

Известно, что поверхность из вертикально расположенных нанотрубок является самым темным из всех покрытий, изобретенных человеком. Эффект очень похож на тот, которому обязан своим глубоким цветом черный бархат. Луч света, попадающий на ворсистую поверхность, в данном случае, в густой лес из нанотрубок, уже почти не имеет шансов выйти наружу, что позволяет достичь уровня поглощения 99.9%. Исследователи из Univ. of Cambridge (Великобритания) [1] решили воспользоваться этим для создания амплитудных голограмм высокого контраста (рис.1).

По предварительно рассчитанной структуре голограммы методом электронно-лучевой была создана подложка, на которой был выращены многостенные нанотрубки. Вместо бескрайнего леса нанотрубок на таких протравленных подложках росли отдельные рощицы, разделенные проплетинами, сквозь которые отсвечивало зеркальное покрытие (рис.2).

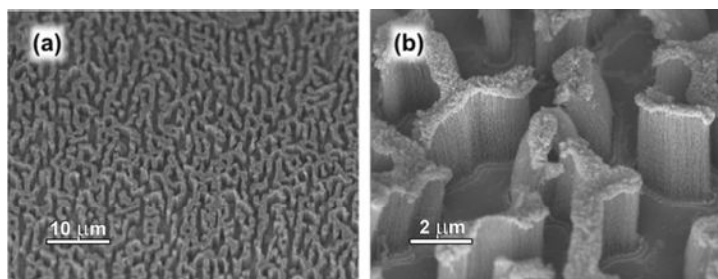


Рис. 2. Зеркальное покрытие с выращенными на нем остроконечными вертикально расположенными нанотрубками – новая разновидность амплитудных голограмм; а) и б) – изображения в электронном микроскопе при разном увеличении.

Освещая лазерным пучком такую поверхность, ученые получали на экране логотип своей *alma mater* (рис. 1). Если при создании подобных структур использовать более дешевые фотолитографические методы, то новый тип высококонтрастных амплитудных голограмм может иметь и практический интерес.

А.Пятаков

1. Y.Montelongo et al., *Appl. Phys. Lett.* **103**, 11104 (2013).

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ Ферромагнетизм $d_{xy}$ электронов Ti в интерфейсе $LaAlO_3/SrTiO_3$

Когда из двух широкозонных диэлектриков  $LaAlO_3$  и  $SrTiO_3$  научились делать гетероструктуру методами современной атомной инженерии, то свойства интерфейса оказались довольно неожиданными, в частности, там наблюдались сверхпроводимость и ферромагнетизм. Объемный кристалл  $SrTiO_3$  при допировании может переходить в металлическое и сверхпроводящее состояние. В этом смысле ферромагнетизм более неожиданен, поскольку ни один из двух оксидов не имеет ферромагнитных свойств в объемном виде. Ферромагнетизм в интерфейсе на-

блюдался несколькими группами [1,2], но до сих пор не было прямых экспериментальных данных, проясняющих механизм формирования ферромагнитного состояния. В работе [3] группа авторов из Stanford Univ. (США) дала ответ на этот вопрос с помощью элементно-чувствительных методов спектроскопии рентгеновского поглощения (XAS) и рентгеновского магнитного кругового дихроизма (XMCD) на синхротроне в SSRL в Стэнфорде. Эти методы позволяют определить, обусловлен ли магнетизм тем или иным элементом, входящим в состав структуры, или внешними примесями. Все спектры были получены в режиме полного электронного выхода (TEY), для которого глубина сбора информации составляет 5-10 нм. Из угловой зависимости XMCD сигнала, пропорционального скалярному произведению  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{M}$ , где  $\mathbf{K}$  – волновой вектор рентгеновских лучей, можно определить направление магнитного момента  $\mathbf{M}$ . Величина  $M$  может быть получена с высокой точностью ( $\sim 0.005 \mu_B/\text{атом}$ ). Образцы были получены с помощью лазерного напыления нескольких элементарных ячеек (UC)  $LaAlO_3$  на подложку  $SrTiO_3$  (001). Транспортные свойства полученных образцов совпадали с опубликованными ранее. Измерения XAS были сделаны для контроля возможных магнитных примесей Cr, Mn, Fe, Co, Ni. В рамках разрешения  $10^{12}$  атомов/см<sup>2</sup> примеси не обнаружены.

