

RELAZIONE SULL'ATTIVITA' SVOLTA NELL'AMBITO DEL PROGRAMMA DI SHORT-TERM MOBILITY DAL TITOLO:

*Studio di sistemi magnetici nanostrutturati accoppiati da scambio mediante risonanza ferromagnetica*

Proponente: *Luigi Pareti, Istituto IMEM - CNR, Parma*

Fruitore: *Francesca Casoli, Istituto IMEM - CNR, Parma*

Periodo: *19 marzo – 9 aprile 2006*

Istituzione straniera: *Departamento de Física, IFIMUP, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto*

Il soggiorno è stato finalizzato all'avvio di una collaborazione scientifica tra IMEM – CNR e Dipartimento di Fisica dell'Università di Porto nello studio di sistemi magnetici nanostrutturati accoppiati da interazione di scambio. Sono state realizzate misure di risonanza ferromagnetica su bistrati FePt/Fe, film sottili di Fe e FePt, campioni che sono stati preparati presso l'IMEM – CNR di Parma. L'analisi dei dati raccolti ha permesso di programmare l'attività futura che comprenderà sia una parte sperimentale, che una parte teorica per lo sviluppo di un modello interpretativo.

Contesto scientifico

La realizzazione di materiali magnetici con almeno una delle dimensioni dell'ordine del nanometro ha portato alla scoperta di interessanti proprietà e allo sviluppo di nuovi campi di ricerca. Strutturando opportunamente un materiale su scala nanometrica, la scala dimensionale caratteristica delle interazioni magnetiche, è possibile ingegnerizzarne le proprietà funzionali. In particolare, se un materiale magneticamente dolce e uno magneticamente duro vengono mutuamente dispersi o alternati in un multistrato, si può combinare l'alta magnetizzazione della fase dolce con l'elevata anisotropia magnetica della fase dura per ottenere un magnete permanente con elevato prodotto massimo d'energia [1]. Perché l'interazione di scambio tra le due fasi permetta di combinare efficacemente le diverse proprietà, le dimensioni tipiche devono essere dell'ordine del nanometro: il parametro di scala è in questo caso la lunghezza di scambio.

In questo ambito si inserisce l'attività di ricerca svolta dal gruppo “materiali magnetici” dell'Istituto IMEM a partire dal 2004. Sono stati preparati e studiati bistrati exchange-spring con magnetizzazione perpendicolare, promettenti per applicazioni come magneti permanenti nanostrutturati in dispositivi microelettromeccanici (MEMS) [2] e come supporti di memoria per la registrazione magnetica perpendicolare [3]. Per la preparazione si utilizza uno sputtering RF e i campioni vengono caratterizzati sia dal punto di vista magnetico (magnetometria AGFM e SQUID, microscopia a forza magnetica) che morfologico (microscopia a forza atomica) e strutturale (Diffrazione e Riflettività di raggi X, Microscopia Elettronica in Trasmissione).

Sono stati preparati e studiati film epitassiali di FePt su MgO (spessori da 7 a 26 nm), ottimizzando le caratteristiche di crescita in funzione delle proprietà strutturali e magnetiche (grado d'ordine della fase dura  $L_{10}$ , anisotropia uniaassiale perpendicolare  $K \approx 2 \times 10^7$  erg/cm<sup>3</sup>, coercitività perpendicolare  $H_C = 3.5 - 9$  kOe) [4,5]. A partire dai film epitassiali di FePt, sono stati preparati bistrati duro/dolce FePt/Fe ed è stato studiato il comportamento magnetico (curve di magnetizzazione, curve di rimanenza in smagnetizzazione) in funzione dello spessore dello strato di Fe (da 2 a 10 nm) [5,6]. I

risultati sperimentali sono stati confrontati con quelli previsti da un modello micromagnetico analitico [7]. Lo studio dell'interdipendenza tra le proprietà morfologiche, strutturali e magnetiche della fase dura in funzione della temperatura di deposizione e delle caratteristiche del trattamento termico [8] è servito da spunto per un ulteriore sviluppo dell'attività di ricerca. Allo scopo di approfondire il comportamento magnetico di bistrati exchange-spring, ci si è infatti focalizzati sul ruolo dell'interazione di scambio tra strato duro e strato dolce e in particolare su come le caratteristiche dell'interfaccia tra i due strati influenzino questo tipo d'interazione. Le qualità dell'interfaccia tra le fasi (estensione, morfologia) sono di notevole importanza nella definizione dell'efficacia dello scambio. Con l'obiettivo di modificare la qualità dell'interfaccia tra le fasi, si sono depositate tre serie di bistrati duro/dolce che differiscono nelle caratteristiche di crescita dello strato duro. Le tre serie di campioni sono state oggetto di misure durante il soggiorno a Porto.

La Risonanza Ferromagnetica (FMR) è una tecnica d'indagine molto promettente per lo studio del comportamento magnetico dei bistrati accoppiati da scambio. Permette infatti di ottenere informazioni sulle interazioni magnetiche in sistemi ferromagnetici. L'elevata sensibilità della tecnica la rende particolarmente adatta allo studio di materiali nanostrutturati. Il gruppo di "proprietà magnetiche ad alte frequenze" dell'Università di Porto ha un'esperienza decennale nella ricerca sulla Risonanza Ferromagnetica, e ha realizzato lavori su diversi sistemi magnetici (strati sottili, multistrati magnetici, sistemi amorfi e nanocristallini e più recentemente sulle nanoparticelle magnetiche) [9,10,11].

