

01,05

Намагниченность поликристаллического иттербия в области низкотемпературного структурного перехода

© А.Е. Шитов, А.Т. Бурков, М.П. Волков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.shitov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 19 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 29 ноября 2023 г.

Принята к публикации 7 декабря 2023 г.

Температурные и магнитопольевые зависимости магнитного момента $M(T, H)$ поликристаллического иттербия исследованы в области фазового превращения из низкотемпературной плотноупакованной гексагональной структуры в высокотемпературную гранецентрированную кубическую. Зависимости $M(T)$ имеют парамагнитный характер для обеих фаз и описываются законом Кюри–Вейсса во всей области температур, кроме $T \leq 10$ К. В области температур структурного превращения $150 \text{ К} < T < 400 \text{ К}$ на зависимости $M(T)$ наблюдается гистерезис, вид которого зависит от величины приложенного магнитного поля. Гистерезисная зависимость $M(T)$ может рассматриваться как следствие переохлаждения высокотемпературной фазы иттербия при понижении температуры и, соответственно, перегрева низкотемпературной фазы при повышении температуры. При медленном охлаждении небольшая доля высокотемпературной фазы сохраняется вплоть до низких температур $T \sim 10$ К. Зависимости магнитного момента от магнитного поля $M(H)$, измеренные при одной и той же температуре, для разных ветвей магнитного гистерезиса, линейны вплоть до $H = 140$ кОе. В малых полях наблюдается небольшая добавка ферромагнитного типа, связанная, вероятно, с наличием магнитной примеси или с локализованными вблизи структурных дефектов ионами

Ключевые слова: намагниченность, парамагнетизм, низкие температуры, структурное превращение, иттербий.

DOI: 10.61011/FTT.2024.01.56929.257

1. Введение

Редкоземельный металл иттербий выделяется из ряда других РЗМ своими химическими и физическими свойствами. Одним из таких свойств является наличие структурного перехода в области температур $T < 400$ К. Высокотемпературная фаза имеет гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру, а низкотемпературная — гексагональную плотноупакованную (ГПУ) структуру. Переход между двумя структурными фазами происходит в интервале температур $\Delta T = 150\text{--}400$ К [1], ширина перехода зависит от чистоты и структурного совершенства материала. В этой области температур наблюдается гистерезис физических характеристик металлического иттербия при нагреве и охлаждении, что было продемонстрировано при измерениях удельного сопротивления $\rho(T)$ [2], термоэдс [3] и магнитной восприимчивости [4]. Низкотемпературная ГПУ фаза иттербия обладает большим магнитосопротивлением (до 440% в магнитном поле $H = 140$ кОе при $T = 5$ К), а высокотемпературная ГЦК фаза значительно меньшим, в связи с чем гистерезис на зависимостях $\rho(T)$, измеренных в магнитном поле, становится еще более выраженным [5].

Структурные фазы металлического иттербия обладают также и разными магнитными свойствами. Ранние измерения намагниченности низкотемпературной фазы были проведены в работе [6], которые показа-

ли парамагнитное поведение, удовлетворяющее закону Кюри–Вейсса. В то же время в работе [4] в чистом иттербии ($RRR=100$) наблюдался переход из парамагнитного состояния в диамагнитное при понижении температуры, связанный с переходом из ГЦК фазы в ГПУ фазу. Дальнейшие исследования не показали наличия диамагнетизма в иттербии при низких температурах, что может быть связано с наличием магнитных примесей, с сохранением высокотемпературной парамагнитной фазы до низких температур или с большой долей магнитных ионов Yb^{3+} , связанных со структурными дефектами [7,8].

В настоящей работе проведены измерения зависимостей магнитного момента от температуры и магнитного поля $M(T, H)$ на поликристаллических образцах иттербия, в том числе в области структурного превращения, где наблюдается гистерезис его физических свойств.

2. Методика

Исследовались образцы, аналогичные использованным в работе [5], полученные дистилляцией исходного металла в высоком вакууме, имеющие $RRR \sim 20$, что свидетельствует о хорошей очистке иттербия от газовых примесей. Измерения намагниченности проводились на вибрационном магнитометре установки PPMS (Quantum Design) в интервале температур 2–400 К и магнитных полях до 140 кОе.

