

Особенности магнитной анизотропии нестехиометрических сплавов Mn_xSi_{1-x}

А.Б. Дровосеков¹, Н.М. Крейнс¹, А.О. Савицкий¹, С.В. Капельницкий², Г.В. Пруцков²,
В.В. Рыльков², В.В. Тугушев², О.А. Новодворский³, Е.А. Черобыло³, Y. Wang⁴, S. Zhou⁴

¹Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

²НИЦ Курчатовский институт

³Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН

⁴Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institute of Ion Beam Physics and Materials Research

Наличие необычных транспортных и магнитных свойств у сплавов $MnSi$ объясняет интерес к ним с точки зрения возможного использования их в спинтронных устройствах. Особый интерес представляют сплавы с высокой концентрацией Mn ($x \approx 0.5$). В работе [1] было продемонстрировано наличие ферромагнитного упорядочивания при комнатных температурах в таких структурах в отличие от монокристаллического $MnSi$, имеющего температуру Кюри 30 К. В связи с тем, что природа высокотемпературного магнетизма в сплавах $MnSi$ до конца не выяснена, представляет интерес изучение магнитной динамики в таких системах.

Образцы толщиной 70 нм были получены методом импульсного лазерного осаждения с содержанием Mn $x \approx 0.44 - 0.63$ на подложках $\alpha-Al_2O_3$. Структурные свойства образцов изучались методами рентгеновской дифракции, атомносиловой и магнитосиловой микроскопии (АСМ и МСМ). Магнитные свойства исследовались с помощью СКВИД магнитометрии и ферромагнитного резонанса (ФМР). Измерения ФМР были проведены в температурном диапазоне 4.2-300 К и частотном диапазоне 7-60 ГГц при различных ориентациях магнитного поля по отношению к плоскости пленки.

Данные структурных исследований свидетельствуют о наличии мозаичной структуры изучаемых образцов [2]. Результаты АСМ и МСМ, по-видимому, свидетельствуют о пиннинге намагниченности на границах между кристаллитами.

По результатам измерений температурной зависимости статической намагниченности $M(T)$ для образцов с $x \approx 0.44$ и 0.63 магнитный порядок не наблюдался при температурах выше 100 К. Напротив, данные по $M(T)$ для образцов с $x \approx 0.52 - 0.55$ показывают наличие магнитного момента вплоть до $T \approx 300 K$. Причем, измеренная при низких температурах величина магнитного момента составляет $\sim 1 \mu_B/Mn$, что существенно больше, чем $0.4 \mu_B/Mn$ для монокристалла $MnSi$.

На рис. 1 представлены примеры записей линий магнитного резонанса при ориентации магнитного поля в плоскости пленки для образцов с различными концентрациями Mn при температуре $T = 30 K$ и частоте $f = 17.4 ГГц$. Линия поглощения имеет лоренцевскую форму и ее положение не изменяется при повороте магнитного поля в плоскости пленки, что подтверждает выводы структурных исследований о поликристалличности исследуемых образцов. Линия поглощения, наблюдаемая на образцах с $x \approx 0.44$ и $x \approx 0.63$, соответствует парамагнитному резонансу с величиной $g \approx 2.14$. Для образцов $x \approx 0.52 - 0.55$ линия резонанса сдвинута в низкие поля, что характерно для ФМР и связано с размагничивающим полем и/или легкоплоскостной анизотропией пленки. На вставке к рисунку представлена результирующая зависимость резонансной частоты от магнитного поля $f(H)$ для $x \approx 0.52$.

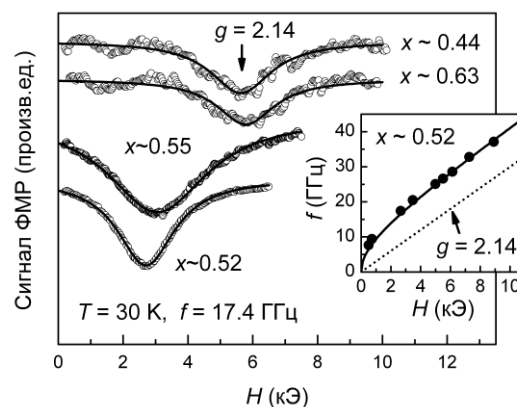


Рис.1. Примеры записей сигнала ФМР для образцов с различной концентрацией Mn . На вставке приведена зависимость $f(H)$ для образца с $x \approx 0.52$.

