

нородностей в ферромагнитной матрице [4]. Зная величину локального магнитного поля в поляроне, можно вычислить энергию связи и его радиус. Недавно авторам удалось обнаружить спиновые поляроны и в металлических магнетиках [5], где для их образования не требуется предварительной локализации на кулоновском центре.

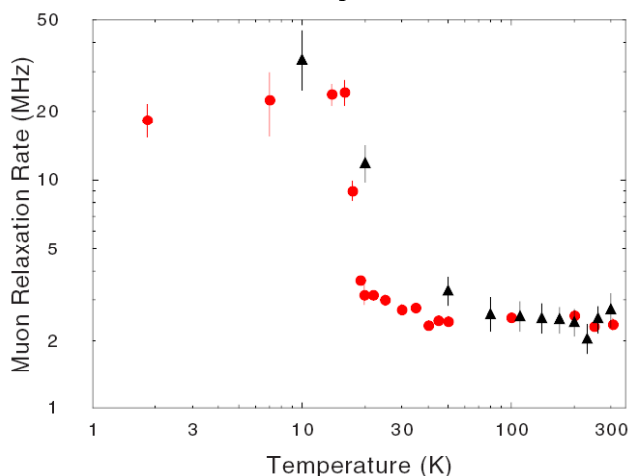


Рис. 1. Зависимость частоты спиновой релаксации мюона от температуры для объемного образца EuS (кружки) и пленки (треугольники). Отчетливо виден переход материала в ферромагнитное состояние при температуре ниже температуры Кюри.

Будем надеяться на то, что в Курчатовском НБИК-центре материалы с магнитными поляронами будут успешно внедрены в спинтронику, и, таким образом, магнитные поляроны будут “работать” в той же стране, в которой “родились”.

В.Вьюрков

1. Э.Л.Нагаев, *Письма в ЖЭТФ* **6**, 484 (1967).
2. *ПерсТ* **16**, вып. 6, с. 6 (2009).
3. *ПерсТ* **17**, вып. 3, с. 3 (2010).
4. V.G.Storchak et al., *Phys. Rev.* **B 81**, 153201 (2010).
5. V.G.Storchak et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 076402 (2010).

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Определение неоднородного магнитного состояния Fe/Gd гетероструктур с помощью нейтронных и синхротронных измерений

Магнитные наноструктуры уже работают в компьютерах благодаря открытию А. Фертом и П. Грюнбергом гигантского магнитосопротивления (Нобелевская премия 2007 г.), и их исследования активно продолжаются. Гетероструктуры Fe/Gd благодаря незначительной диффузии Fe и Gd на границе раздела являются идеальными модельными структурами со сложным магнитным поведением. Обменные взаимодействия внутри слоев Gd с объемной температурой Кюри $T_C=293$ К невелики по сравнению с обменом внутри слоев Fe с $T_C=1043$ К, в интерфейсе есть сильный антиферромагнитный обмен Fe-Gd. Магнитная анизотропия незначительна в Fe/Gd структурах благодаря аморфной или поликристаллической структуре слоев. Неоднородное

ПерсТ, 2010, том 17, выпуск 24

магнитное состояние гетероструктуры

$$\left[Fe(35 \text{ \AA}) / Gd(50 \text{ \AA}) \right]_5$$

как функция температуры и магнитного поля было расшифровано совместными исследованиями рефлектометрии поляризованных нейтронов (PNR) и резонансной рентгеновской магнитной рефлектометрии (RXMR) [1].

