УДК 538.9

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-1-73-80

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ ДЛЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА С СОДЕРЖАНИЕМ Fe-B-Cr

Терезанова К.В.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

10500, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, Российская Федерация

Аннотация. В статье приводится анализ мессбауэровского спектра аморфного сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ и восстановленных распределений изомерных и квадрупольных сдвигов, магнитных сверхтонких полей в диапазоне температур от 16 до 293 К. Рассматриваются температурные зависимости ширины линии полученного спектра и восстановленных из него распределений его основных характеристик, что позволило определить температуру Кюри. Полученные данные позволили установить количество состояний атомов железа, которыми описывается локальная структура сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$.

Ключевые слова: температура Кюри, эффект Мессбауэра, магнитные сверхтонкие структуры, изомерный сдвиг, магнитное квадрупольное взаимодействие.

DETERMINATION OF THE CURIE TEMPERATURE FOR THE FERROMAGNETIC ALLOY WITH Fe-B-Cr

K. Terezanova

Bauman Moscow State Technical University

2-ya Baumanskaya ul. 5/1, 105005 Moscow, Russian Federation

Abstract. In this article is represented the analysis of Mossbauer spectrum of amorphous alloy $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ and recovered distributions of isomer shifts and quadrupole, magnetic hyperfine fields in the range of temperatures from 16 to 293 K. We are explored the temperature dependence of the line width of the obtained spectrum and recovered from it the distribution of its main characteristics. The data obtained allowed to set the number of States of iron atoms, which describes the local structure of the alloy $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$. Also at the end of the work is made the conclusion about the position of the point of transition of the alloy from ferromagnetic to paramagnetic state, i.e. the behavior of the temperature dependencies determined for the amorphous sample the Curie temperature.

Key words: Curie temperature, Mossbauer effect, magnetic hyperfine structure, isomer shift, magnetic-quadrupole interaction.

Введение

Аморфные сплавы FeB имеют широкий спектр различных физических свойств. В ряде работ были исследованы фазовый состав, намагниченность, температура магнитного перехода (температура Кюри) и другие характеристики аморфных сплавов [1–6]. Присутствие в таких сплавах дополнительно s-, p-, d-атомов приводит к изменению локальной структуры, что, в свою очередь, существенным образом влияет на физические свойства материалов. Влияние этих примесных атомов на локальную атомную и магнитную структуру, а также на ближний порядок аморфных сплавов на основе Fe-B практически не исследовано.

Локальная структура и ближний порядок в аморфных сплавах являются определяющими для получения необходимых физических свойств, в том числе и магнитных. Исследования структуры материалов Fe-B показали, что добавление в такие сплавы примеси переходных 3d-атомов приводит к изменению их магнитных свойств. Это привело к разработке новых магнитомягких аморфных сплавов для радиотехники, электроники, находящих широкое применение в промышленности [6; 7]. Таким образом, детальные исследования локальной атомной и магнитной структуры аморфных сплавов на основе железа и бора, а также состава локальных фаз в этих сплавах являются актуальной задачей современной физики.

В данной статье описаны результаты обработки спектров ленточек сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, а также приведён анализ полученных из них температурных зависимостей ширины мессбауэровского спектра, восстановленных распределений магнитных сверхтонких полей, изомерных и квадрупольных сдвигов. Образцы аморфных сплавов толщиной 20 мкм и шириной 10 мм были получены стандартным методом закалки из расплава поливом тонкой струйки жидкого металла на быстровращающийся охлаждаемый диск (методом спиннингования). Мессбауэровские спектры поглощения измерялись при температурах от 16K до 293K с помощью спектрометра MS-1104Ем в режиме постоянной скорости. Для восстановления распределения сверхтонких полей $P(H)$, изомерных $P(\delta)$ и квадрупольных $P(\epsilon)$ сдвигов из мессбауэровских спектров использовалась программа DISTRI [8].

Результаты

Мессбауэровские спектры на ядрах ^{57}Fe сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ и восстановленные с помощью программы DISTRI распределения изомерных и квадрупольных сдвигов и магнитных сверхтонких полей были исследованы в работах [9–13].

На рис. 1 представлены мессбауэровский спектр и восстановленные распределения изомерного и квадрупольного сдвигов для рассматриваемого образца $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ в ферромагнитном состоянии при комнатной температуре. Спектр данного образца имеет форму дублета со смещённым центром тяжести, то есть спектр является асимметричным (рис. 1а).

На рис. 1б представлено распределение изомерных сдвигов, причем изомерные пики в распределении $P(\delta)$ принадлежат соответствующим квадрупольным дублетам. Изомерный сдвиг определяется значением центра тяжести каждой

Рис. 1. Для сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ при комнатной температуре приведены:

- а) мессбауэровский спектр на ядрах ^{57}Fe ;
- б) восстановленное распределение изомерных сдвигов $P(\delta)$;
- в) восстановленное распределение квадрупольных сдвигов $P(\epsilon)$.