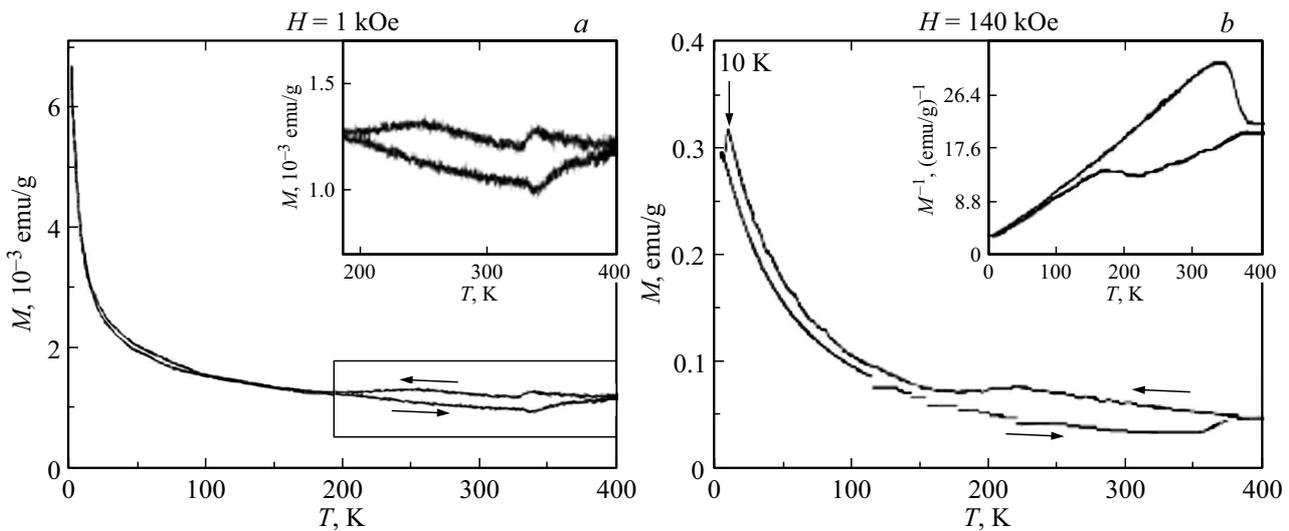


Рис. 1. Температурная зависимость магнитного момента $M(T)$ иттербия в магнитном поле: (а) $H = 1$ кОе, на вставке приведена зависимость $M(T)$ в области структурного перехода и (б) $H = 140$ кОе, на вставке представлена зависимость $1/M(T)$.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости магнитного момента $M(T)$ иттербия в магнитных полях $H = 1$ кОе (рис. 1, а) и 140 кОе (рис. 1, б). При понижении температуры магнитный момент увеличивается и наблюдается гистерезис, ширина которого зависит от величины магнитного поля. Гистерезисная зависимость $M(T)$ может рассматриваться как следствие переохлаждения высокотемпературной фазы при понижении температуры с одним ($H = 140$ кОе) или двумя ($H = 1$ кОе, вставка на рис. 1, а) резкими переходами в низкотемпературную фазу и, соответственно, как следствие перегрева низкотемпературной фазы при повышении температуры с резким переходом в высокотемпературную фазу. Таким образом, температурная зависимость магнитного момента обеих фаз может анализироваться в широкой температурной области, включающей области перегрева и переохлаждения. На вставке к рис. 1, б приведена зависимость обратного магнитного момента от температуры, демонстрирующая выполнение закона Кюри–Вейсса для обеих фаз. Отклонение от этого закона наблюдаются только при низкой температуре, что может быть связано с присутствием малого количества магнитных примесей [9].

На зависимости $M(T)$, измеренной в магнитном поле $H = 140$ кОе (рис. 1, б), наблюдается дополнительная особенность — резкое изменение намагниченности при охлаждении иттербия в области $T \sim 10$ К (указано стрелкой на рис. 1, б). Эта особенность связана, по-видимому, с сохранением части высокотемпературной фазы вплоть до низкой температуры. Сохранение высокотемпературной фазы вплоть до низких температур наблюдалось ранее в иттербии после пластической деформации [4] и в тонких кристаллических пленках Yb [10].

