

В. И. ЧЕЧЕРНИКОВ

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ НИКЕЛЬ-МАГНИЕВЫХ И НИКЕЛЬ-МАРГАНЦЕВЫХ ФЕРРИТОВ

В работах [1, 2] было показано, что парамагнитная восприимчивость смешанных никель-цинковых ферритов, как и простых ферритов, в широком температурном интервале следует закону Нееля [3]:

$$\frac{1}{\chi} = \frac{1}{\chi_0} + \frac{T}{C} - \frac{\sigma}{T-\theta} \quad (1)$$

Коэффициенты  $\sigma$ ,  $1/\chi_0$  и  $\theta$ , входящие в формулу (1), зависят, согласно теории Нееля, от констант молекулярного поля, характеризующих обменное взаимодействие между различными подрешетками ( $AB$ ) и внутри этих подрешеток ( $AA$  и  $BB$ ). Кроме того, эти коэффициенты зависят от числа магнитоактивных ионов железа ( $\lambda$  и  $\mu$ ), расположенных в подрешетках  $A$  и  $B$ . Что касается константы  $C$ , то она является атомной константой для магнитоактивных ионов  $F^{3+}$  и характеризует, очевидно, величину магнитного момента.

Исследование никель-цинковых ферритов дало возможность установить определенные закономерности для констант  $C$ ,  $\sigma$ ,  $1/\chi_0$  и  $\theta$ , что имеет большое значение для развития теории ферритов и, в частности, для развития теории парамагнетизма ферромагнитных соединений.

В настоящей работе нами изучены никель-магниевые и никель-марганцевые ферриты, имеющие формулу:  $Fe_2O_3NiO_{1-z}MO_z$ , где  $M$  — двухвалентный металл, марганец или магний, в широком температурном интервале от ферромагнитной точки Кюри  $\theta_f$  до  $\sim 1500^\circ K$ .

Из системы никель-марганцевых ферритов нами изучены пять образцов, соответствующих следующим значениям  $z$ : 0, 0,2, 0,4, 0,6 и 1, а из системы никель-магниевого ферритов шесть образцов со значениями  $z$ : 0, 0,2, 0,3, 0,5, 0,75 и 1.

Исследование температурной зависимости парамагнитной восприимчивости проводилось на установке, в основу устройства которой положен метод Фарадея — Сёксмита. Образцы имели форму шара диаметром 1,5—2 мм. Из феррита одного состава обычно изготовлялось несколько образцов, которые затем изучались в широком температур-

ном интервале. Это позволило проверить однородность образцов по составу. Дополнительно парамагнитная восприимчивость измерялась при нагревании и охлаждении образцов. Полученные результаты прак-

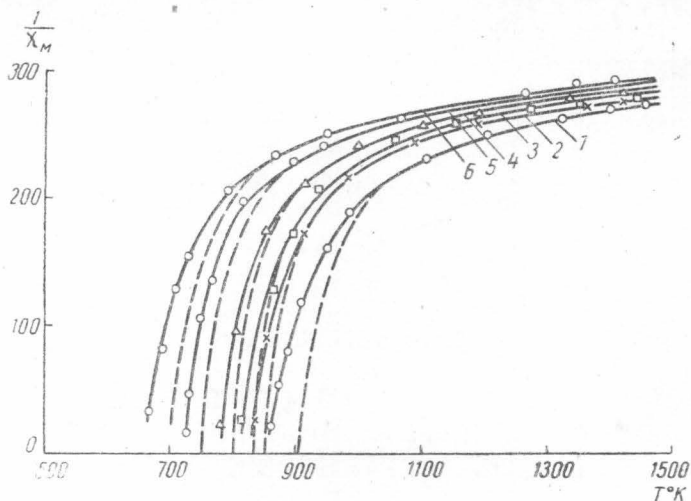


Рис. 1. Зависимость обратной величины парамагнитной восприимчивости  $1/\chi$  от температуры ( $T$ ) для ферритов: 1— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{NiO}$ , 2— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 0,8\text{NiO}\cdot 2\text{MgO}$ , 3— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 0,7\text{NiO}\cdot 0,3\text{MgO}$ , 4— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 0,5\text{NiO}$ , 0,5 MgO, 5— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 0,25\text{NiO}\cdot 0,75\text{MgO}$ , 6— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{MgO}$