Из рис. 1 видно, что магнитный сигнал отсутствует при поперечной ориентации, и намагниченность лежит в плоскости. Сигнал отсутствует для очень тонких (1-2 UC) слоев  $LaAlO_3$ , и наблюдается для числа ячеек 3.3 и 10. Величина намагниченности зависит от того, какую модель принять для пространственного распределения магнитных ионов. Для равномерного распределения в изучаемом слое 5-10нм получается  $0.01 \mu_B$  на атом титана, а для модели, в которой магнитные катионы собраны в одной плоскости, примерно  $0.1 \mu_B/Ti$ . Внизу (рис. 1b) приведены рассчитанные спектры дихроизма от ионов  $Ti^{+4}$  и  $Ti^{+3}$ . В подложке (чистый  $SrTiO_3$ ) мы ожидаем  $Ti^{+4}$ , а в интерфейсе возможно образование  $LaTiO_3$  с  $Ti^{+3}$ . Видно, что с экспериментом совпадают спектры  $Ti^{+3}$ . Благодаря тетрагональному искажению октаэдров  $TiO_6$  вблизи поверхности, обнаруженному в спектрах рентгеновского линейного дихроизма (XLD) в той же работе [3], имеет место расщепление  $t_{2g}$  и  $e_g$  состояний, так что орбитали с плоскостной ориентацией  $d_{xy}$  и  $d_{x^2-y^2}$  оказываются ниже по энергии, чем с поперечной. Так что в конфигурации  $3d^1$  ( $Ti^{+3}$ ) заполняется  $d_{xy}$  орбиталь. Благодаря катион-анионной гибридизации часть  $d$ -электронной плотности переносится на кислород. На рис. 2 показан XMCD спектр на кислороде, подтверждающий спиновую поляризацию  $d_{xy}$  электронов вблизи энергий  $E = 529.2$  эВ и отсутствие поляризации и  $e_g$  состояний на энергии 532.5 эВ.