Главным достоинством PNR метода является возможность непосредственно измерять атомные магнитные моменты внутри слоев в абсолютных единицах, но этот метод не является элементарно-чувствительным. Напротив, основным достоинством синхротронных методов является элементная чувствительность благодаря резонансному усилению рентгеновского магнитного рассеяния вблизи края поглощения данного элемента. В режиме жесткого рентгеновского излучения (который реализован и у нас в России на синхротроне Сибирь-2 в Курчатовском институте) метод RXMR работает на К-краях переходных и L-краях редкоземельных металлов. Помимо элементной чувствительности, метод RXMR имеет еще высокое пространственное разрешение благодаря большой интенсивности синхротронного излучения. Слабость обоих методов PNR и RXMR заключается в отсутствии фазовой информации об измеренном рассеянии. Поэтому однозначное определение неоднородной магнитной структуры невозможно. Однако совместный анализ и моделирование нейтронных и синхротронных данных позволил авторам [1] выбрать надежную модель и описать элементарно-чувствительный профиль магнитной структуры Fe/Gd. Интегральный магнитный момент гетероструктуры согласуется с независимыми измерениями СКВИД-магнитометрии и рентгеновского магнитного кругового дихроизма.

Магнитные свойства гетероструктур $[Fe/Gd]_n$ с большим числом повторений n были исследованы ранее методами PNR и RXMR, которые подтвердили справедливость теоретических расчетов [2], сделанных для $n = \infty$. Согласно теории, возможны три фазы: а) спины Gd по полю (и спины Fe против поля), б) Fe по полю (Gd против поля), в) угловая фаза. Фаза “Gd по полю” реализуется при низких температурах, фаза “Fe по полю” при высоких температурах, а угловая фаза существует вблизи точки компенсации $T_{comp} \approx 60$ К. Для структуры с небольшим числом повторений (как $n=5$ в работе [1]) можно указать различные факторы, усложняющие магнитное состояние.

Результаты обработки данных PNR и RXMR в модели, предполагающей возможность неоднородности модуля намагниченности в слое $M(Z)$ или угла поворота $\Theta(Z)$ вектора намагниченности, показаны на рис. 1. Здесь $\Theta(Z)$ отсчитывается от внешнего магнитного поля, лежащего в плоскости слоя. При высокой (140 К) температуре (рис. 1а) и малом поле

$H=50$ мТ реализуется фаза “Fe по полю” с моментом $M_{Fe}=2.22 \mu_B$ и неоднородным распределением модуля магнитного момента в Gd слоях. На границе Fe/Gd $M_{Gd}=7.23 \mu_B$, а в середине слоя $M_{Gd}=2.45 \mu_B$. Из-за антиферромагнитного обмена моменты Fe и Gd ориентированы антипараллельно.