пары дублетов. Расстояние между соответствующей парой изомерных сдвигов определяет значение квадрупольного сдвига дублета. Как видно из рис. 1б, наиболее вероятное число таких пар не менее четырёх.

Из рис. 1в при разложении распределения $P(\epsilon)$ квадрупольных сдвигов на парциальные компоненты по Гауссу видно, что число таких компонент равно четырём. Это говорит, о том, что аморфный сплав $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ состоит из четырёх наиболее вероятных локальных состояний атомов железа, различающихся значениями как квадрупольных, так и изомерных сдвигов.

На рис. 2 приведены спектры сплава при температурах 200K, 90K и 16K и соответствующие им восстановленные распределения сверхтонких полей, разложенные на компоненты по Гауссу. Распределения $P(H)$ ведут себя по-разному при трёх представленных температурах. При низких температурах наблюдается широкое распределение магнитных сверхтонких полей. Число наиболее вероятных магнитных состояний железа равно четырём.

Рис. 2. Мессбауэровские спектры на ядрах ^{57}Fe сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ и разложения распределений $P(H)$ на парциальные составляющие Гаусса при 200К, 90К и 16К.

При $T = 200\text{K}$ наблюдается узкое распределение сверхтонких полей $P(H)$ с четырьмя наиболее вероятными состояниями железа. При этой температуре наиболее вероятные состояния атомов железа (максимумы в $P(H)$) имеют сверхтонкие поля в области значений 20–40 кЭ.

Максимум $P(H)$ при 16К приходится на область полей 150–200 кЭ. При низких температурах наибольший вклад в распределение $P(H)$ дают состояния атомов железа с высокими значениями сверхтонких полей.

На рис. 3 приводятся температурные зависимости ширины $\Delta P(I)$ мессбауэровского спектра, максимальных H_m и средних H_{cp} сверхтонких полей, максимальных δ_m и средних δ_{cp} изомерных сдвигов, максимальных ϵ_m и средних ϵ_{cp} квадрупольных сдвигов аморфного сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ в области температур 16–293К.

Основная задача изучения данных температурных зависимостей состояла в исследовании характера поведения приводимых графиков и определении из них точки Кюри – температуры, при которой ферромагнитные сплавы переходят в парамагнитное состояние и соответственно меняют свои свойства.

Рис. 3. Температурная зависимость (данные для аморфного сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$): а) ширины $\Delta P(I)$ спектра; б) максимальных H_m (1) и средних H_{cp} (2) сверхтонких полей; в) максимальных δ_m (1) и средних δ_{cp} (2) изомерных сдвигов; г) максимальных ϵ_m (1) и средних ϵ_{cp} (2) квадрупольных сдвигов.

Температура магнитного перехода для сплавов, содержащих Fe и B хорошо изучена в работах [1–3; 16; 17]. Как показано в данных статьях, температура Кюри таких сплавов превышает 500 K и изменяется в зависимости от количественного содержания железа и бора в образцах. Однако при добавлении примесей температура магнитного упорядочения значительно изменяется. Известно, что обмен, происходящий между атомами железа и хрома, является антиферромагнитным. Следовательно, обменное взаимодействие такого рода приводит к снижению температуры Кюри ферромагнитного образца. Рассмотрим подробно, как влияет присутствие хрома в сплаве $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ на его температуру магнитного перехода.

На рис. 3а представлена температурная зависимость ширины спектра. В парамагнитном состоянии ширина не меняется при варьировании температуры. До точки Кюри образец находится в ферромагнитном состоянии, и за счёт магнитной составляющей ширина спектра изменяется в зависимости от температуры. Это объясняет характер поведения приведённого графика для сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$. При повышении температуры от 0 K до 215 K ширина уменьшается, а при дальнейшем повышении температуры становится постоянной, что и свидетельствует о наличии температуры Кюри в точке 215(2) K.

В парамагнитном состоянии магнитных сверхтонких полей нет, поскольку необходимым условием их существования является наличие у данного атома или у соседних ему атомов ненулевого электронного магнитного момента. Из рис. 3б

видно, что при температуре выше 215K значения максимальных H_m и средних H_{cp} сверхтонких полей принимают нулевые значения, что и свидетельствует о переходе сплава в парамагнитное состояние. Стоит также обратить внимание на поведение графиков в ферромагнитном состоянии, то есть при температуре ниже предполагаемой температуры Кюри. График максимальных распределений $P(H)$ на достаточно большом интервале температур располагается значительно ниже, чем график средних значений сверхтонких полей, отвечающих центрам тяжести распределений $P(H)$. При температуре 90K значения максимальных и средних сверхтонких полей приближаются друг к другу, а в области низких температур (ниже 16K) значения сверхтонких полей H_m больше H_{cp} . Это говорит о том, что при низких температурах в распределении сверхтонких полей наиболее вероятны состояния атомов Fe с наибольшими локальными магнитными моментами.