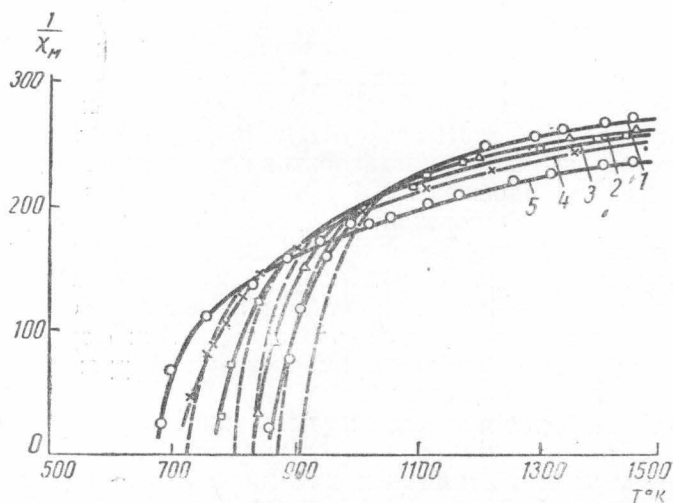


Рис. 2. Зависимость обратной величины парамагнитной восприимчивости  $1/\chi$  от температуры ( $T$ ) для ферритов: 1— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{NiO}$ , 2— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 0,8\text{NiO}\cdot 0,2\text{MnO}$ , 3— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 0,6\text{NiO}\cdot 0,4\text{MnO}$ , 4— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 0,4\text{NiO}\cdot 0,6\text{MnO}$ , 5— $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{MnO}$

тически совпали, что свидетельствует об отсутствии в образцах каких-либо фазовых превращений в данном интервале температур.

На рис. 1 и 2 показана температурная зависимость обратной величины молярной восприимчивости по данным наших измерений для всех исследованных нами ферритов в температурном интервале от

650 до  $\sim 1500^\circ\text{K}$ . Для определения констант, которые входят в формулу (1) и в основном определяют ход температурной зависимости парамагнитной восприимчивости ферритов, мы применили метод последовательных приближений, предложенный Неелем [3]. Этот метод был нами использован и подробно описан ранее [2, 4]. На рис. 3 и 4 показана зависимость констант  $C$ ,  $\sigma$ ,  $1/\chi_0$  и  $\theta$  от процентного содержания  $\text{MgO}$  и  $\text{MnO}$  в феррите. Нетрудно видеть, что эти константы для никель-марганцевых ферритов уменьшаются с увеличением содержания  $\text{MnO}$ . Для никель-магниевого феррита это уменьшение менее заметно, причем константа  $1/\chi_0$  даже несколько увеличивается с увеличением

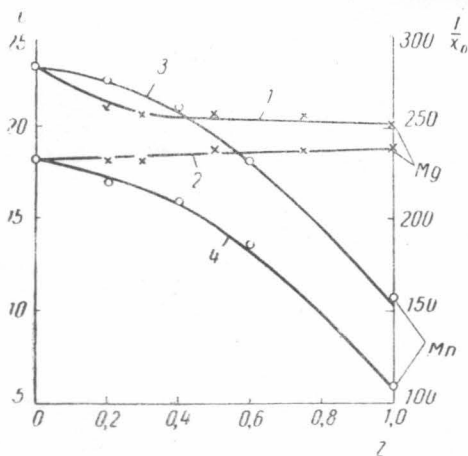


Рис. 3. Зависимость констант  $C$  и  $1/\chi_0$  от содержания  $\text{MgO}$  и  $\text{MnO}$  в феррите: 1— $C$  и 2— $1/\chi_0$  для  $\text{MgO}$ , 3— $C$  и 4— $1/\chi_0$  для  $\text{MnO}$

