

## Природа "страйповой" текстуры в $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

К.В. Мицен, О.М. Иваненко,

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Предложена микроструктурная модель  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  (LSCO), предполагающая совместное упорядочение ионов Sr и локализованных допированных дырок в квадратные решетки. Показано, что такое упорядочение в определенных интервалах концентраций Sr сопровождается формированием магнитных спиновых текстур, имитирующих «страйповую» модуляцию. Детальное совпадение экспериментальных «страйповых» фазовых диаграмм с рассчитанными может служить подтверждением предложенной микроструктурной модели LSCO.

Ранее [1] мы предложили механизм допирования LSCO, согласно которому замещение иона La на Sr приводит к появлению дырки, локализованной в  $\text{CuO}_2$  плоскости внутри кислородного октаэдра, смежного с ионом Sr. Т.е. система ион Sr + дырка представляет собой электрический диполь, который взаимодействует с другими такими же диполями через дальнедействующий кулоновский потенциал. В подобных системах между диполями возникает ориентационное взаимодействие, в результате которого диполи выстраиваются противоположными полюсами друг к другу. Исходя из кристаллической структуры соединения можно предположить, что замещение La на Sr в LSCO будет происходить таким образом, чтобы возникающие диполи образовывали цепочки, вытянутые вдоль оси  $c$  (рис.1). Такое расположение одновременно снимает вопрос о «принадлежности» допированной дырки тому или иному иону Sr.

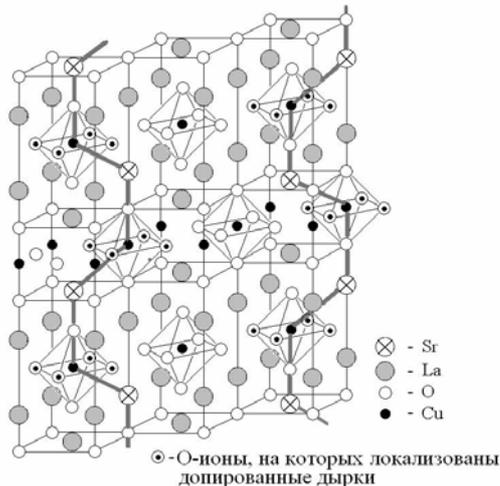


Рис. 1. Образование цепочек примесных диполей при допировании. Зигзагообразные линии соединяют ионы Sr с центрами кислородных квадратов, содержащих допированные дырки.

Расчет энергии электростатического взаимодействия диполей показывает, что две ближайшие цепочки диполей (рис.1) будут притягиваться друг к

другу при расстоянии между допированными дырками  $l_{com} \geq 2$ , а следующие за ближайшими – отталкиваться. Следствием такого характера взаимодействия будет упорядочение цепочек диполей, в результате которого в  $\text{CuO}_2$  плоскости допированные дырки (или проекции ионов Sr) будут занимать позиции в узлах квадратной решетки с неким параметром  $l_{com}$ , соизмеримым с постоянной  $\text{CuO}_2$  плоскости -  $a$ . Из расчета следует, что энергии конфигураций с  $l_{com} = 2, \sqrt{5}, \sqrt{8}$  и 3 близки с точностью  $\sim 10^{-2} e^2/\epsilon a$  в расчете на один диполь ( $\epsilon$  - диэлектрическая постоянная) и потому возможно их одновременное сосуществование в виде микродоменов, в которых допированные дырки заполняют позиции в решетках с различными  $l_{com}$ .