### Campioni studiati

La struttura dei campioni studiati è del tipo:  $\text{Ag}(t_{\text{Ag}})/\text{Fe}(t_{\text{Fe}})/\text{FePt}(t_{\text{FePt}})/\text{MgO}(100)$ . Si è scelto di utilizzare un substrato di  $\text{MgO}(100)$  per crescere epitassialmente lo strato duro di  $\text{FePt}$  e di depositare un capping-layer di  $\text{Ag}$  sopra allo strato di  $\text{Fe}$  per prevenirne l'ossidazione. I campioni studiati e le loro caratteristiche di crescita sono elencati in tabella 1.

serie	#	$t_{\text{FePt}}(\text{nm})$	$t_{\text{Fe}}(\text{nm})$	$t_{\text{Ag}}(\text{nm})$	$t_{\text{tot}}(\text{nm})$	$T_{\text{sub}} (\text{°C})$
<b>1</b>	1084	10.75	/	/	10.75	385-390
	1085	10.75	2.0	2.0	14.75	385-390
	1086	10.75	3.5	2.0	16.75	385-390
<b>2</b>	1087	10.75	/	/	10.75	385-390post
	1088	10.75	2.0	2.0	14.75	385-390post
	1089	10.75	3.5	2.0	16.75	385-390post
<b>3</b>	1090	10.75	/	/	10.75	405-410
	1091	10.75	2.0	2.0	14.75	405-410
	1092	10.75	3.5	2.0	16.75	405-410
	1101	64.5	/	/	64.5	385-390
	1042	/	220	/	220	RT
	MgO	/	/	/	/	/

Tabella 1. Caratteristiche nominali dei campioni studiati.

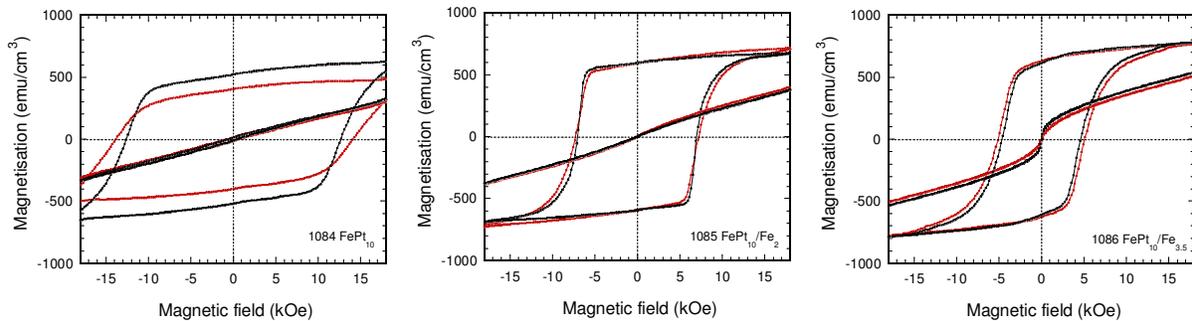
Sono state preparate tre serie di campioni, ciascuna costituita dal singolo strato di  $\text{FePt}$  e da due bistrati con spessore crescente dello strato di  $\text{Fe}$  ( $t_{\text{Fe}}=2, 3.5 \text{ nm}$ ). Le tre serie differiscono per le caratteristiche di crescita dello strato di  $\text{FePt}$ . Nella prima serie il  $\text{FePt}$  è stato cresciuto ad una temperatura (misurata con una termocoppia sul substrato di  $\text{MgO}(100)$ ) di 385-390 °C. Nella seconda serie, dopo la crescita a 385-390 °C, il  $\text{FePt}$  è stato mantenuto alla stessa temperatura per 85 minuti (post-annealing). La temperatura di deposizione del  $\text{FePt}$  nella terza serie di campioni è 405-410 °C e in questo caso non è stato effettuato il post-annealing.

Si evince dalla letteratura che la temperatura di crescita influenza fortemente la morfologia del FePt: le temperature elevate favoriscono la crescita del materiale in isole separate [12]. Conferma di questo comportamento viene anche da nostre misure effettuate mediante Microscopia a Forza Atomica (AFM) e Microscopia a Effetto Tunnel (STM) che mostrano come al crescere della temperatura il materiale tenda a formare isole sempre più separate e di forma regolare (da allungata a sferica al crescere della temperatura). Recentemente abbiamo dimostrato che la morfologia del FePt è influenzata non solo dalla temperatura di crescita, ma anche dall'utilizzo di post-annealing in-situ dopo la deposizione a temperature intermedie [8]. Le temperature di crescita delle tre serie di campioni sono state scelte sulla base degli studi preliminari e del confronto con la letteratura.

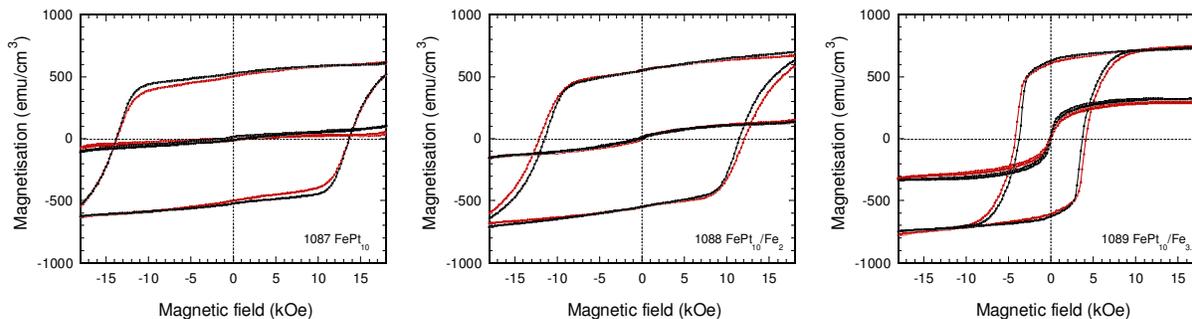
Le tre serie preparate differiscono perciò per la morfologia del FePt e dunque per l'interfaccia tra fase dura (FePt) e fase dolce (Fe), ovvero per l'interazione di scambio tra le due fasi, proprietà che costituisce l'obiettivo del presente studio.