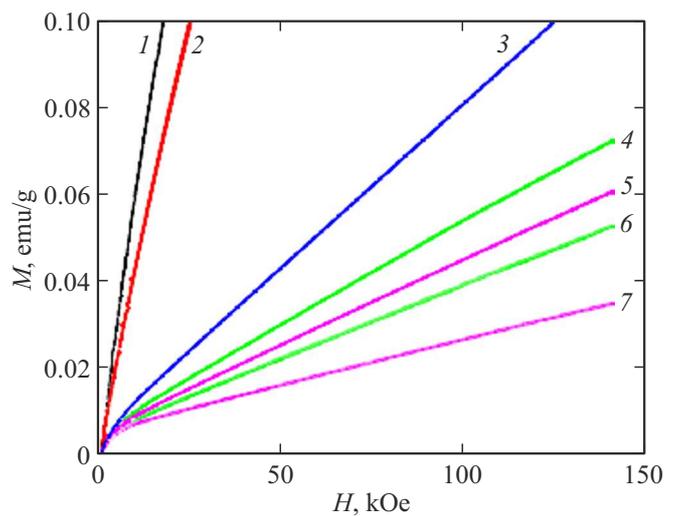


Рис. 2. Зависимость магнитного момента иттербия от магнитного поля $M(H)$ для температур $T = 2$ –400 К представлены на рис. 2. Зависимости $M(H)$ парамагнитного вида наблюдаются, как у высокотемпературной ГЦК фазы, так и у низкотемпературной ГПУ фазы. Кроме того, в малых полях наблюдается небольшая добавка ферромагнитного вида, которая может быть связана как с наличием малого количества магнитной примеси, так и с локализованными на структурных дефектах ионами Yb^{3+} . Во многих материалах, содержащих Yb, рассматривается влияние магнитных ионов Yb^{3+} в общей намагниченности [11]. В области температур, где наблюдается гистерезис на зависимости $M(T)$, зависимо-

сти $M(H)$, измеренные при одной и той же температуре, имеют разный наклон, связанный с тем, в какой фазе (низкотемпературной, при нагреве или высокотемпературной, при охлаждении) находился образец. Так, при $T_1 = 200$ К и $T_2 = 300$ К разность магнитных моментов низкотемпературной и высокотемпературной фаз в магнитном поле $H = 140$ кОе составляет $\Delta M_1 = 0.02$ ему/г и $\Delta M_2 = 0.026$ ему/г, соответственно (рис. 2), что согласуется с данными на рис. 1 $\Delta M_1 = 0.022$ ему/г и $\Delta M_2 = 0.026$ ему/г.

4. Заключение

Таким образом, измерения температурных и магнитопольевых зависимостей магнитного момента поликристаллического иттербия показали, что и высокотемпературная, и низкотемпературная структурные фазы демонстрируют парамагнитный характер и описываются законом Кюри–Вейсса во всей области температур, кроме $T \leq 10$ К. В области структурного превращения 150 К $< T < 400$ К на зависимости $M(T)$ наблюдается гистерезис, вид которого зависит от величины приложенного магнитного поля. При медленном охлаждении на зависимости $M(T)$, измеренной в магнитном поле $H = 140$ кОе, наблюдалась особенность в виде резкого изменения намагниченности в области $T \approx 10$ К, связанная с сохранением части высокотемпературной фазы вплоть до низкой температуры. Зависимости магнитного момента от магнитного поля $M(H)$, измеренные при одной и той же температуре для разных ветвей магнитного гистерезиса, линейны вплоть до $H = 140$ кОе. В малых полях наблюдается небольшая добавка ферромагнитного типа, связанная, вероятно, с наличием малого количества магнитной примеси или с локализованными на структурных дефектах ионами Yb^{3+} .

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F.X. Kayser. Phys. Rev. Lett. **25**, 10, 662 (1970).
- [2] C.M. Hurd, J.E.A. Alderson. AIP Conf. Proc. **10**, 1330 (1973).
- [3] А.Т. Бурков, М.В. Ведерников, В.Г. Двуниткин, Т.В. Никифорова. Высокочистые вещества **5**, 50 (1990).
- [4] E. Bucher, P.H. Schmidt, A. Jayaraman, K. Andres, J.P. Maita, K. Nassau, P.D. Dernier. Phys. Rev. B **2**, 3911 (1970).
- [5] G.A. Lenkov, A.E. Shitov, A.T. Burkov, M.P. Volkov. Semiconductors **53**, 1853 (2019).
- [6] J.M. Lock. Proc. Phys. Soc. (London) B **70**, 476 (1957).
- [7] M. Ribault, A. Benoit, J. Flouquet, G. Chouteau. J. Phys. F **8**, L145 (1978).
- [8] M. Ribault, A. Benoit, J. Flouquet, G. Chouteau. J. de Physique Colloque **40**, C 5, 391 (1979).
- [9] R.M. Moon, H.R. Child, W.C. Koehler, L.J. Raubenheimer. J. App. Phys. **38**, 3, 1383 (1967).
- [10] V.M. Kuz'menko, A.N. Vladychkin. Low Temperature Phys. **29**, 928 (2003).
- [11] E.P. Skipetrov, N.A. Chernova, E.I. Slyn'ko, Yu.K. Vygranenko. Phys. Rev. B **59**, 12928 (1999).

Редактор Д.В. Жуманов