

НГО ТУАН ЗУНГ

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Fe—Co СПЛАВОВ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Измерен магнитооптический эффект Керра Fe—Co сплавов в ближней инфракрасной области спектра (0,12—2 эв). Результаты обсуждены на основании представлений о расщеплении вырожденных d -уровней под действием внутрискристаллического поля.

Известно, что все теоретические работы по вычислению энергетического спектра электронов базируются на представлениях симметрии кристаллической решетки. Следовательно, изменение кристаллической решетки должно сопровождаться изменением энергетического спектра. Этого эффекта следует ожидать при фазовом переходе первого рода в металлах и сплавах. С другой стороны, в теории ферромагнетизма металлов и сплавов получение достаточно надежных данных об их энергетическом спектре является необходимым условием для правильного построения микроскопической модели. Поэтому экспериментальное исследование электронной структуры ферромагнитных металлов и сплавов с разными кристаллическими структурами представляет большой интерес и может использоваться для проверки правильности существующих теоретических моделей.

Для экспериментального исследования структуры энергетических полос в металлах и сплавах существуют два метода: рентгеновский и оптический. Последний включает в себя обычный оптический метод, метод фотоэлектронной эмиссии, магнитооптический метод, а также методы электроотражения, пьезоотражения и термоотражения. Магнитооптический метод применим для более узкого круга металлов и сплавов, именно для ферромагнитных металлов и сплавов. Однако он дает возможность непосредственно изучать электроны, вызывающие явление ферромагнетизма.

В настоящей работе анализируются магнитооптические спектры Fe—Co сплавов и влияние различных кристаллических структур на эти спектры.

Методика эксперимента и образцы

Известно [1], что Fe и Co образуют твердый раствор при всех концентрациях. Фазовая диаграмма этой системы сплавов при комнатной температуре состоит из области О.Ц.К. структуры (α -структуры) от

чистого Fe до 75% Co (здесь и в дальнейшем используются атомные проценты), области смеси двух фаз $\alpha + \gamma$ от 75 до 90% Co (γ : Г.Ц.К. структура), области γ -структуры приблизительно от 90 до 95% Co и области $\gamma + \epsilon$ структур (ϵ : гексагональная структура). Чистый Co [3] при комнатной температуре представляет собой смесь двух фаз γ и ϵ . Поэтому эта система сплавов очень подходит для изучения влияния кристаллической структуры на магнитооптический спектр.

Сплавы были выплавлены в вакууме с помощью индукционной печи. Чистота исходных материалов не ниже 99,98%. Слитки были откованы и прокатаны до толщины 2 мм. Из этих лент были отрезаны образцы с размерами 25×10 мм, затем отшлифованы до толщины 1 мм и механически полированы для получения зеркальной поверхности. Для части образцов проводилась дополнительно электролитическая полировка.

В качестве эффекта для изучения магнитооптических свойств был выбран экваториальный эффект Керра

$$\delta = (I - I_0)/I_0,$$

где I и I_0 — интенсивности отраженного линейно-поляризованного света (p -компонента) в намагниченном и размагниченном состояниях соответственно. Для измерения δ был использован так называемый динамический метод. Принципиальная схема и описание установки приведены в работах [2, 3].

Результаты измерений

Измерение $\delta(h\nu)$ производилось при угле падения света, равном 85° , в интервале энергии световых квантов 0,15—2 эв. Результаты приведены на рис. 1—3. Номера кривых соответствуют номерам сплавов,