Infine, le misure FMR hanno riguardato anche tre campioni di riferimento: film di FePt e Fe per valutare il contributo dei due strati separatamente e un campione di MgO per valutare il contributo del substrato.

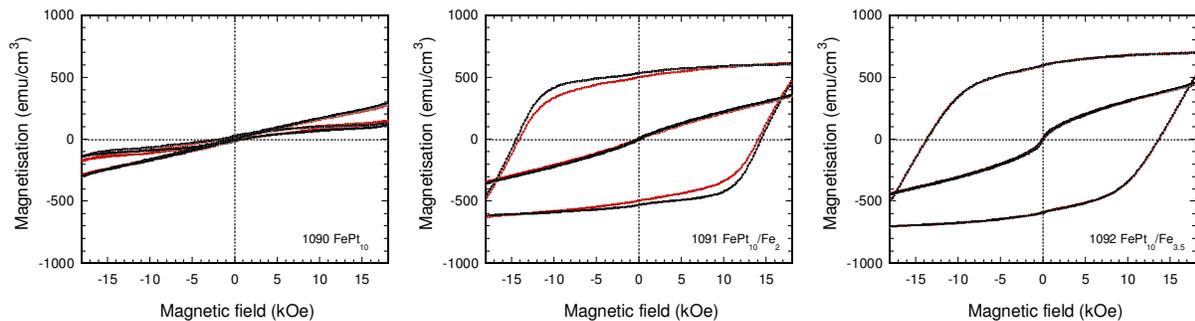
I cicli d'isteresi dei campioni, misurati mediante un magnetometro a gradiente alternato di campo (AGFM) presso l'istituto IMEM, sono riportati nelle figure da 1 a 4. Le misure sono state effettuate a temperatura ambiente in campi applicati fino a 20 kOe.



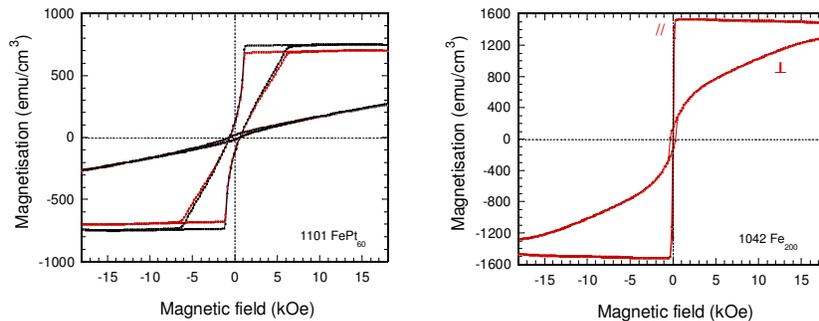
**Figura 1.** Cicli d'isteresi dei campioni della serie 1 in direzione perpendicolare (direzione facile) e parallela (direzione difficile). Le curve rosse e nere si riferiscono a due frammenti dello stesso campione.



**Figura 2.** Cicli d'isteresi dei campioni della serie 2 in direzione perpendicolare (direzione facile) e parallela (direzione difficile). Le curve rosse e nere si riferiscono a due frammenti dello stesso campione.



**Figura 3.** Cicli d'isteresi dei campioni della serie 3 in direzione perpendicolare (direzione facile) e parallela (direzione difficile). Le curve rosse e nere si riferiscono a due frammenti dello stesso campione.



**Figura 4.** Cicli d'isteresi dei campioni di riferimento: #1101 (FePt) in direzione perpendicolare (direzione facile) e parallela (direzione difficile) e #1042 (Fe) in direzione parallela (direzione facile) e perpendicolare (direzione difficile).

L'analisi dei cicli d'isteresi delle tre serie di campioni porta alle seguenti considerazioni:

- Le caratteristiche magnetiche dello strato duro di FePt migliorano dalla serie 1 alla serie 3. Sia il post-annealing che l'aumento di temperatura sono quindi efficaci nel migliorare l'anisotropia magnetica e la coercitività del sistema. Il miglioramento è particolarmente evidente per effetto dell'aumento di temperatura. Nella serie 3 infatti il campo applicato non è sufficiente a saturare il film di FePt nemmeno in direzione facile (perpendicolare) e la misura mostra solo dei cicli minori.
- L'aggiunta dello strato di Fe porta ad un comportamento simile a quello già descritto nei nostri primi lavori sui bistrati FePt/Fe [5,6,7], ma, a differenza di quanto precedentemente riscontrato, con una diminuzione di coercitività al crescere dello spessore di Fe. Per spessori di Fe pari a 3.5 nm compare nella serie 1 e 2 una netta variazione di pendenza nel primo quadrante in corrispondenza del campo di nucleazione dello strato dolce. Analogamente a quanto trovato in [5,6,7], un ciclo d'isteresi di questo tipo è caratteristico di un comportamento di tipo exchange-spring e il campo di nucleazione corrisponde all'inizio dell'inversione reversibile dei momenti magnetici della fase dolce. La variazione è meno netta nel campione FePt/Fe(3.5nm) della serie 3 dove oltretutto il campo di nucleazione sembra collocarsi vicino ad  $H=0$ .

- I bistrati delle tre serie mostrano differenti caratteristiche magnetiche, ovvero campo coercitivo, campo di nucleazione, rapporto rimanenza/saturazione, pendenza della curva misurata in direzione difficile (parallela). La diversa morfologia dello strato duro nelle tre serie di campioni potrebbe dunque determinare una differenza nelle interazioni magnetiche microscopiche. L'interpretazione di questo complesso comportamento richiede il supporto di ulteriori tecniche d'indagine e una modellizzazione teorica.