Для описания экспериментальных данных по магнитному резонансу использовался феноменологический подход, в котором энергия анизотропии представлена в следующем виде:

$$E = K_1 \cos^2 \theta + K_2 \cos^4 \theta, \quad (1)$$

где $\cos\theta = M_z / M$, K_1 и K_2 - константы анизотропии. В случаях ориентации магнитного поля параллельно и перпендикулярно плоскости пленки, $f(H)$ даются следующими выражениями:

$$f_{\parallel} = \gamma \sqrt{H(H + K_{\parallel}M)}, \text{ где } K_{\parallel}M = 4\pi M + 2K_1 / M \quad (2)$$

$$f_{\perp} = \gamma(H - K_{\perp}M), \text{ где } K_{\perp}M = K_{\parallel}M + 4K_2 / M \quad (3)$$

С помощью (2) для разных образцов были экспериментально определены температурные зависимости $K_{\parallel}M(T)$ (рис. 2). Как видно из рисунка, образцы с $x \approx 0.52 - 0.55$ демонстрируют высокотемпературный ферромагнетизм, в отличие от образцов с $x \approx 0.44, 0.63$. Полученная величина $K_{\parallel}M$ при низких температурах значительно превышает значение анизотропии формы $4\pi M$, что свидетельствует о наличии дополнительного вклада в анизотропию типа легкая плоскость, описываемого константой K_1 .

На рис. 3 показана низкотемпературная зависимость $f(H)$ в случае ориентации магнитного поля перпендикулярно плоскости пленки для образцов с $x \approx 0.52$ и $x \approx 0.53$. Для описания экспериментальных данных $f(H)$ требуется учет анизотропии 4-го порядка. Величина константы K_2 оказывается сравнимой с легкоплоскостной анизотропией: $|K_2| / K_1 \approx 0.2 - 0.4$.

Для качественного понимания природы анизотропии в изучаемой системе можно рассмотреть микроскопическую модель [2], учитывающую наличие упругих деформаций на границах кристаллитов. Данная модель позволяет предсказать наличие легкоплоскостной анизотропии 2-го порядка и легкоосной анизотропии 4-го порядка, введенных при описании ФМР феноменологически. Однако, соотношение между константами анизотропии, предсказываемое микроскопической моделью $|K_2| / K_1 \approx 10^{-3} - 10^{-4}$ оказывается значительно меньшим, чем соответствующая величина, полученная из эксперимента. Данное различие может быть объяснено, ограниченностью применимости теории. Кроме того, феноменологический подход описания ФМР предполагал однородность изучаемой системы и полученные константы анизотропии надо рассматривать, как эффективные величины.

В данной работе с помощью метода ФМР было показано, что в образцах Mn_xSi_{1-x} при $x \approx 0.52 - 0.55$ наблюдается высокотемпературный ферромагнетизм, что находится в согласии с результатами работы [1]. Кроме того, данные ФМР демонстрируют наличие существенной легкоплоскостной анизотропии пленок 2-го порядка и легкоосной анизотропии 4-го порядка. Возможной причиной наблюдаемых особенностей анизотропии в исследуемых образцах является присутствие механических напряжений на границах между кристаллитами.

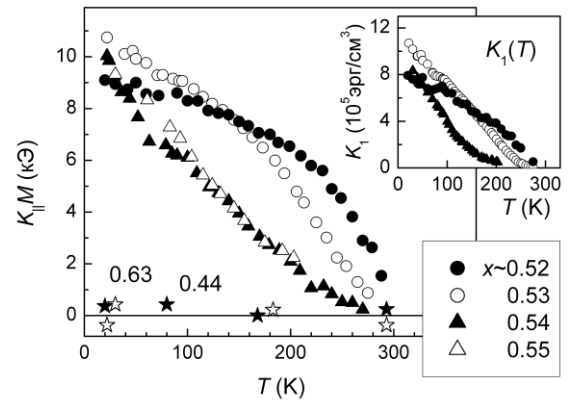


Рис.2. Зависимости $K_{\parallel}M(T)$ для образцов с разными значениями x . На вставке представлена зависимость $K_1(T)$.

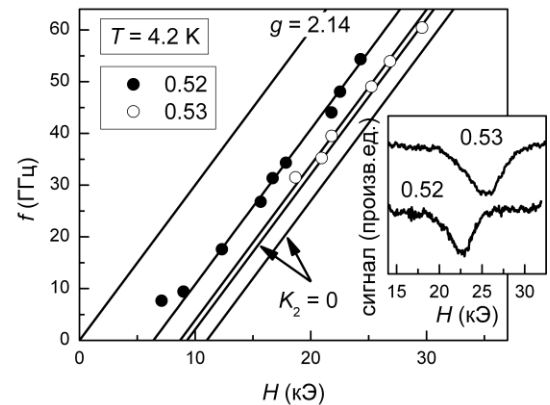


Рис.3. $f(H)$ для образцов с $x \approx 0.52, 0.53$ при ориентации магнитного поля перпендикулярно плоскости пленки.

Литература

- 1 Rylkov V.V., *et al* High-Temperature Ferromagnetism in $\text{Si}_{1-x}\text{Mn}_x$ ($x \approx 0.5$) Nonstoichiometric Alloys // JETP Lett., 2012 V. 96 P. 255.
- 2 Drovosekov A.B. *et al* Magnetic anisotropy of polycrystalline high-temperature ferromagnetic $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x \approx 0.5$) alloy films // arXiv:1510.02634 [cond-mat.mtrl-sci]