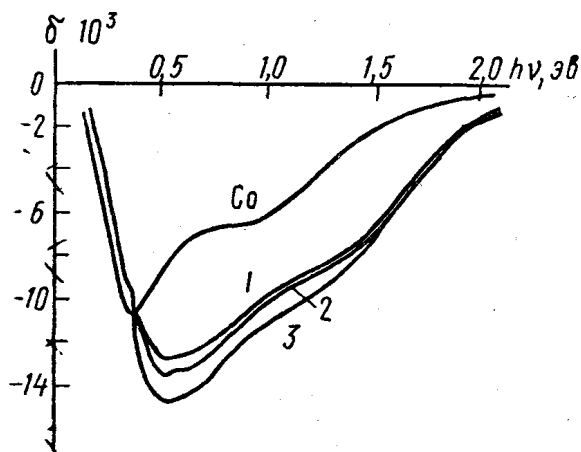


Рис. 1

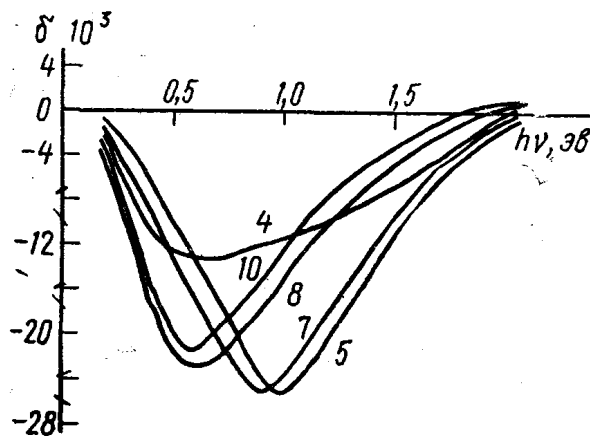


Рис. 2

составы которых даны в табл. 1. На рисунках не приведены кривые $\delta(h\nu)$ для сплавов № 6 и 9, так как они почти похожи на кривые $\delta(h\nu)$ для сплавов № 5 и 8.

Из рисунков следует, что на кривой $\delta(h\nu)$ для чистого Co, из которого были выплавлены сплавы, выявляется один максимум и одна ступенька. Энергии, соответствующие этим особенностям, совпадают с теми же значениями для Co, полученными раньше в работах [3, 4].

Аномалия в области $h\nu = 0,96$ эв для Co появляется также на сплавах № 1, 2, 3. Однако она смещается в область $h\nu = 1,4$ эв. Интенсивность аномалии уменьшается с увеличением концентрации Fe и на сплаве № 4 исчезает.

При переходе от Со к сплавам максимум кривой $\delta(h\nu)$ сильно размазан, а энергия, соответствующая максимуму, увеличивается. Значения всех резонансных частот, определенных как и в [3], т. е. частот, соответствующих относительным экстремумам и ступенькам на кривой $\delta(h\nu)$, даются в табл. 2.

В области концентрации 80—50% Со (сплавы № 5, 6, 7) максимум кривой $\delta(h\nu)$ (абсолютное значение) сильно увеличивается, затем уменьшается при приближении к Fe. Зависимость δ_{\max} от состава сплавов приведена на рис. 4.