#### Attività svolta

Su una selezione dei campioni in tabella 1 sono state effettuate misure FMR presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Porto. La tabella 2 riporta l'elenco degli spettri misurati e le rispettive caratteristiche.

serie	campione	campo (G)	variazione $\theta$	variazione $\phi$	pwr (mW)	mod (G)
<b>1</b>	1085	0-10000	/	/	20	9.8
	1085	0-10000	/	/	31.5	9.8
	1085	0-3140	$\Delta\theta=20^\circ$ 6pti	/	31.5	9.8
	1086	0-4600	$\Delta\theta=5^\circ$ 20pti	/	20	0.98
	1086	0-3000	$\Delta\theta=5^\circ$ 20pti	/	20	0.98
	1086	0-3140	11pti	/	20	9.8
	1086	0-3140	/	$\Delta\phi=10^\circ$ 13pti	20	9.8
	1086	0-3140	/	$\Delta\phi=10^\circ$ 21pti	20	9.8
	1086	0-10000	/	/	20	9.8
	1086	0-5000	18pti	/	20	9.8
<b>2</b>	1089	0-10000	/	/	0.63	9.8
	1089	0-10000	/	/	20	9.8
	1089	0-3140	12pti	/	31.5	15
	1089	0-3000	18pti	/	20	9.8
	1089	0-3140	/	12pti	20	9.8
<b>3</b>	1092	0-10000	/	/	0.63	15
	1092	0-3140	12pti	/	20	9.8
	1092	0-3140	23pti	/	20	9.8
	1092	0-3140	/	$\Delta\phi=10^\circ$ 21pti	20	9.8
	1101	1000-4000	/	/	5	9.8
	1101	1500-2000	$\Delta\theta=5^\circ$ 20pti	/	20	3
	1042	0-6000	$\Delta\theta=5^\circ$ 20pti	/	1	1.9
	MgO	0-10000	2pti	/	20	9.8

**Tabella 2.** Elenco delle misure FMR e relative caratteristiche. *Legenda:*

*campo* = intervallo di campi applicati in cui si è effettuata ogni scansione;

*variazione  $\theta$*  = serie di misure al variare dell'angolo tra il campo **H** e la perpendicolare alla superficie del campione,  $\Delta\theta$  = incremento dell'angolo tra uno spettro e il successivo, Npti=numero di spettri con  $\theta$  diverso;

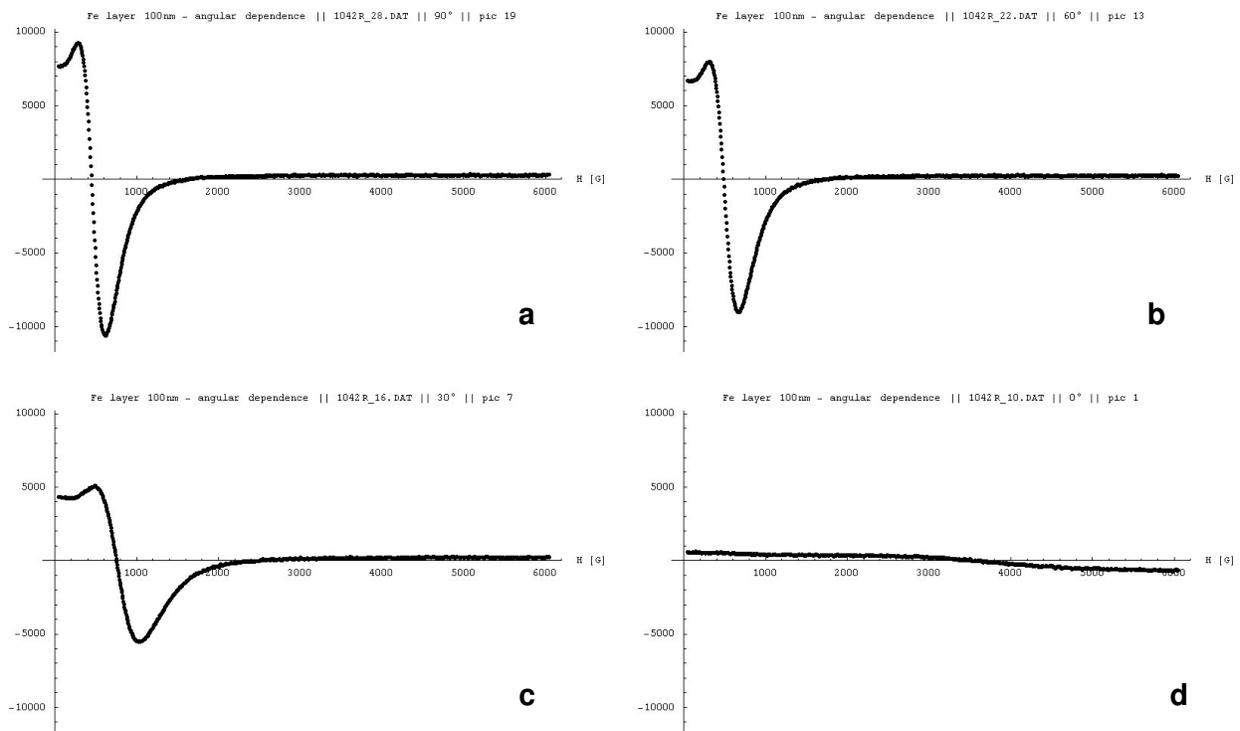
*variazione  $\phi$*  = serie di misure al variare della direzione del campo **H** nel piano parallelo alla superficie del campione,  $\Delta\phi$  = incremento dell'angolo tra uno spettro e il successivo, Npti=numero di spettri con  $\phi$  diverso;

*pwr* = potenza della radiazione a microonde;

*mod* = ampiezza del campo di modulazione.

