

А. Н. ГОРЯГА, Л. И. КОРОЛЕВА

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НИКЕЛЬ-ЦИНКОВОГО ФЕРРИТА

Механизм проводимости ферромагнитных полупроводников типа ферритов еще недостаточно изучен. Для того чтобы понять его, необходимо детальное исследование электрических и гальваномагнитных свойств различных ферритов в зависимости от их физического состояния. Соответствующие данные в настоящее время еще очень скудны. Наряду с ферритами, обладающими весьма высоким удельным электросопротивлением, существуют и ферриты, имеющие сравнительно небольшие сопротивления. К последним относятся магнетит, марганцевые ферриты стехиометрического состава, а также некоторые никель-цинковые ферриты. Согласно Вервею [1], причиной этого является наличие в феррите наряду с трехвалентными двухвалентных или четырехвалентных ионов металла в идентичных кристаллографических положениях.

В данной работе мы поставили своей задачей изучить электрические и гальваномагнитные свойства никель-цинкового феррита, который интересен тем, что, согласно литературным данным, обладает максимальной магнитной и диэлектрической проницаемостями.

Образец феррита состава 14,5% NiO, 36% ZnO, 49,5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в мол. %) был получен по обычной керамической технологии при температуре спекания 1320°, с выдержкой 5 час. и последующим охлаждением с печью.

Контакты на образец наносились путем вжигания серебряной пасты при температуре 500°. В работе [3] указывалось, что при таком способе нанесения контактов возможна диффузия серебра в феррит, вследствие чего могут исказиться результаты измерений. Чтобы выяснить этот вопрос, мы нанесли контакты на изучаемый феррит тремя способами: катодным напылением, натиранием графитом и вжиганием серебряной пасты. Оказалось, что при измерении электросопротивления при этих трех способах нанесения контактов расхождения результатов не превышают 20 ом при общем сопротивлении 1430 ом, то есть составляют всего 1,4%. Таким образом, вжигание серебряной пасты существенно не искажает результаты измерений электрического сопротивления феррита.

Так как образец имел форму куба с ребром в 1 см, на нем можно было сразу получить значение удельного сопротивления  $\rho$ . Гальваномагнитный эффект  $\Delta\rho/\rho$  измерялся на неуравновешенном мосте путем сравнения с эталонным сопротивлением. Было найдено, что электро-сопротивление феррита существенно зависит от силы тока, который протекает по образцу (рис. 1). Поэтому все температурные измерения  $\rho$  и  $\Delta\rho/\rho$  проводились при одной и той же силе тока через образец (3 ма).

Намагниченность никель-цинкового феррита исследовалась при различных температурах пондеромоторным методом. Исследование магнитных и гальваномагнитных свойств проводилось в электромагните. Температурные измерения от комнатной температуры до 500°