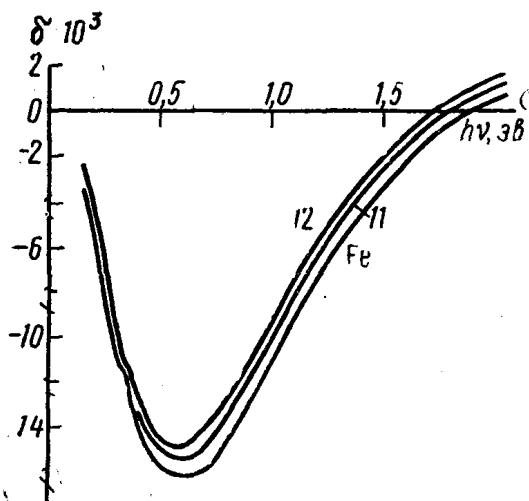


Рис. 3

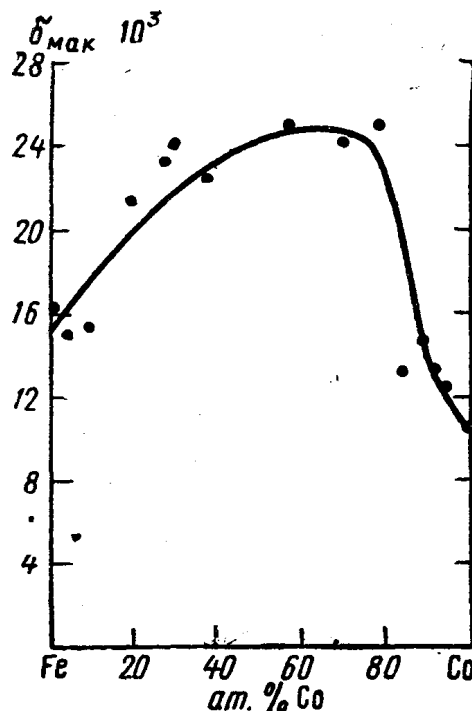


Рис. 4

В сплавах 1, 2, 3, 4 и 8, 9, 10, 11, 12, а также на Fe наблюдается старая аномалия в области $h\nu=0,35$ эв в виде ступеньки.

Электрополировка, как показывает опыт, почти не влияет на кривую $\delta(h\nu)$.

Обсуждение результатов

Для объяснения основных магнитных свойств $3d$ -металлов и их сплавов Воллан [5] рассмотрел расщепление под действием внутрикристаллического поля пятикратно вырожденных $3d$ -уровней на два уровня. Один из них трехкратно вырожденный, а другой двукратно, обозначаются они соответственно символами t_{2g} и e_g . При последовательном заполнении этих уровней $3d$ -электронами образуются «дырки» (незанятые состояния) на t -уровнях. Эти дырки открывают возможность для процессов перехода электрона типа $(t_{\uparrow} - \downarrow - t_{\uparrow})$, что означает резонансное размазывание электрона между двумя наполовину заполненными состояниями t -уровня соседних атомов. В предлагаемой теории возможны также переходы типа $(t_{\uparrow} - \downarrow - e_{\uparrow})$ и $(e_{\uparrow} - \downarrow - e_{\uparrow})$. Эти переходы обуславливают ферромагнитную связь и дробность атомного магнитного момента ферромагнетиков.

Причиной образования дырок на t -уровнях является, по предположению Воллана, переход электронов с этих уровней на $4s$ -уровни, т. е. в зону проводимости, где их спины компенсируются. Поэтому образование дырок на t -уровнях не только открывает возможность для процессов перехода электрона вышеуказанных типов, но и создает возможности для оптических переходов между $3d$ и $4s$ -уровнями. Схема таких переходов изображена на рис. 5. По Воллану все дырки находятся на

t -уровнях, следовательно, оптический переход ($t \rightarrow 4s$) будет основной, а переходы типа ($t \rightarrow e$) и ($e \rightarrow 4s$) должны быть менее вероятными.

Естественно предположить, что магнитооптические резонансы в ближней инфракрасной области спектра вызываются этими оптическими переходами. Экспериментальные результаты (см. табл. 2) показывают, что чистые ферромагнитные металлы (Fe, Co, Ni) имеют одну основную

Таблица 1

Составы исследуемых сплавов
(приводятся от % Co)

№ сплава	Состав
1	94,5
2	92
3	89
4	84
5	78
6	70
7	57,5
8	37,5
9	27,5
10	18,9
11	9
12	3,5

Таблица 2

Значения резонансных частот, эв

№ сплава	Сильный резонанс	Слабый резонанс
1	0,54	1,4 и 0,35
2	0,54	1,4 и 0,35
3	0,54	1,4 и 0,35
4	0,7	0,35
5	1,0	—
6	0,96	—
7	0,9	—
8	0,6	0,35
9	0,55	0,35
10	0,55	0,35
11	0,55	0,35
12	0,55	0,35
13	0,55	0,35

резонансную частоту. Для Fe, которое имеет α -структуру, согласно нашему предположению за основной резонанс ($h\nu_0 = 0,55$ эв) отвечает переход типа ($t \rightarrow 4s$), а слабый резонанс железа в области 0,35 эв вызывается переходом ($t \rightarrow e$).

Для Ni обнаружена только одна резонансная частота $h\nu_0 = 0,96$ эв. Причина этого, по-видимому, заключается в том, что e -уровни в Ni полностью заполнены согласно схеме заполнения t и e -уровней работы [5]. Поэтому не происходят и переходы типа ($t \rightarrow e$) и ($e \rightarrow 4s$).