Uno spettro FMR è la misura della derivata dell'assorbimento di radiazione elettromagnetica all'interno di una cavità risonante in cui è posto il campione, effettuata in funzione dell'intensità del campo magnetico uniforme a cui è sottoposto il campione. La frequenza della radiazione elettromagnetica è nell'intervallo spettrale delle microonde (circa 9 GHz) e viene fissata all'inizio di ogni misura attraverso una procedura di tuning. Allo scopo di studiare il processo di magnetizzazione e demagnetizzazione dei bistrati, per ogni campione sono stati raccolti spettri FMR in funzione dell'angolo  $\theta$  tra il campo applicato  $\mathbf{H}$  e la perpendicolare al piano del film, nonché spettri in funzione dell'angolo  $\phi$  che definisce la direzione di  $\mathbf{H}$  nel piano del film. Con lo stesso obiettivo, tutti i campioni, ad eccezione del riferimento di Fe e di MgO, sono stati misurati nello stato rimanente, cioè dopo essere stati portati alla saturazione in direzione perpendicolare alla superficie con l'applicazione di un campo di 20 kOe.

A titolo d'esempio vengono riportati nelle figure 5, 6 e 7 i grafici di alcuni spettri rappresentativi misurati sui campioni di riferimento e sui bistrati FePt/Fe.

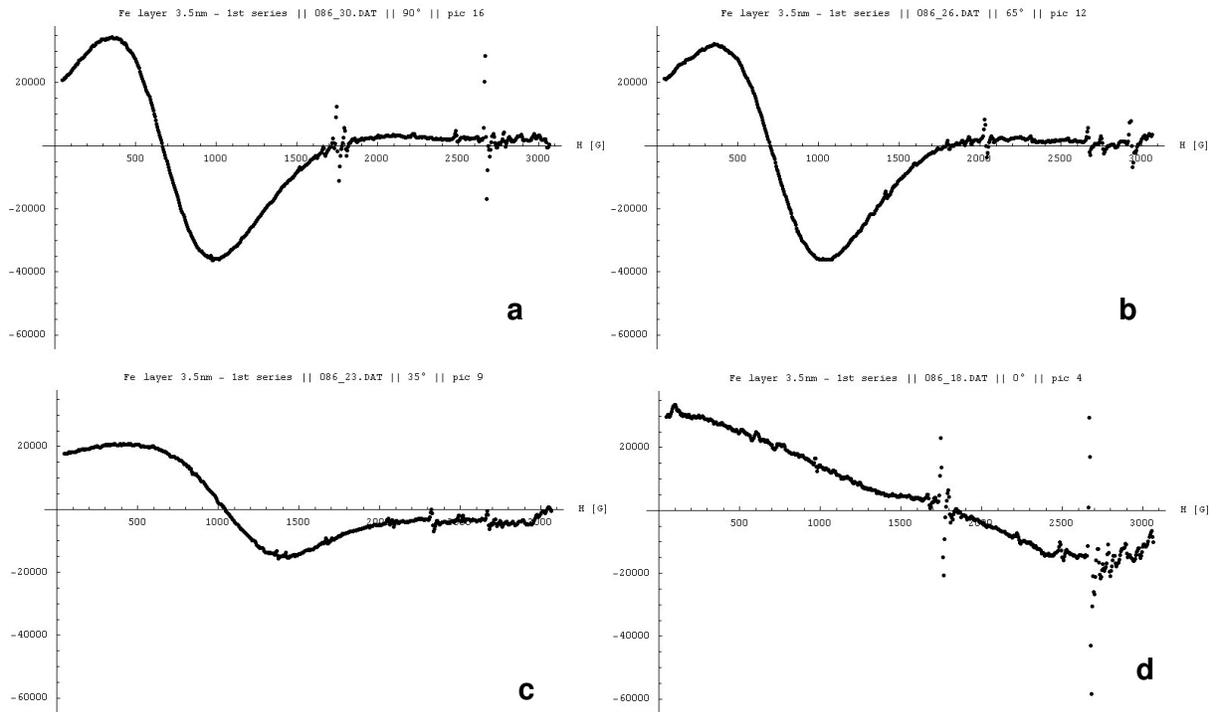


**Figura 5.** Spettri di risonanza ferromagnetica misurati sul campione 1042 (Fe di riferimento) per quattro diverse orientazioni del campo magnetico esterno rispetto alla perpendicolare alla superficie del film (a:  $\theta=90^\circ$  campo perpendicolare, b:  $\theta=60^\circ$ , c:  $\theta=30^\circ$ , d:  $\theta=0^\circ$  campo parallelo).

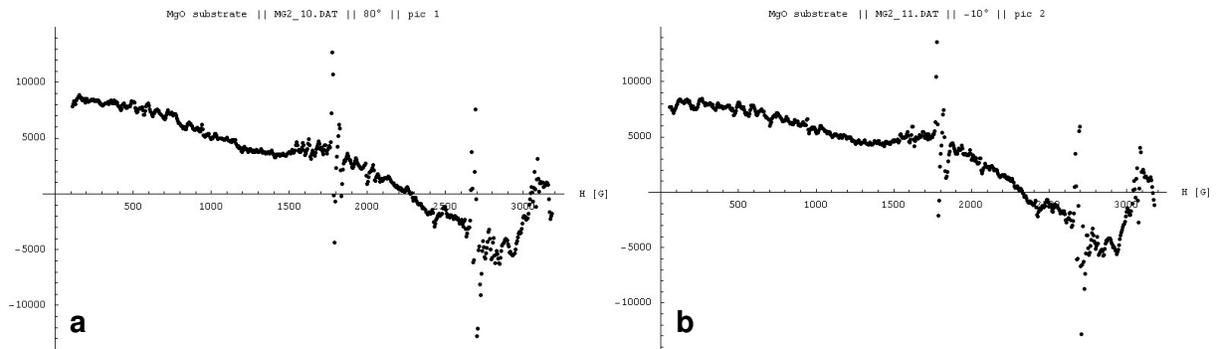
### Analisi dei dati

Durante il soggiorno è stata effettuata la prima fase dell'analisi dei dati, ovvero il fitting degli spettri FMR tramite un software appositamente sviluppato dal gruppo di Porto. Tale software permette di analizzare uno spettro di risonanza come somma di diversi contributi (derivate di curve Gaussiane o Lorentziane). Una complicazione inattesa è rappresentata dal contributo non trascurabile del substrato di MgO, contributo che, a causa della simmetria cubica del substrato monocristallino, presenta una dipendenza dall'angolo  $\theta$  tra la direzione del campo applicato e la perpendicolare alla superficie del substrato (figura 7).