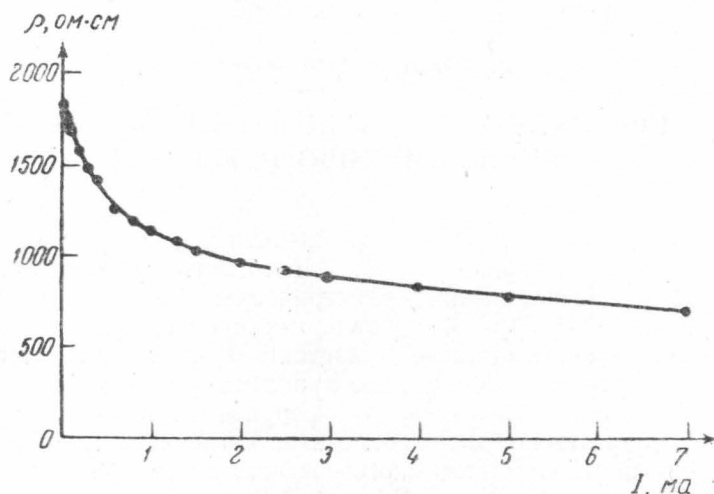


Рис. 1. Зависимость электро-сопротивления от силы тока в образце

проводились в бифилярно намотанной электропечи. Ввиду того что гальваномагнитные и магнитные свойства вблизи точки Кюри резко изменяются с температурой, были приняты меры для обеспечения поддержания однородности температуры по длине образца и постоянства температуры в процессе измерений. Колебания температуры в процессе измерений не превышали  $\pm 0,1^\circ$ . Такое постоянство температуры обеспечивалось хорошей стабилизацией напряжения в обмотке печи. Температура измерялась термопарой медь — константан, включенной в схему высокоомного потенциометра типа ППТВ-1. Гальваномагнитный эффект измерялся с точностью до 5%.

Перед измерением электрических и гальваномагнитных свойств были проведены опыты по определению знака термо-э. д. с. в феррите (относительно меди). Было найдено, что исследуемый образец имеет отрицательный знак термо-э. д. с., то есть он обладает электронной проводимостью.

Удельное сопротивление было изучено в интервале от комнатной температуры до 500°. На рис. 2 и 3 представлена зависимость  $\lg \rho = f(1/T)$ . На рис. 3 видно, что кривая состоит из четырех прямолинейных участков (имеет три точки перегиба). Первая точка перегиба соответствует температуре Кюри 80,5° (рис. 2 и 3). Полученный нами результат находится в согласии с экспериментальной работой А. П. Ко-

мара и В. В. Ключина [2], которые при изучении электросопротивления никелевых, никель-цинковых и других ферритов нашли, что для всех образцов зависимость  $\lg \rho = f(1/T)$  имеет излом в точке Кюри. П. П. Ирхин и Е. А. Туров [4], пользуясь многоэлектронной моделью, теоретически рассчитали, что наклон прямой  $\ln \rho = f(1/T)$  при переходе через точку Кюри возрастает. Как видно из рис. 2, полученный нами результат подтверждает выводы квантовомеханической теории Ирхина и Тулова.

Природа двух других изломов неясна. Из значений углов наклона кривой  $\lg \rho = f(1/T)$  была рассчитана энергия активации:  $E_1 = 0,17$  эв,

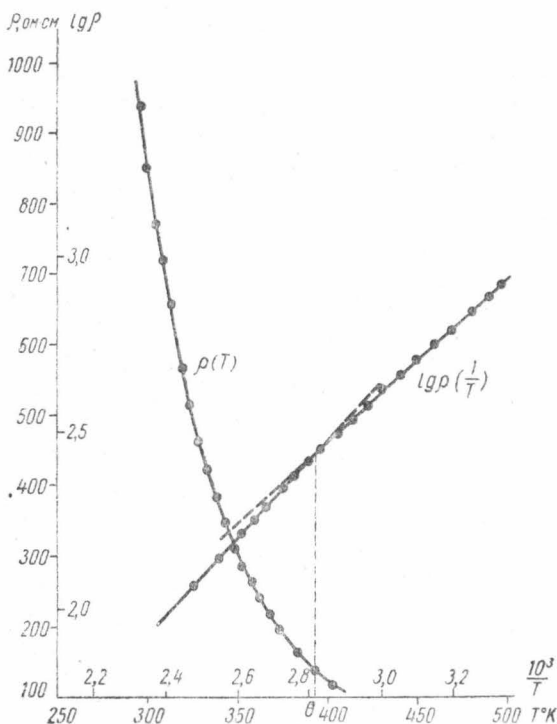


Рис. 2. Зависимость электросопротивления никель-цинкового феррита от температуры

$E_2 = 0,25$  эв,  $E_3 = 0,31$  эв и  $E_4 = 0,23$  эв (где  $E_1, E_2, E_3, E_4$  — энергии активации в порядке возрастания температуры). Следовательно, из приведенных результатов можно сделать вывод, что электросопротивление никель-цинкового феррита носит более сложный характер, чем в обычных полупроводниках.