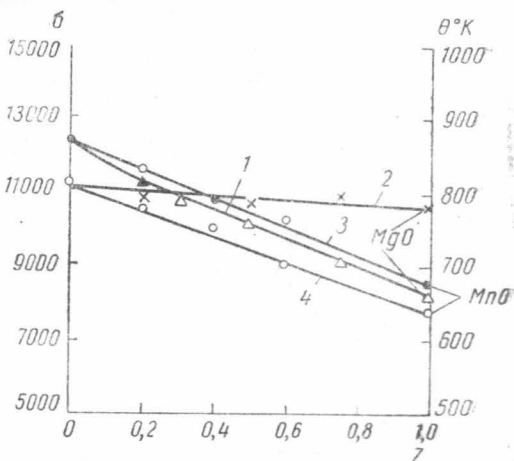


Рис. 4. Зависимость констант  $\theta$  и  $\sigma$  от содержания  $\text{MgO}$  и  $\text{MnO}$  в феррите: 1— $\theta$  и 2— $\sigma$  для  $\text{MgO}$ , 3— $\theta$  и 4— $\sigma$  для  $\text{MnO}$

содержания  $\text{MgO}$  в феррите. Уменьшение константы  $C$ , которая, очевидно, должна характеризовать величину парамагнитного момента, обусловлено, по-видимому, тем, что атомы марганца и магния, отдавая электроны, уменьшают нескомпенсированные спины электронов ионов никеля или железа. Изменение параметра  $1/\chi_0$  связано в основном с изменением константы  $n$  молекулярного поля, характеризующего обменное взаимодействие между подрешетками  $A$  и  $B$ . Спадающий характер зависимости  $\sigma$  от  $z$  можно попытаться объяснить, если предположить, что константа  $n$  уменьшается с увеличением количества ионов магния и марганца. Что касается константы  $\theta$ , то ее уменьшение с увеличением  $z$  объясняется, очевидно, главным образом уменьшением констант  $n$  и  $C$  и обменного взаимодействия ионов, расположенных в различных подрешетках.

Используя полученные значения констант  $C$ ,  $\sigma$ ,  $1/\chi_0$  и  $\theta$ , мы построили теоретические кривые, которые на рис. 1 и 2 нанесены пунктиром. Можно видеть, что в области высоких температур эти кривые практически совпадают с ходом экспериментальных кривых.

Отметим, что закон Нееля оправдывается для всех ферритов в широком интервале температур примерно от  $850$  до  $1500^\circ\text{K}$ . При этом, при температурах, близких к ферромагнитной точке Кюри, теоретическая и экспериментальная кривые не совпадают, что наиболее ярко выражено вблизи  $\theta_f$ . Аналогичные закономерности наблюдаются на

простых ферритах [4, 5] и на смешанных никель-цинковых ферритах [2]. Эти отступления обусловлены, очевидно, неоднородностью образцов по составу. Таким образом, закон Нееля выполняется не только на простых ферритах, но и на ряде смешанных ферритов.

В дальнейшем представляет интерес исследовать эти ферриты при температурах, лежащих в непосредственной близости к ферромагнитной точке Кюри с целью изучения переходной области при ферромагнитном превращении.

Пользуюсь случаем выразить Д. И. Волкову признательность за ряд ценных замечаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Neel L., Broset P. C. r., 230, 280, 1950.
2. Чечерников В. И., Волков Ю. Д. ЖЭТФ, 4 (10), 875, 1958.
3. Neel L. App. Phys., 10, 3, 137, 1948.
4. Волков Д. И., Чечерников В. И. НДВШ, сер. физ. наук, 2, 1958.
5. Fallot M., Maroni P. J. Phys. rad., 12, 256, 1951.

Поступила в редакцию  
29.12 1958 г.

Кафедра магнетизма