Esempi dei risultati del fitting sono riportati nelle figure 8, 9. La figura 8 rappresenta i risultati ottenuti su due degli spettri in figura 5, mentre la figura 9 riporta i risultati ottenuti sui quattro spettri di figura 6.



**Figura 6.** Spettri di risonanza ferromagnetica misurati sul campione 1086 (FePt/Fe serie 1) per quattro diverse orientazioni del campo magnetico esterno rispetto alla perpendicolare alla superficie del film (a:  $\theta=90^\circ$  campo perpendicolare, b:  $\theta=65^\circ$ , c:  $\theta=35^\circ$ , d:  $\theta=0^\circ$  campo parallelo).



**Figura 7.** Spettri di risonanza ferromagnetica misurati sul campione di MgO di riferimento per due diverse orientazioni del campo magnetico esterno rispetto alla direzione parallela alla superficie del film (a:  $\theta=90^\circ$  campo perpendicolare alla superficie, b:  $\theta=0^\circ$  campo parallelo alla superficie).

Da un'analisi iniziale degli spettri misurati sul campione 1101 (FePt di riferimento, qui non riportato) si è notato che, nell'intervallo di frequenze e campi magnetici applicabili, non si rivela alcun contributo dovuto allo strato di FePt, mentre è chiaramente visibile un picco di assorbimento centrato sotto i 1000 G nel riferimento di Fe(220 nm) (figura 5). L'evoluzione di questo picco in funzione di  $\theta$  dipende dall'energia magnetostatica del sistema, che favorisce l'orientazione della magnetizzazione nel piano del film.

Gli spettri FMR misurati sui tre bistrati FePt(10nm)/Fe(3.5nm) mostrano, insieme a contributi complessi e non trascurabili del background e del substrato di MgO, un picco di assorbimento che è da attribuire allo strato di Fe (vedi ad esempio figura 6). Nel caso del campione 1085 (FePt(10nm)/Fe(2nm) serie 1) le misure indicano che è assente il contributo dello strato di Fe, il che suggerisce un diverso tipo di accoppiamento magnetico tra strato duro (FePt) e strato dolce (Fe) in funzione dello spessore dello strato di Fe.

Dalla curva che rappresenta il picco di assorbimento principale (Fe), esclusi cioè il contributo del substrato e il background dovuto alle condizioni della cavità risonante, è possibile ricavare tre importanti parametri:  $H_{res}$  (campo di risonanza),  $\Delta H_{pp}$  (larghezza picco-picco della derivata della curva di assorbimento),  $I$  (intensità del picco di assorbimento). L'andamento di queste tre parametri in funzione degli angoli  $\theta$  e  $\phi$  può essere riprodotto soltanto modellizzando correttamente il sistema a partire dal contributo magnetico all'energia libera. L'equazione 1 contiene i diversi contributi all'energia libera di un sistema ferromagnetico:

$$E(\theta, \phi) = E_Z(\theta, \phi) + E_{ms}(\theta, \phi) + E_{ex}(\theta, \phi) + E_K(\theta, \phi) \quad (1)$$

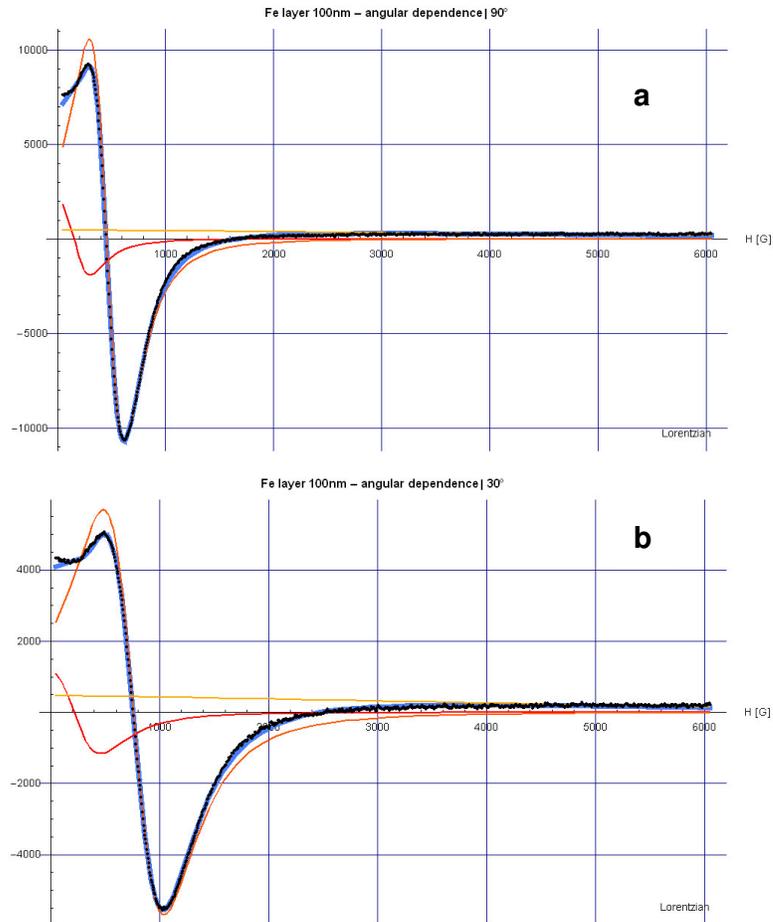
ovvero  $E_Z(\theta, \phi)$  energia Zeeman,  $E_{ms}(\theta, \phi)$  energia magnetostatica,  $E_{ex}(\theta, \phi)$  energia di scambio,  $E_K(\theta, \phi)$  energia di anisotropia magnetocristallina.