Измерения при комнатной температуре показали, что поперечный и продольный гальваномагнитный эффекты изучаемого феррита имеют один и тот же отрицательный знак и примерно одинаковые величины. Такое поведение гальваномагнитного эффекта связано с тем, что в нашем случае никель-цинковый феррит имел низкую температуру Кюри, и, следовательно, как при комнатной температуре, так и выше ее,  $\Delta \rho/\rho$  был обусловлен почти исключительно парапроцессом (истинным намагничиванием).

На рис. 4 приведены изотермы продольного эффекта, а на рис. 5 представлена зависимость этого эффекта от температуры (при различ-

ных полях). Для всех полей в интервале температур 60—65° гальваномагнитный эффект имеет максимум, который, однако, сильно размыт, что, вероятно, обуславливается неоднородностью состава образца феррита по объему.

Наш результат находится в согласии с работой К. П. Белова и Е. В. Талалаевой [5] по исследованию температурной зависимости гальваномагнитного эффекта на поли- и монокристаллических образцах марганцевых ферритов. Они нашли, что гальваномагнитный эффект в области температуры Кюри имеет максимум.

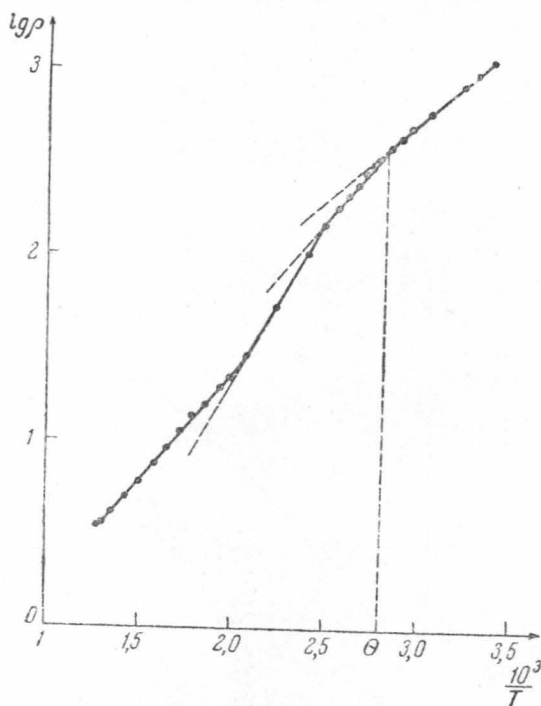


Рис. 3. Зависимость логарифма электросопротивления никель-цинкового феррита от  $(1/T)$  в интервале температур от комнатной до 500°С

Представляло интерес изучить зависимость гальваномагнитного эффекта от намагниченности  $\sigma$ . С этой целью мы измерили намагниченность никель-цинкового феррита при тех же температурах, что и гальваномагнитный эффект. Из рис. 6 (а, б) видно, что для данного феррита, так же как для ферромагнитных металлов и сплавов, эта зависимость носит линейный характер и описывается соотношением:

$$-\frac{\Delta\rho}{\rho} = C(\sigma^2 - \sigma_s^2),$$

где  $\sigma_s$  — самопроизвольная намагниченность.

Пользуясь этим соотношением и кривыми рис. 6, мы можем определить температурный ход самопроизвольной намагниченности путем экстраполяции прямых  $\Delta\rho/\rho \cdot (\sigma^2)$  на ось абсцисс. Результаты такого определения представлены на рис. 7 (кривая 2). Там же дана кривая  $\sigma_s(t)$  (кривая 1), определенная по методу «термодинамических коэффициентов» [6]. Видно, что в начале оба метода дают приблизительно