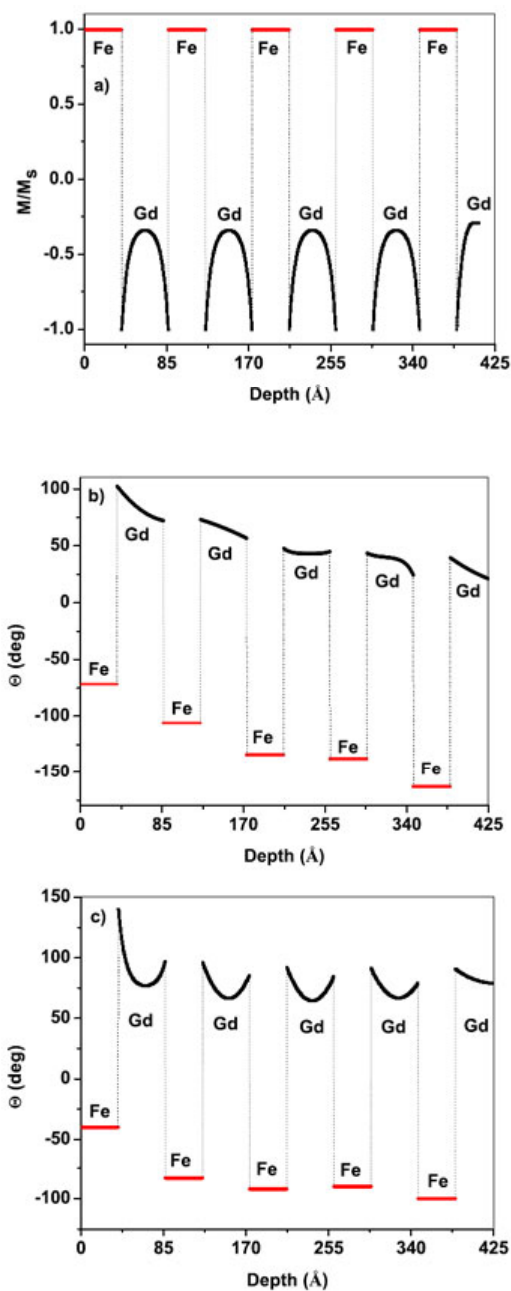


Рис. 1. Профили намагниченности $[Fe/Gd]_n$ гетероструктур: *a* - $T=140$ К, $H=50$ мТ; *b* - $T=20$ К, $H=50$ мТ; *c* - $T=20$ К, $H=500$ мТ.

При низких температурах ситуация более сложная (рис. 1b, c). Внутри слоев железа упорядочение однородно, хотя угол поворота Θ_{Fe} меняется от слоя к слою, причем большие изменения – в слабом поле $H=50$ мТ (рис. 1b). Магнитные моменты постоянны по модулю, но меняют свое направление внутри каждого слоя. Легко видеть, что скачок угла $\Theta(Z)$ на каждой границе раздела Fe/Gd и Gd/Fe близок к 180° , то есть сильный антиферромагнитный обмен диктует антипараллельность спинов Fe и Gd. Срав-

нение рис. 1b и 1c показывает, что при одной и той же температуре (20 К) углы поворотов M_{Gd} сильно зависят от внешнего поля. Следует отметить, что угловая фаза появилась при низкой температуре далеко от точки компенсации, в отличие от гетероструктур с большим числом повторений. Таким образом, поведение систем с малым числом магнитных слоев оказывается гораздо более сложным и разнообразным, чем у бесконечной сверхрешетки.

С.Овчинников

1. E.Kravtsov et al., *Phys. Rev. B* **79**, 134438 (2009).
2. R.E.Camley, *Phys. Rev. B* **39**, 12316 (1989).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Фуллерены в космосе

Новые данные о фуллеренах в космосе недавно опубликовали сразу две группы исследователей [1,2]. Особенно интересно то, что фуллерены найдены в богатых водородом туманностях. Напомним, что впервые фуллерены в космосе были обнаружены с помощью космического телескопа Spitzer летом этого года (см. *ПерсТ* [3]) – в спектрах планетарной туманности Тс 1 учёные из Канады и США идентифицировали молекулы C_{60} и C_{70} [4]. Молекул, содержащих водород, они не обнаружили. По мнению авторов этой работы, условия в туманности были идеальны для образования фуллеренов, т.к. именно наличие или отсутствие водорода в среде, богатой углеродом, определяет, какие молекулы могут быть сформированы – ароматические углеводороды или фуллерены. Но, как оказалось, в Космосе свои законы. С помощью того же космического телескопа Spitzer с ИК-спектрографом авторы новых исследований [1,2] выяснили, что водород не является помехой для рождения фуллеренов. Фуллерены могут образоваться наряду с полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ).

Учёные из Испании, США и Польши [1] обнаружили C_{60} вместе с ПАУ в четырёх планетарных туманностях – в трёх, принадлежащих нашей Галактике (М 1-20, М 1-12, К 3-54) и в одной (SMP SMC 16) из Малого Магелланова Облака. Впервые фуллерены найдены за пределами нашей галактики! Малое Магелланово Облако (рис.1) и Большое Магелланово Облако – карликовые галактики, ближайшие соседи нашего Млечного Пути. Оба Облака окружены общей оболочкой из нейтрального водорода. Они видны невооружённым глазом в Южном полушарии, поэтому по ним ещё в древности ориентировались мореплаватели. Использовали их и участники экспедиции Магеллана во время первого в мире кругосветного путешествия; после гибели Магеллана в 1521г. Облака назвали в его честь. На радость астрономам сейчас в Большом и Малом Магеллановых Облаках наблюдается бурный процесс рождения звезд.