Per interpretare correttamente le misure FMR è necessario risolvere un sistema di equazioni che contiene le condizioni di equilibrio (equazione 2) e l'equazione di risonanza (equazione 3):

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = 0; \frac{\partial E}{\partial \phi} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\omega}{\gamma} = \frac{1}{M \sin \theta} \left\{ \left( \frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} \right) \left( \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} \right) - \left( \frac{\partial^2 E}{\partial \theta \partial \phi} \right)^2 \right\}^{1/2} . \quad (3)$$

Lo sviluppo di un modello adatto a interpretare i risultati ottenuti sarà oggetto dell'attività futura del gruppo di Porto e di Parma, ma richiederà prima una serie di misure necessarie ad approfondire e chiarire alcune problematiche emerse durante il soggiorno a Porto (vedi sezione successiva).



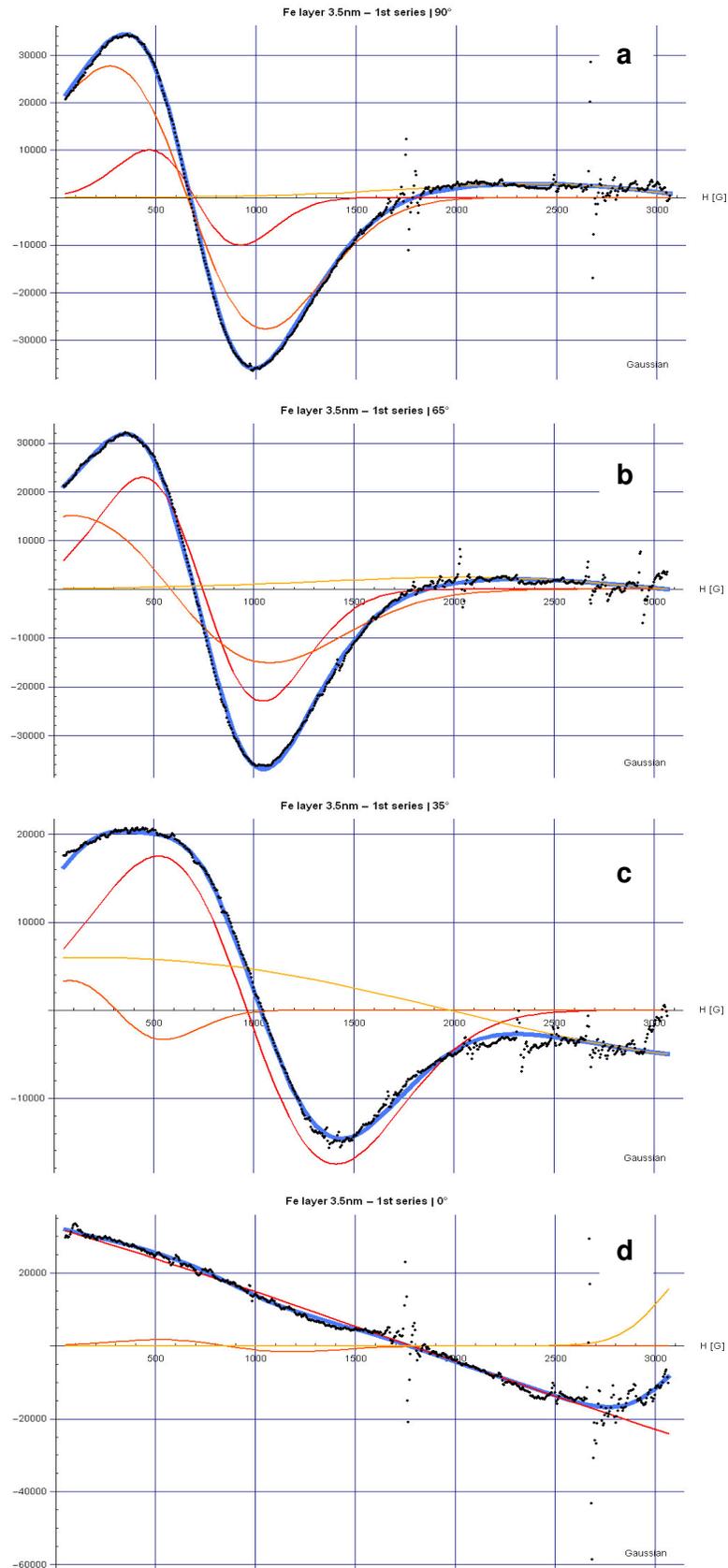
**Figura 8.** Risultati del fitting degli spettri di risonanza ferromagnetica misurati sul campione 1042 (Fe di riferimento) per due diverse orientazioni del campo magnetico esterno rispetto alla perpendicolare alla superficie del film (a:  $\theta=90^\circ$  campo perpendicolare, b:  $\theta=30^\circ$ ).

### Programmazione dell'attività futura

Sulla base dei risultati e delle problematiche emersi durante il soggiorno di studio si è deciso di programmare l'attività futura come segue.

Sarà necessario innanzitutto realizzare nuove misure di risonanza ferromagnetica sui bistrati FePt/Fe (campioni da #1084 a #1092) e su un nuovo campione che verrà preparato dal gruppo di Parma:

- Finora sono stati misurati spettri FMR variando l'angolo  $\theta$  di 90-100°. Per studiare il processo di magnetizzazione dello strato dolce di Fe in maniera completa sarà necessario effettuare scansioni in  $\theta$  di almeno 180°, in modo da passare con certezza dalla configurazione con il campo applicato parallelo a quella con il campo antiparallelo alla magnetizzazione rimanente del film. Analogamente a quanto fatto finora, verranno effettuate misure in un intervallo di campi applicati tali da non coinvolgere la precessione dei momenti magnetici all'interno dello strato duro di FePt ma solo la precessione nello strato dolce di Fe. Per completezza verranno effettuate misure FMR sia nello stato rimanente (dopo la saturazione in direzione perpendicolare alla superficie del film) che nello stato termicamente smagnetizzato.