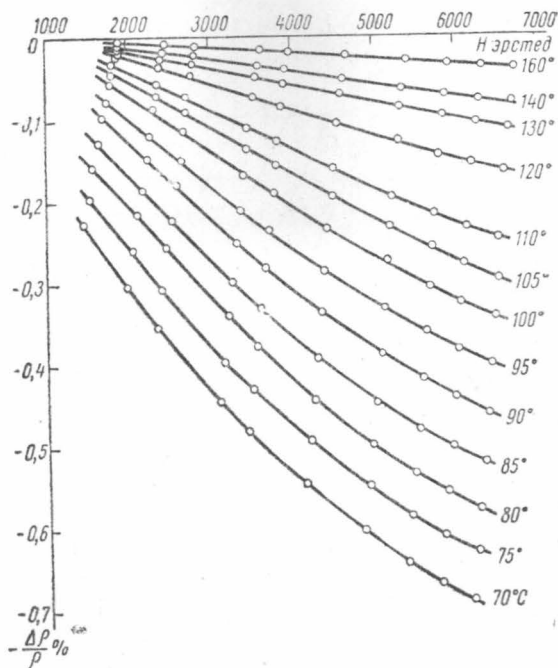


Рис. 4. Изотермы продольного гальваномагнитного эффекта никель-цинкового феррита

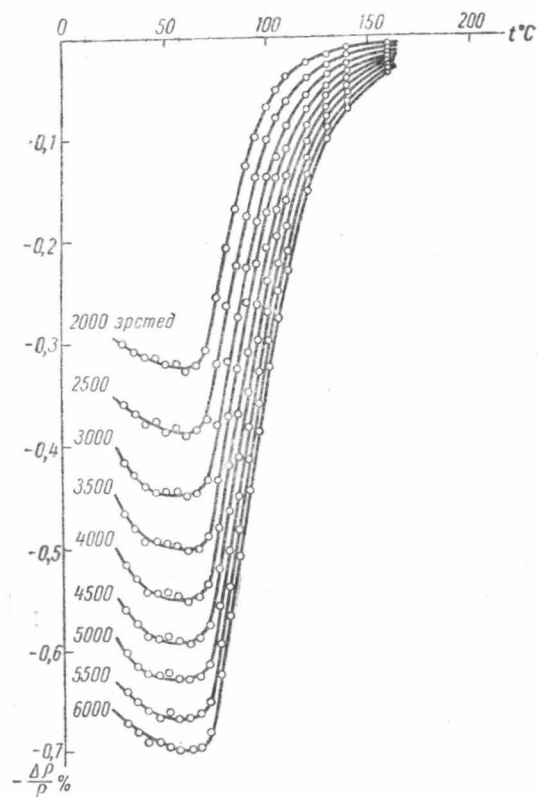
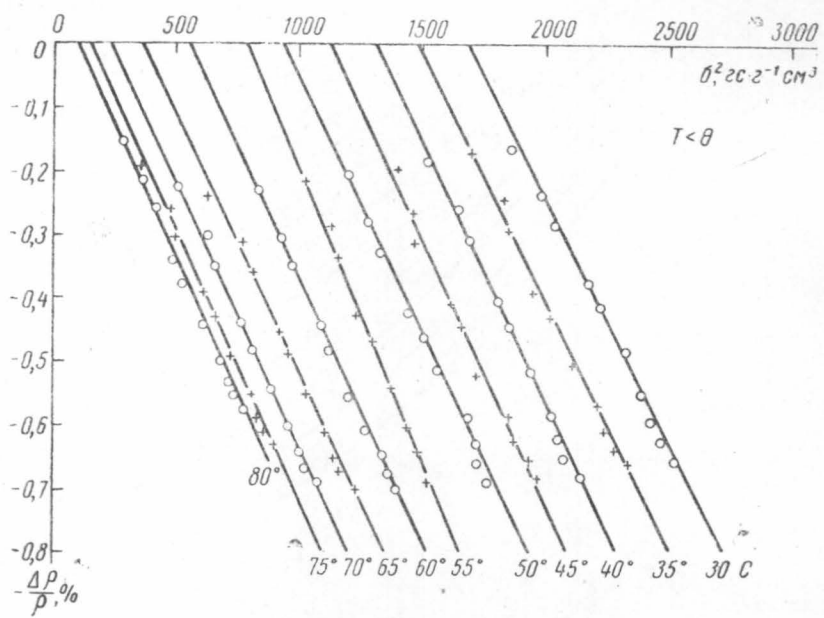
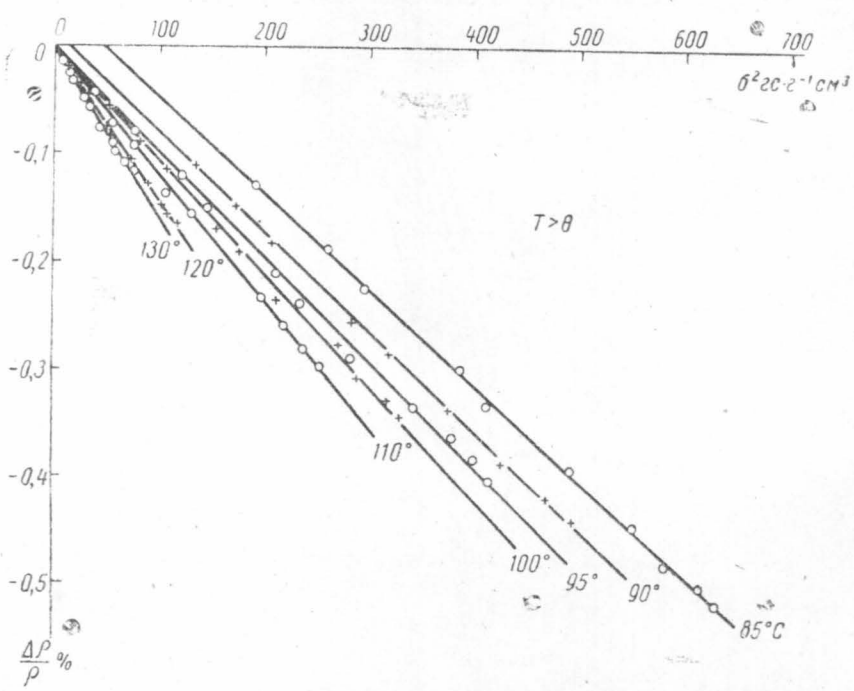