Решетка с данным  $l_{com}$  может существовать лишь в определенном интервале концентраций  $x$ . Сверху этот интервал ограничен значением  $x_{com} = 1/l_{com}$ , выше которого существование физически значимых доменов с данным  $l_{com}$  не отвечает условию постоянства средней концентрации. При  $x < x_{com}$  цепочки диполей «разрываются» и в квадратных решетках проекций появляются вакансии. Решетка с данным  $l_{com}$  будет сохраняться до некоторого значения  $x = x_l$ , которое при случайном распределении соответствует порогу 2D-перколяции по вакансиям  $c_v = 1 - x_l = 0,593$  [2]. Соответственно, существование решеток с данным  $l_{com}$  возможно при концентрациях, удовлетворяющих условию

$$0,407/l_{com}^2 < x \leq 1/l_{com}^2 \quad (1)$$

В свою очередь для произвольных значений концентрации  $x$  возможно упорядочение с заполнением узлов различных решеток проекций с  $l_{com}$ , удовлетворяющим условию:

$$0,638/\sqrt{x} < l_{com} \leq 1/\sqrt{x} \quad (2)$$

Рассмотрим теперь, как такое зарядовое упорядочение влияет на спиновую магнитную текстуру. Рассмотрим случай полного упорядочения для  $x = 1/8$ . Мы будем предполагать, что: 1) каждая дырка циркулирует по кислородному квадрату, окружающему ион меди; 2) вследствие взаимодействия этого дырочного тока и спинов четырех, ближайших к данному, ионов меди, последние поляризуются, а возникающие искажения АФМ-фона можно описать [3,4] как рождение скирмиона с топологическим зарядом  $\pm 1$ .

На рис.2а показано возможное упорядочение проекций Cu-спинов на  $\text{CuO}_2$  плоскость для упорядоченного расположения локализованных дырок (сплошные кружки) при  $x = 1/8$ , когда они образуют квадратную решетку  $\sqrt{8} \times \sqrt{8}$ . При этом  $\text{CuO}_2$ -

плоскость разбивается на отдельные 4-х угольные АФМ-упорядоченные микродомены, углы которых задаются локализованными допированными дырками. Проекция на  $\text{CuO}_2$  плоскость направлений спинов на  $\text{Cu}$  ионах, находящихся в узлах решетки, показаны стрелками. Возникающее в этом случае упорядочение, как видно из рис.2а, приводит к имитации страйповой текстуры (вертикальные и горизонтальные страйпы выделены жирными линиями).

Перейдем теперь от упорядоченной решетки допированных дырок при  $x=1/8$  к их распределению при  $x \approx 1/8$ . Сначала рассмотрим экспериментальные данные, полученные в области существования статических параллельных страйпов при  $x \approx 0.12$ . Это даст нам возможность провести сравнение результатов эксперимента с нашей моделью.

В [5] на образце LSCO с  $x \approx 0.12$  наблюдалась модуляция спиновой текстуры с параметром несоизмерности  $\delta = 0.118$ . Это соответствует среднему периоду текстуры  $T \approx 8.5$  (в единицах  $a$ ), или чередованию двух периодов  $T_1 = 8$  и  $T_2 = 9$ . На рис.2б показана предлагаемая нами картина упорядоченного распределения допированных дырок (а, следовательно, и проекций допантов) для средней концентрации  $x = 0.118$ , полученная «разрезанием» полностью упорядоченного распределения для  $x = 0.125$  вдоль диагонали и смещением одной части относительно другой на вектор  $\mathbf{q} = (1, 1)$ . Такая дислокация, «сдвигает» системы вертикальных и горизонтальных страйпов при переходе через разрез на одну ячейку. Возникающая текстура (рис.2б) даст на нейтроно-граммах характерные рефлекссы, отвечающие несоизмерной модуляции как спина (с параметром несоизмерности  $\delta$ ), так и заряда (с параметром несоизмерности  $2\delta$ ). Из условия сохранения средней концентрации  $T_d x_{loc} = (T_d + 1)x_m$ . Здесь  $T_d$  - средний период дислокаций в единицах  $a$ ,  $x_{loc}$  - локальная концентрация дырок внутри домена. Для соблюдения средней концентрации  $x_m = 0.118$  и при локальной концентрации внутри домена  $x_{loc} = 0.125$  вводимые диагональные дислокации должны иметь средний период  $T_d = 17$  т.е.  $T_2 = T_1 + T_d$ . Такие квазипериодические дислокации приводящие к несоизмерной модуляции как кристаллической структуры, так и спиновой текстуры, обеспечивают возможность наблюдения несоизмерных рефлекссов в дифракционных экспериментах.

