rho = d/D$ 

$$K_{MY} \approx 3/2 \lambda_s \sigma_i$$
 О Стеклянное покрытие 31

#### Внутренние напряжения

Изменение петли гистерезиса аморфного микропровода Со<sub>70.5</sub>Mn<sub>4.5</sub>Si<sub>10</sub>B<sub>15</sub>, при постепенном стравливании стеклянного покрытия в 20% HF. (а) исходный, (б)10 мин травления в 20% HF, (в 20 мин 20% HF, (г) 50 мин 20% HF.



стравливании стеклянного покрытия

#### Влияние магнитоупругой анизотропии и напряжений на динамику ДГ



Влияние магнитоупругой анизотропии и напряжений на динамику ДГ

### МП со спонтанной магнитной бистабильностью





Зависимости v(H) для микропровода  $Fe_{16}Co_{60}Si_{11}B_{13}$  microwires (d $\approx$  12µm, D $\approx$  29µm,  $\rho\approx$ 0,41) измеренные подразличными приложенными напряжениями,  $\sigma_{app}$ .  $\lambda_s^{app} \sim 40_x 10^{-6}$ 

A. Zhukov, J. M. Blanco, M. Ipatov, A. Chizhik and V. Zhukova, "Nanoscale Research Letters, 7 (2012) 2237-11, 2012 Влияние магнитоупругой анизотропии и напряжений на динамику ДГ

 $v=S(H-H_0)$ , где S мобильность ДГ, H –продольное магнитное поле и  $H_0$ 

критическое поле распорстарнения ДГ.





## Влияние отжига на петли гистерезиса Со<sub>69.2</sub>Fe<sub>4.1</sub>B<sub>11.8</sub>Si<sub>13.8</sub>C<sub>1.1</sub> microwires.

200

200

5 мин



Магнитострикция зависит от напряжений:  $\lambda_s = (\mu_o M_s/3)(dH_k/d\sigma),$ 

µ<sub>o</sub>М намагниченнность насыщения, H<sub>k</sub>- поле магнитной анизотропии, σ-напряжения.

Релаксация напряжений приводит к изменению магнитострикции  $\lambda_s$  Почему такое изменение петель ?

## Природа изменений наведенных отжигом



10<sup>7</sup> λ<sub>9</sub> 1 (c) 0 (c) 1 0 0.25 0.50 0.75 CT(GPa)

Релаксация напряжений приводит к изменению знака магнитострикции λ<sub>s</sub>?



## Природа изменений наведенных отжигом



Наведенная магнитная анизотропия, ГМИ и магнитные свойства

Зависимость кдэрцитивной силы, Нс, и остаточной намагниченности от времени

отжига



## Природа наведенной анизотропии



## Магнитная бистабильность Спонтанная Наведенная отжигом На основе Fe На основе Co



Недавно обнаруженная, A. Zhukov, A. Talaat, M. Ipatov, J.M. Blanco, V. Zhukova, J. Alloys Compounds 615 (2014) 610–615, A. Zhukov, K. Chichay, A. Talaat, V. Rodionova, J.M. Blanco, M. Ipatov and V. Zhukova, J Magn. Magn. Mater. 2014, 42

## Effect of magnetolastic anisitropy on DW propagation Микропровод с наведенной магнитной бистабильностью

Hysteresis loops of  $Co_{69,2}Fe_{4,1}B_{11,8}Si_{13,8}C_{1,1}$  microwires annealed at  $T_{ann} = 300$  °C for 45 min without applied stress (a) and under stress (b).



Increase of applied stresses results inincreasing of the DW velocity (usually the opposite effect is osberved)

#### Причина скорее всего в завсисимоти магнитострикции от напряжений

A. Zhukov, A. Talaat, M. Ipatov, J.M. Blanco, V. Zhukova, "Tailoring of magnetic properties and GMI effect of Co-rich amorphous microwires by heat treatment", J. Alloys Compounds 615 (2014) 610–615

#### Динамика доменных границ в магнитомягком микропроводе Быстрое движение ДГ: к вопросу о нелинейности v(H)

 $v=S(H-H_o)$ , где *S* подвижность ДГ, *H*-приложенное поле,  $S=2\mu_0 M_s/\beta$ , где  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума,  $M_s$  - намагниченность насыщения,  $\beta$  - параметр затухания ДГ и  $H_o$  - критическое поле распространения.



