

фотонные же переходы при $s > 1$ будут происходить с вероятностью, пропорциональной $\alpha = eb/mc^2$. Заметим, что этот же параметр α является характерным для нелинейных процессов со свободным электроном в поле электромагнитной волны [9—12].

Из (11) получим, что при малых α и $|\mu|$ вероятность $w_{0 \rightarrow 1}$ пропорциональна s -ной степени интенсивности $I = cE^2/4\pi$ падающего излучения.

Автор глубоко благодарен проф. А. А. Соколову за интерес и внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Button K. J., Lax B., Weiler M. H., Reine M. Phys. Rev. Lett., 17, 1005, 1966.
2. Келдыш Л. В. ЖЭТФ, 47, 1945, 1964.
3. Braunstein R. Phys. Rev., 125, 475, 1962.
4. Жуковский В. Ч., Соколов А. А. Письма ЖЭТФ, 6, вып. 9, 1967.
5. Намштага Е., Lax B., Shin E. Phys. Rev. Lett., 17, 923, 1966.
6. Смирнов Ю. Н., Франк-Каменецкий Д. А. ЖЭТФ, 53, 1053, 1967.
7. Соколов А. А. Введение в квантовую электродинамику. М., Физматгиз, 1958.
8. Carruthers P., Nieto. M. Amer. J. Phys., 33, 537, 1965.
9. Brown L. S., Kibble T. W. B. Phys. Rev., 133, A 705, 1964.
10. Goldman I. I. Phys. Lett., 8, 103, 1964.
11. Никишов А. И., Ритус В. Н. ЖЭТФ, 46, 776, 1964.
12. Тернов И. М., Хапаев А. М., Клименко Ю. И. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., astron., № 1, 35, 1967.

Поступила в редакцию
28.12 1967 г.

Кафедра
теоретической физики

УДК 669.292 : 621.318.1

А. В. ПЕЧЕННИКОВ, В. И. ЧЕЧЕРНИКОВ, Т. С. ДУБИНКО

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА СУЛЬФИДА ЖЕЛЕЗА $\text{Fe}_{13}\text{S}_{14}$

В данной работе излагаются результаты исследования температурной зависимости магнитной восприимчивости монокристалла сульфида железа, в котором, как известно, существует анти- и ферромагнитная структура. До настоящего времени, как правило, исследование магнитных свойств сульфида железа проводилось на поликристаллических образцах [1, 2]. Между тем только при изучении монокристаллов можно получить наиболее ценную информацию о магнитной структуре в этом материале. К сожалению, существуют лишь отдельные работы, посвященные изучению магнитных свойств монокристаллов сульфида железа. Так, Вейссом [3] и затем Кайя и Мияхара [4] исследовалась анизотропия магнитных свойств природного сульфида железа (пирротина) при комнатной температуре. Потэнэ [5] изучал температурную зависимость восприимчивости пирротина, примерно того же химического состава, что и у предыдущих авторов, в интервале от -230°C до комнатной. В указанных работах авторы имели дело с ферромагнетиками. Между тем изучение анизотропии магнитных свойств антиферромагнитного сульфида железа также представляет интерес.

Сульфид железа является твердым раствором вычитания [6]. В его элементарной ячейке присутствует переменное число атомов железа (от 1,6 до 2) при постоянном числе атомов серы, равном 2. Большинство составов сульфида железа при комнатной температуре имеет гексагональную структуру типа арсенида никеля [7]. Ионы железа располагаются в гексагональных слоях, перпендикулярных оси c . Предполагается, что между катионами соседних слоев устанавливается антиферромагнитное взаимодействие, при этом можно рассматривать две подрешетки, образованные четными или нечетными слоями. Соединения эквивалентные или близкие по составу подрешеток проявляют антиферромагнитные свойства. Соединения со значительным дефицитом железа обнаруживают ферромагнетизм. Рентгеновский анализ природного монокристалла ферримагнитного сульфида железа показал, что распределение вакантных мест ионов железа упорядочено, причем в структуре происходит чередование слоев без вакансий и слоев с вакансиями. Поэтому число ионов железа в соседних слоях различно, что и приводит к возникновению ферримагнетизма [8]. Ферримагнитный

сульфид железа характеризуется трехосной магнитной анизотропией [3]. Направление трудного намагничивания совпадает с направлением гексагональной оси, а направление легкого намагничивания лежит в плоскости пинакоида. В самой пинакоидальной плоскости также обнаруживались три направления легкого намагничивания ($11\bar{2}0$), ($\bar{1}210$), (2110) [4].

В нашем исследовании использовались искусственные монокристаллы сульфида железа, получение которых осуществлялось из раствора методом температурного переплава. Метод описан в [9]. В качестве рабочего вещества использовался 8%-ный раствор NH_4Cl , шихты служили кристаллические железо и сера (реактивы) в количестве $\text{Fe}=20,94 \text{ г}$ и $\text{S}=12,59 \text{ г}$. Кристаллизация проходила при температуре 550°C и давлении 900 атм .

Искусственные кристаллы имели вид блестящих тонких пластинок толщиной $0,3\text{--}0,5 \text{ мм}$, диаметром до 4 мм . Рентгеновский анализ полученного сульфида железа показал, что монокристаллы обладают гексагональной структурой, родственной структуре арсенида никеля. Гексагональная ось перпендикулярна плоскости пластинки. Характеристики наиболее интенсивных линий приведены в таблице.

№	$\sin \alpha$	h_{ki}
1	0,3214	1010
2	0,3624	1011
3	0,4670	1012
4	0,5592	1120
5	0,873	1124
6	0,920	1232

Камера РКД—57,3, Fe — антикатод.