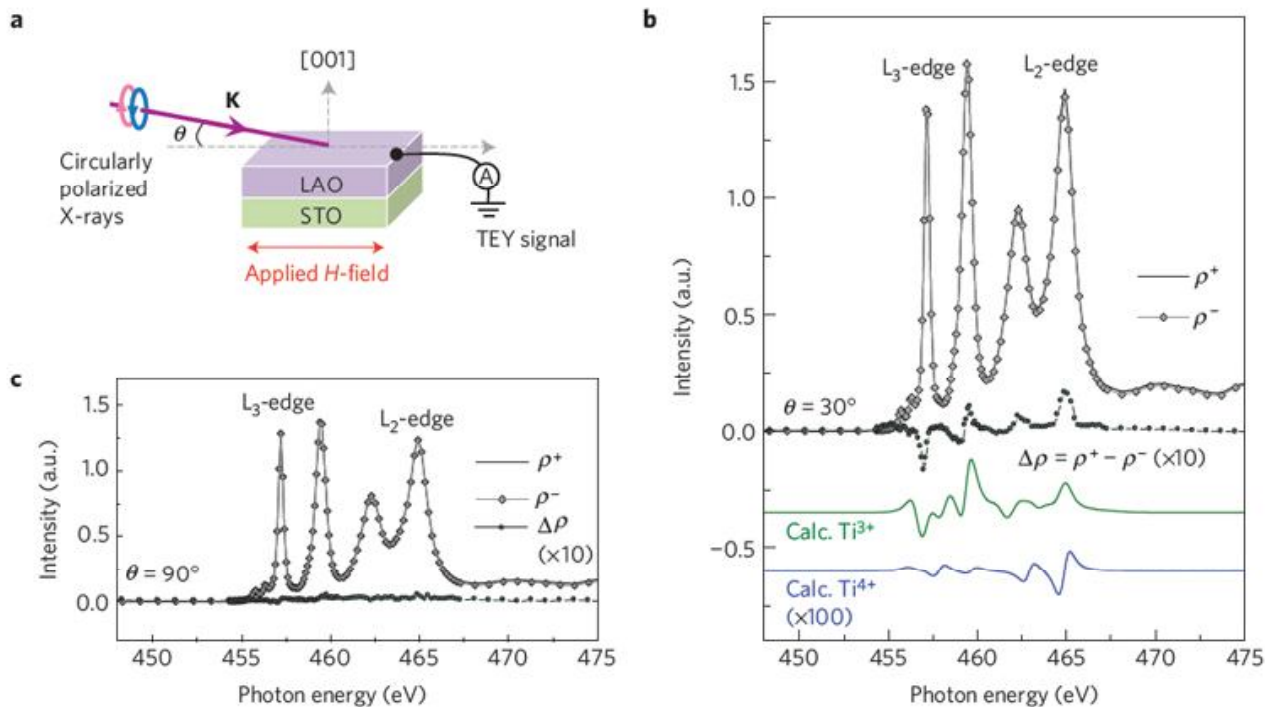


Рис. 1. XMCD от гетероструктуры  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ : схема эксперимента (a),  $L_{2,3}$  поляризованные спектры XAS и их разность, XMCD, для плоскостной (b) и поперечной (c) геометрии при 10К. Показаны также расчеты XMCD в теории мультиплетов для термов ионов  $\text{Ti}^{+4}$  и  $\text{Ti}^{+3}$ .

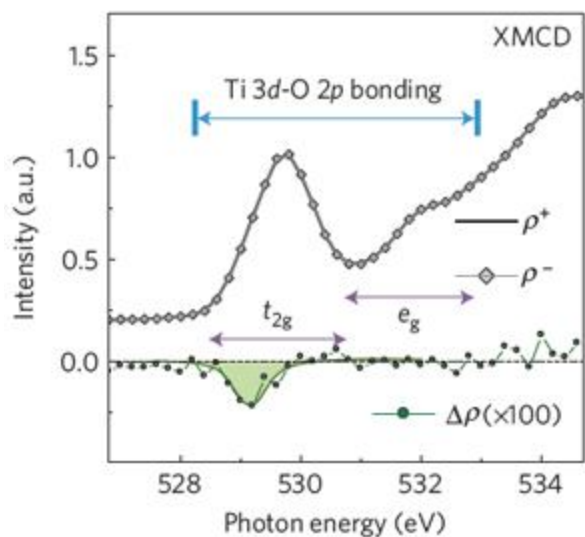


Рис. 2. Эффекты катион-анионной гибридизации в O XMCD на К-крае.

В широкозонных диэлектриках с анионными вакансиями возможен ферромагнетизм с моментами на вакансиях. Тем не менее использованные в работе [3] элементочувствительные методики позволяют сделать вывод о d-электронном характере упорядочения.

С. Овчинников

1. A. Brinkman et al., *Nature Mater.* **6**, 493 (2007).
2. D.A. Dikin et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 056802 (2011).
3. J.-S. Lee et al., *Nature Mater.* **12**, 703 (2013).

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой ИФТТ РАН и НИЦ «Курчатовский институт»

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: [irina@issp.ras.ru](mailto:irina@issp.ras.ru)

Научные редакторы К. Кугель, Ю. Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О. Алексеева, А. Елецкий,

М. Маслов, С. Овчинников, Л. Опенов, А. Пятаков

Выпускающий редактор: И. Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64<sup>а</sup>