## **FAST DW PROPAGATION**

Correlation of local nucleation fields distribution (a) and V(H) dependences in magnetically bistable amorphous  $Fe_{74}B_{13}Si_{11}C_2$  microwire, 1, 2, 3 are the positions of the pick-up coils



V. Rodionova, V.Zhukova, M.Ilyn, M.Ipatov, N.Perov, A.Zhukov, "The defects influence on domain wall propagation in bistable glass-coated microwires", Physica B 407 (2012) 1446–1449

#### **Defects Magnetic measurements technique** Nucleation profile



### Defects origin Metallographic measurements

### technique

## Axio Scope A1 optical microscope





Optical microscopy: Figures show that the inside glass there are bubbles formed as a result of fast cooling of the glass during the microwire production

Table : volume fraction of the bubles in different microwires

Sample	Bubbles size, µm	Valume fraction, %
Co42	1÷15	10
Fe-rich mw 1.7	1÷10	12
Fe-rich mw 1.8	3÷5	8

Understanding of origin and improvement of technolgy are needed! 47

#### Поверность и дефекты: переходный слой

С помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-6610LV был проведен спектральный анализ поверхностей двух микропроводов



Микроструктура микропровода, полученная РЭМ наблюдается также наличие кислорода, причем сканирование показывает его присутствие не только в стекле, но и в некоторых участках металлической жилы

## Результаты картографии



Многослойное изображение микропровода

# **FAST DW PROPAGATION** Studies of shape of DW





Width of the signal is related with the shape and domain wall width





S. A. Gudoshnikov et.al. Phys. Status Solidi A 206, No. 4, 613–617 (2009)



L.V. Panina , M.Ipatov , V.Zhukova , A.Zhukov, "Domain wall propagation in Fe-rich amorphous microwires", Physica B 407 (2012) 1442–14 51

## Effect of transverse magnetic field on DW dynamics



DW velocity is limited by the restoring forces and therefore might affected by the transverse magnetic





## **FAST DW PROPAGATION**

On origin of non-linearity and extremely fast DW velocity



#### Основные результаты и выводы работы:

- 1.Магнитоупругая анизотропия оказывает определяющее влияние на магнитные свойства и динамику ДГ аморфного микропровода, которые могут быть контролируемым образом изменены путем выбора состава металлической жилы и стеклянного покрытия, соотношения диаметра металлической жилы и толщины стеклаи и термообработки. Петли гистерезиса аморфного микропровода с положительной магнитострикцией (на основе Fe) проявляют магнитно-бистабильный характер, с околонулевой магнитострикцией (при соотношении Co/Fe≈70/5) высокие магнитно-мягкие свойства, тогда как аморфный микропровод с отрицательной магнитострикцией (на основе Co) демонстрирует наклонную петлю гистерезиса.
- В аморфных магнитно-мягких микропроводах исследовано влияние состава микропровода, геометрии и условий термообработки на полевую зависимость динамики ДГ. Отжиг аморфных микропроводов позволяет кардинально изменить динамику ДГ аморфного микропровода.

- Скорость движения ДГ и мобильность в аморфных микропроводах, в том числе ультратонких, коррелируют с магнитной анизотропией и и определяются как составом и геометрическими параметрами микропровода, так и режимами термообработки.
- 4. Приложенные напряжения оказывают влияние на динамику ДГ, на них возникают дополнительны доменные границы, которые ограничивают инетрвал контролируемой динамики единичной ДГ.
- Магнитная бистабильность м.б наведена отжигом. При этом влияние магнитоупругой энергии на динамику ДГ в МП со спонтанной и наведенной бистабильностью противополложное. Дефекты ограничивают скорость движение ДГ.

#### Спасибо за внимание



Magnetic Properties

and Applications of Ferromagnetic Microwires with Amorphous and Nanocrystalline Structure

> Arcady Zhukov Valentina Zhukova