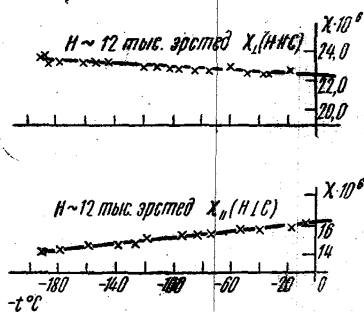


Рис. 1. Температурная зависимость $\chi_{\perp}$ и $\chi_{\parallel}$ при нагревании от температуры жидкого азота до комнатной температуры

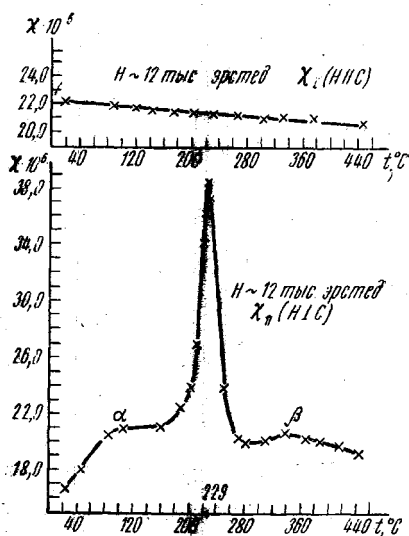


Рис. 2. Температурная зависимость $\chi_{\perp}$ и $\chi_{\parallel}$ при нагревании выше комнатной температуры

Измерение удельной магнитной восприимчивости по главным направлениям проводилось нами с помощью маятниковых весов, описанных в работе [10]. Ввиду того что масса отдельного монокристалла незначительна, образцы для измерения восприимчивости готовились из нескольких кристаллов [3—4], повернутых относительно друг друга вокруг оси c так, чтобы анизотропию магнитных свойств в гексагональной плоскости образца в целом можно было бы не учитывать, и сделанных по гексагональной плоскости клеем ВФ. Качество приготовленного образца снова проверялось рентгеновским методом.

Результаты измерений приведены на рис. 1 и 2. Мы видим, что в интервале от -193°C до комнатной температуры $\chi_{\perp}$ и $\chi_{\parallel}$ мало изменяются с изменением температуры ($\chi_{\perp}$ — незначительно убывает, $\chi_{\parallel}$ — растет). Выше комнатной температуры $\chi_{\perp}$ продолжает монотонно убывать, тогда как $\chi_{\parallel}$ обнаруживает довольно сложную температурную зависимость, характер которой хорошо согласуется с данными, полученными Гаральдсеном на поликристаллических образцах [1], и объясняется сложным строением кристаллической решетки сульфида железа. На рис. 2 можно выделить три максимума: α — в интервале температур $80\text{--}120^\circ\text{C}$, γ — при 220°C и β — око-

до 340°C. Как было показано в работах Гаральдсена, α -превращение связано со структурными изменениями кристаллической решетки. Для сульфидов железа с большим дефицитом железа α -превращение связано также с изменением направления оси легкого намагничивания. Ниже температуры α -превращения ось легкого намагничивания в кристалле совпадает с осью c , а выше T_α — ось легкого намагничивания лежит в основной гексагональной плоскости.

В нашем случае, при переходе через температуру α -превращения ось легкого намагничивания сохраняет свое положение в пинакоидальной плоскости, что иллюстрирует рис. 2: зависимость $\chi_\perp(T)$ в точке α -превращения (100°C) изменяется монотонно и не имеет скачка.

β -превращение соответствует температуре Нееля для антиферромагнетиков (330—340°C) и сопровождается аномальным увеличением удельной теплоемкости и коэффициента расширения [2].

Самый большой максимум на кривой зависимости удельной восприимчивости соответствует так называемому γ -превращению (220°C). Оно наблюдается также и на поликристаллических образцах и дает довольно высокий максимум, увеличивающийся с ростом дефицита железа. Было установлено, что этот максимум связан с перераспределением вакансий в кристаллической решетке [11].

Проведенное исследование обнаружило резкую анизотропию магнитной восприимчивости монокристалла антиферромагнитного сульфида железа (состава 51,8 ат. % S). В направлении гексагональной оси кристалла восприимчивость монотонно убывает с ростом температуры, а в направлении, перпендикулярном оси c , обнаруживает сильную температурную зависимость, которая отражает как структурные изменения, так и перераспределение вакансий в кристаллической решетке.

Последнее обстоятельство лишней раз подтверждает предположение, что векторы намагниченности подрешеток лежат в основных гексагональных плоскостях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Haraldsen H. Z. Anorgan. und Allgem. Chem., B. 246, 1941.
2. Белов К. П. Магнитные превращения. М., Физматгиз, 1959.
3. Weiss, Forrer. Ann. of Phys., 12, 349, 1929.
4. Kaya S., Mijahara S. The Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., 27, Nr. 4, 1939.
5. Panthenet R. Compt. rend., 234, 2261, 1952.
6. Hugg G., Sucksdorff I. Zeit. Physik, Chem., 22, 444—452, 1933.
7. Елисеев Э. Н., Денисов А. П. «Вестн. Моск. ун-та», сер. мех., мат., астрон., физ., химии, № 2, 68—78, 1957.
8. Bertaut F. Acad. Sci., Paris, 234, 1298, 1952; J. Phys. Radium, 13, 3721, 1953; Acta Cryst., 6, 557, 1953.
9. Икорникова Н. Ю. «Геология рудных месторождений», № 5, 1962.
10. Иулиу Поп, Чечерников В. И. «Приборы и техника эксперимента», № 5, 180, 1964.
11. Lotgering F. K. Thesis, Univ. of Utrecht, 1956; Res. Rep., 11, 189, 1956.

Поступила в редакцию
3.1 1968 г.

Кафедра
магнетизма