На рис. 3в показаны изменения значений максимальных и средних изомерных сдвигов в зависимости от температуры. Как видно из приведённого графика, характер поведения значений максимальных и средних изомерных сдвигов практически одинаковый в достаточно большом диапазоне температур. А именно, в диапазоне от 0K до 215K максимальные δ_m (1) и средние δ_{cp} (2) изомерные сдвиги претерпевают спад с увеличением температуры. При этом максимальные значения изомерных сдвигов практически всегда находятся ниже средних значений. Однако при переходе образца из ферромагнитного в парамагнитное состояние оба набора значений практически совпадают.

Как показано на рис. 3г, при температуре 215K наблюдается изменение характера поведения температурных зависимостей максимальных и средних квадрупольных сдвигов. Так, обе зависимости ведут себя при увеличении температуры примерно одинаково, имея на всем диапазоне температур практически одно и то же значение квадрупольного сдвига. При прохождении точки со значением $T = 215K$ оба набора значений квадрупольных сдвигов претерпевают резкий скачок, и средние значения квадрупольного сдвига оказываются выше их максимальных значений.

Заключение

Изучение мессбауэровских спектров и температурных зависимостей сверхтонких магнитных полей, изомерных и квадрупольных сдвигов в диапазоне температур от 16 до 293K в аморфном сплаве $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ показали, что:

- 1) локальная структура аморфных сплавов может быть описана четырьмя состояниями атомов железа;
- 2) температура Кюри аморфного сплава $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ составляет $215 (\pm 2)$ K.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Покатилов В.С. Ближний атомный порядок в аморфных сплавах Fe-B // Металлофизика. 1983. Т. 5. Вып. 6. С. 96–100.
2. Елсуков Е.П., Ульянов А.Л., Колодкин Д.А., Порсев В.Е. Кинетика механохимического растворения хрома в железе // Коллоидный журнал. 2016. Т. 78. Вып. 4. С. 426–430.
3. Удовский А.Л., Васильев Д.А. Применение физических моделей для компьютерного моделирования термодинамических свойств и фазовых равновесий ОЦК-растворов

- системы Fe-Cr // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 2013. Т. 73-2. С. 51–56.
4. Покатилов В.С., Дмитриева Т.Г. Ближний порядок в аморфных ферромагнитных сплавах Fe-B // Известия РАН. 2009. Т. 73. Вып. 8. С. 1159–1162.
  5. Chien C.L., Musser D., Gyorgy E.M., Sherwood R.C., Chien H.S., Luborsky F.E., Walter J.L. Magnetic properties of amorphous $\text{Fe}_{100-x}\text{B}_x$ and crystalline Fe₃B // Phys. Rev. B. 1979. Vol. 20. No 1. P. 283–295.
  6. Пустов Ю.А., Балдохин Ю.В., Опара Б.К., Колотыркин П.Я., Овчаров В.П., Кислогубов И.А. О термической стабильности аморфного сплава Fe-Cr-B // Физика металлов и металловедение. 1988. Т. 65. Вып. 1. С. 159–167.
  7. Глезер А.М., Молотиллов Б.В., Овчаров В.П., Утевская О.Л., Чичерин Ю.Е. Структура и механические свойства сплавов Fe-Cr-B при переходе из аморфного состояния в кристаллическое // Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 64. Вып. 6. С. 1106–1109.
  8. Русаков В.С. Восстановление функций распределения сверхтонких параметров мессбауэровских спектров локально неоднородных систем // Известия РАН. Серия физическая. 1999. Т. 63. Вып. 7. С. 1389–1396.
  9. Вертхейм Г. Эффект Мессбауэра. М.: Мир, 1966. 172 с.
  10. Кузьмин Р.Н., Винтайкин Б.Е. Мессбауэровская спектроскопия сплавов. М.: Изд-во Московского университета, 1991. 96 с.
  11. Винтайкин, Б. Е. Физика твёрдого тела: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 360 с.
  12. Русаков В.С. Мёссбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем. Алматы: Институт ядерной физики, 2000. с. 430.
  13. Винтайкин Б.Е. Беляков Н.А., Чудаков И.Б., Саидахметов П.А., Турмамбеков Т.А. Физическое моделирование получения наноструктур в сплавах с высокой демпфирующей способностью на основе системы Fe-Cr // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. Вып. 4. С. 1–12.
  14. Дроздова М.А., Батырев И.Г., Прокошин А.Ф., Махоткин В.Е., Корытов В.В. Магнитная и электронная структура аморфных сплавов Fe-M-B (M = V, Cr, Mn) // Физика твёрдого тела. 1986. Т. 28. Вып 8. С. 2486–2491.