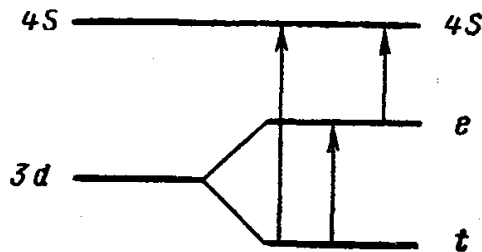


Рис. 5

Для Co дело происходит более сложно, так как при комнатной температуре в нем вместе с гексагональной фазой существует некоторая часть в γ -структуре. В работе [3] было показано, что слабый резонанс Co в районе 0,96 эв связан с Co

в γ -структуре. Согласно с предложенной схемой переходов этот резонанс можно связать с переходом ($t \rightarrow 4s$). Ni и Co находятся рядом в периодической таблице Менделеева, их кристаллические γ -структуры почти идентичны. Более того, число дырок на t -уровне в них близко (0,6 для Ni и 0,7 для Co). Поэтому, как показал опыт, резонансные частоты для них в γ -структуре одинаковы.

Основной резонанс в Co пока нельзя связать с каким-нибудь конкретным переходом. Возможно, что этот резонанс также вызывается каким-то пока неизвестным переходом между $3d$ - и $4s$ -уровнями кобальта в гексагональной структуре.

Рассмотрим магнитооптические свойства сплавов системы Fe—Co. Как было отмечено выше, при переходе от Co к сплавам оба резонансных перехода остаются. Согласно изложенной схеме интерпретации это объясняется тем, что в сплавах с концентрацией Co между 100 и 90% $3d$ -уровни атомов Co остаются расщепленными на t - и e -уровни. Сме-

щение обеих резонансных частот в сторону больших значений, возможно, вызвано изменением кристаллического поля, происходящим под действием атомов Fe. При дальнейшем увеличении концентрации Fe исчезает фаза с γ -структурой. Следовательно, должен исчезать резонанс, соответствующий этой фазе. Это действительно наблюдается на опыте: на сплаве № 4 резонанс в области 1,4 эв не появляется.

Однако эта схема интерпретации пока не дает ответа на вопрос: почему в сплавах Fe — Co с γ -структурой (сплавы № 1, 2, 3) резонанс в области 0,5—0,6 эв преобладает над основным резонансом в области 1,4 эв. Отметим, что в сплавах системы Ni — Co [3] дело обстоит гораздо лучше. В этой системе сплавов при переходе к γ -структуре резонанс, соответствующий переходу ($t \rightarrow 4s$), сразу становится преобладающим.

Рассмотрим область 80—50% Co (сплавы № 5, 6, 7). Кривые $\delta(h\nu)$ для этих сплавов имеют единственный резкий максимум в районе 0,8—1,0 эв. В литературе [1] имеются данные о том, что в этой области концентрации Co существует упорядоченная структура типа Fe — Co. Характер резонанса этих сплавов, сильно отличающийся от характера других сплавов, а также от Co и Fe, по-видимому, вызывается влиянием частичного упорядочения. Однако измерение на закаленных образцах с температуры 900°C до охлаждения в воде не обнаруживает никакого изменения на дисперсионной кривой $\delta(h\nu)$ этих сплавов. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

В области 38% Co ÷ Fe характер кривой $\delta(h\nu)$ для сплавов совершенно похож на характер кривой $\delta(h\nu)$ для чистого Fe. Полученные резонансы на этих сплавах также могут быть объяснены с помощью переходов ($t \rightarrow 4s$) и ($t \rightarrow e$) в α -структуре, как в случае Fe.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М., ИЛ, 1956.
2. Кринчик Г. С., Нурмухамедов Г. М. ЖЭТФ, 48, 34, 1965.
3. Нго Туан Зунг. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., 11, 57, 1970.
4. Кринчик Г. С., Артемьев Б. А. ЖЭТФ, 53, 1901, 1967.
5. Wollan E. O. Phys. Rev., 117, 387, 1960. Перевод в сб.: «Теория ферромагнетизма металлов и сплавов». М., ИЛ, 1963.

Поступила в редакцию
17.10 1969 г.

Кафедра
магнетизма