Особенность возникающей картины упорядочения (рис.2б) в том, что и горизонтальные и вертикальные страйпы смещаются на одну постоянную решетку. Т.е. они как бы отклоняются от тетрагональных осей на угол  $\theta_Y = 1/17 \approx 3.3^\circ$  в направлении орторомбической оси  $b$ . Именно такие «наклонные» параллельные страйпы с углом наклона  $3^\circ$  наблюдались в работе [4].

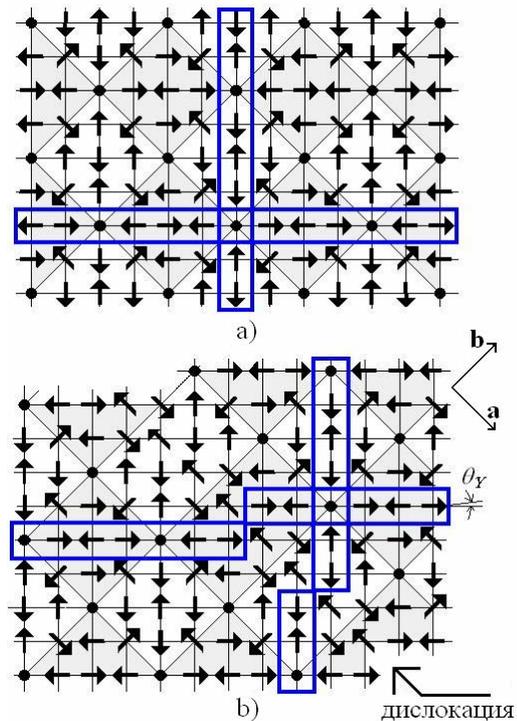


Рис. 2. Спиновая текстура  $\text{CuO}_2$  плоскости; а)  $x=1/8$ , б) при  $x < 1/8$ . (пояснения см. в тексте)

Рассмотрим теперь спиновую текстуру при  $x < 1/8$ . Она может быть получена из полностью упорядоченного распределения для  $x=1/8$  введением определенного числа подобных дислокаций. Средний период этой текстуры  $T$ , определяемый как расстояние между серединами однофазных магнитных микродоменов, включает два заполненных узла, как и в случае полного упорядочения. Т.е. в прямоугольнике площадью  $T \cdot l_{com} / \sqrt{2} = 2T$  должно находиться 2 заполненных узла. Откуда

$$2Tx = 2 \text{ и } \delta = 1/T = x \quad (3)$$

Таким образом, соотношение  $\delta = x$  является, случайным и связано с тем, что в случае параллельных страйпов дырки находятся на прямых, отстоящих друг от друга на расстоянии  $2a$ .

Следует отметить, что вводимые дислокации являются фактически зародышами диагональных страйпов. Они будут проявляться в виде квазипериодической структуры, при  $x < 0.06$ , когда останутся лишь диагональные строчки примесных диполей с расстоянием между последними  $l_{com} = \sqrt{8}$  и с расстоянием между самими строчками  $l \geq 2\sqrt{8}$ .

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке РФ (контракт № 40.012.1.1.1357).

1. К.В. Мицен, О.М. Иваненко. УФН, 174, 545 (2004).
2. R. M. Ziff, Phys. Rev. Lett. 69, 2670 (1992).
3. R.J. Gooding, et al., Phys. Rev. B 55, 6360 (1997).
4. А.А. Белавин, А.М. Поляков, Письма в ЖЭТФ 22, 503 (1975).
5. H. Kimura, et al., Phys. Rev. B. 61, 14366 (2000).