**Figura 9.** Risultati del fitting degli spettri FMR del campione 1086 (FePt/Fe serie 1) per quattro diverse orientazioni del campo magnetico esterno rispetto alla perpendicolare alla superficie del film (a:  $\theta=90^\circ$  campo perpendicolare, b:  $\theta=65^\circ$ , c:  $\theta=35^\circ$ , d:  $\theta=0^\circ$  campo parallelo).

- Per comprendere se esista effettivamente un diverso regime di accoppiamento magnetico nei bistrati con 2nm di Fe rispetto a quelli con 3.5 nm di Fe, occorrerà raccogliere spettri di risonanza ferromagnetica non solo dei campioni FePt/Fe(2nm), ma anche di un campione di riferimento costituito da un solo strato di Fe di 2 nm su MgO. Il campione dovrà essere preparato dal gruppo dell'IMEM di Parma.

Da quanto emerso finora, la corretta valutazione del contributo del substrato di MgO agli spettri di risonanza costituisce un problema rilevante. Il contributo del substrato, di tipo EPR (electron paramagnetic resonance), è infatti confrontabile con quello dei bistrati e varia al variare dell'angolo  $\theta$ . A questo contributo va aggiunto un background quantitativamente confrontabile (dato lo spessore nanometrico dei bistrati siamo ai limiti di sensibilità della tecnica) con il segnale del campione e variabile da misura a misura a causa delle diverse condizioni di risonanza nella cavità. La corretta valutazione dei due contributi non dipendenti dal bistrato richiede una modifica del software utilizzato per riprodurre gli spettri di risonanza. Compito del gruppo di Porto sarà dunque di modificare il software in modo da poter fissare posizioni e larghezze delle risonanze dovute all'MgO e al background, variandone però l'intensità di spettro in spettro.

Infine, sarà necessario sviluppare un modello che consenta di interpretare i risultati delle misure FMR. Il punto di partenza è l'energia libera magnetica del sistema (equazione 1). I contributi corretti, in particolare l'energia magnetostatica  $E_{ms}(\theta, \phi)$  e l'energia di scambio  $E_{ex}(\theta, \phi)$ , verranno valutati a partire dalle caratteristiche nominali dei campioni e dai modelli precedentemente sviluppati dal gruppo di Porto per riprodurre gli andamenti dei parametri dedotti dal fitting degli spettri di risonanza:  $H_{res}$  (campo di risonanza),  $\Delta H_{pp}$  (larghezza picco-picco della derivata della curva di assorbimento),  $I$  (intensità del picco di assorbimento) [9,10,11]. Un importante riferimento sarà anche il modello sviluppato al Dipartimento di Fisica dell'Università di Parma per modellizzare i sistemi exchange-spring con anisotropia magnetica perpendicolare, già applicato in ref. 7 per l'interpretazione del comportamento magnetico di una precedente serie di bistrati FePt/Fe. Informazioni importanti ai fini della corretta modellizzazione dei bistrati verranno dall'indagine morfologica degli strati di FePt (#1084, 1087, 1090) delle tre serie. Come sottolineato in precedenza, dai primi risultati su film di FePt di spessore 10 nm [8] e dalla letteratura sull'argomento, ci aspettiamo una differente morfologia dello strato duro nelle tre serie di campioni, differenza che abbiamo volutamente cercato allo scopo di variare l'accoppiamento di scambio duro/dolce da una serie all'altra. Sono ora in corso misure di microscopia AFM presso l'IMEM di Parma volte a studiare la topografia superficiale degli strati di FePt. E' inoltre in corso presso l'IMEM un'approfondita caratterizzazione magnetometrica dei bistrati FePt/Fe (curve di prima magnetizzazione, curve di rimanenza a partire dallo stato vergine e in smagnetizzazione) che servirà a completare il quadro interpretativo.

#### Riferimenti bibliografici

1. E. F. Kneller and R. Hawig, IEEE Trans. Magn. **27**, 3588 (1991).
2. O. Cugat, J. Delamare, and G. Reyne, IEEE Trans. Magn. **39**, 3607 (2003).
3. R. H. Victora and Xiao Shen, IEEE Trans. Magn. **41**, 537 (2005); D. Suess, T. Schrefl, R. Dittrich, M. Kirschner, F. Dorfbauer, G. Hrkac, and J. Fidler, J. Magn. Mater. **290–291**, 551 (2005).
4. F. Casoli, F. Albertini, L. Pareti, S. Fabbri, L. Nasi, C. Bocchi, R. Ciprian, IEEE Trans. Magn. **41**(10), 3223 (2005).
5. F. Casoli, PhD thesis, Università di Parma, Italia (2006).
6. F. Casoli, F. Albertini, S. Fabbri, C. Bocchi, L. Nasi, R. Ciprian, L. Pareti, IEEE Trans. Magn. **41**(10), 3877 (2005).

7. G. Asti, M. Ghidini, R. Pellicelli, C. Pernechele, M. Solzi, F. Albertini, F. Casoli, S. Fabbri, L. Pareti, Phys. Rev. B **73**, 094406 (2006).
8. F. Albertini, L. Nasi, F. Casoli, S. Fabbri, P. Luches, A. Rota, S. Valeri, submitted to J. Magn. Mater.
9. D. S. Schmool and J. M. Barandiaran, Journal of Physics: Condensed Matter **10**, 10679 (1998).
10. D. S. Schmool, J. S. Garitaonandia and J. M. Barandiaran, Physical Review B **58**, 12159 (1998).
11. O. Mosendz, B. Kardasz, D. S. Schmool, and B. Heinrich, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **300**, 174, (2006).
12. Y. K. Takahashi, K. Hono, T. Shima, and K. Takanashi, J. Magn. Mater. **267**, 248 (2003).

Luigi Pareti

Francesca Casoli