REFERENCES

1. Pokatilov V.S. The near atomic order in amorphous Fe-B alloys. In: Metallofizika [Metallophysics]. 1983, vol. 5, iss. 6. pp. 96–100.
2. Kinetics of mechanic-chemical dissolution of chromium in iron, Elsukov E.P., Ul'yanov A.L., Kolodkin D.A., Porsev V.E. In: Kolloidnyi zhurnal [Colloid journal]. 2016, vol. 78, iss. 4. pp. 426–430.
3. Udovskii A.L., Vasil'ev D.A. The use of physical models for computer simulation of the thermodynamic properties and phase equilibria of BCC solutions of the Fe – Cr system. In: Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yaroslava Mudrogo [Bulletin of Novgorod State University n.a. Yaroslav The Wise]. 2013, vol. 73-2, pp. 51–56.
4. Pokatilov V.S., Dmitrieva T.G. Short-range order in amorphous ferromagnetic Fe – B alloys. In: Izvestiya RAN [News of Russian Academy of Sciences]. 2009, vol. 73, iss. 8, pp. 1159–1162.
5. Chien C.L., Musser D., Gyorgy E.M., Sherwood R.C., Chien H.S., Luborsky F.E., Walter J.L. Magnetic properties of amorphous $\text{Fe}_{100-x}\text{B}_x$ and crystalline Fe₃B In: Phys. Rev. B. 1979, vol. 20, iss. 1, pp. 283–295.

6. On thermal stability of amorphous Fe – Cr – B alloy, Pustov Yu.A., Baldokhin Yu.V., Opara B.K., Kolotyркиn P.Ya., Ovcharov V.P., Kislogubov I.A. In: Fizika metallov i metallovedenie [Physics of metals and metallography]. 1988, vol. 65, iss. 1, pp. 159–167.
7. Structure and mechanical properties of Fe – Cr – B alloys at the transition from the amorphous state to the crystalline, Glezer A.M., Molotilov B.V., Ovcharov V.P., Utevsкая O.L., Chicherin Yu.E. In: Fizika metallov i metallovedenie [Physics of metals and metallography]. 1987, vol. 64, iss. 6, pp. 1106–1109.
8. Rusakov V.S. Restoration of distribution functions of hyperfine parameters of Mossbauer spectra of locally inhomogeneous systems. In: Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya [News of Russian Academy of Sciences. Series physical]. 1999, vol. 63, iss. 7, pp. 1389–1396.
9. Vertkheim G. Effekt Messbauera [Mossbauer Effect]. M., Mir, 1966. 172 p.
10. Kuz'min R.N., Vintaikin B.E. Messbauerovskaya spektroskopiya splavov [Mossbauer spectroscopy of alloys]. Moscow, Moscow University Publ., 1991. 96 p.
11. Vintaikin B. E. Fizika tverdogo tela: uchebnoe posobie [Solid state physics: textbook]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2008. 360 p.
12. Rusakov V.S. Messbauerovskaya spektroskopiya lokal'no neodnorodnykh sistem [Mossbauer spectroscopy of locally inhomogeneous systems]. Almaty, Institut of Nucleous physics Publ., 2000. 430 p.
13. Physical modeling of nanostructures in alloys with high damping capacity based on the Fe – Cr system, Vintaikin B.E., Belyakov N.A., Chudakoev I.B., Saidakhmetov P.A., Turmambekov T.A. In: Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii [Engineering journal: science and innovation]. 2015, iss. 4, pp. 1–12.
14. Magnetic and electronic structure of amorphous Fe – M – B alloys (M=V, Cr, Mn), Drozdova M.A., Batyrev I.G., Prokoshin A.F., Makhotkin V.E., Korytov V.V. In: Fizika tverdogo tela [Physics of the solid state]. 1986, vol. 28, iss. 8, pp. 2486–2491.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Терезанова Ксения Васильевна – магистрант кафедры физика Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана;
e-mail: kseniya-t94@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kseniya Terezanova – postgraduate student of the Department of Technical Physics at the Bauman Moscow State Technical University;
e-mail: kseniya-t94@yandex.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Терезанова К. В. Определение температуры Кюри для ферромагнитного сплава с содержанием Fe-B-Cr // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2017. № 1. С. 73–80.
DOI: 10.18384/2310-7251-2017-1-73-80.

THE CORRECT REFERENCE TO ARTICLE

K. Terezanova. Determination of the Curie temperature for the ferromagnetic Fe – B – Cr alloy. In: *Bulletin of Moscow Region State University*. Series: Physics and Mathematics, 2017, no. 1, pp. 73–80.
DOI: 10.18384/2310-7251-2017-1-73-80.