Рис. 5. Температурная зависимость гальваномагнитного эффекта никель-цинкового феррита (при различных полях)



a



b

Рис. 6. Зависимость гальваномагнитного эффекта никель-цинкового феррита от квадрата намагниченности

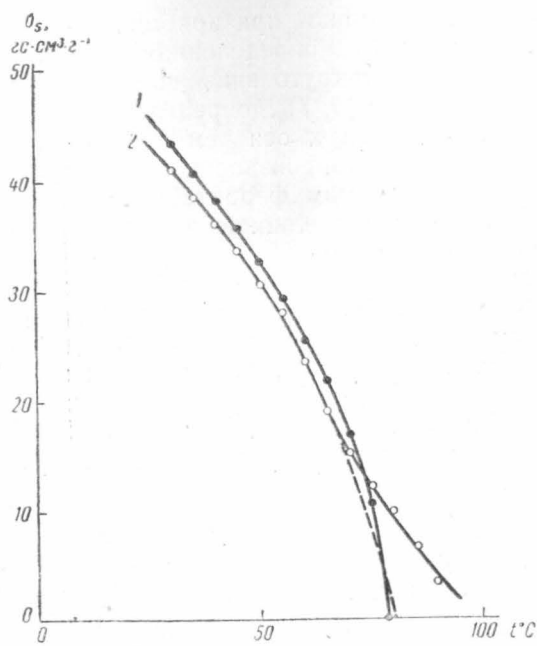


Рис. 7. Температурный ход самопроизвольной намагниченности, определенный: 1 — по методу «термодинамических коэффициентов», 2 — путем экстраполяции прямых  $\Delta\rho/\rho; (\sigma^2)$  на ось абсцисс

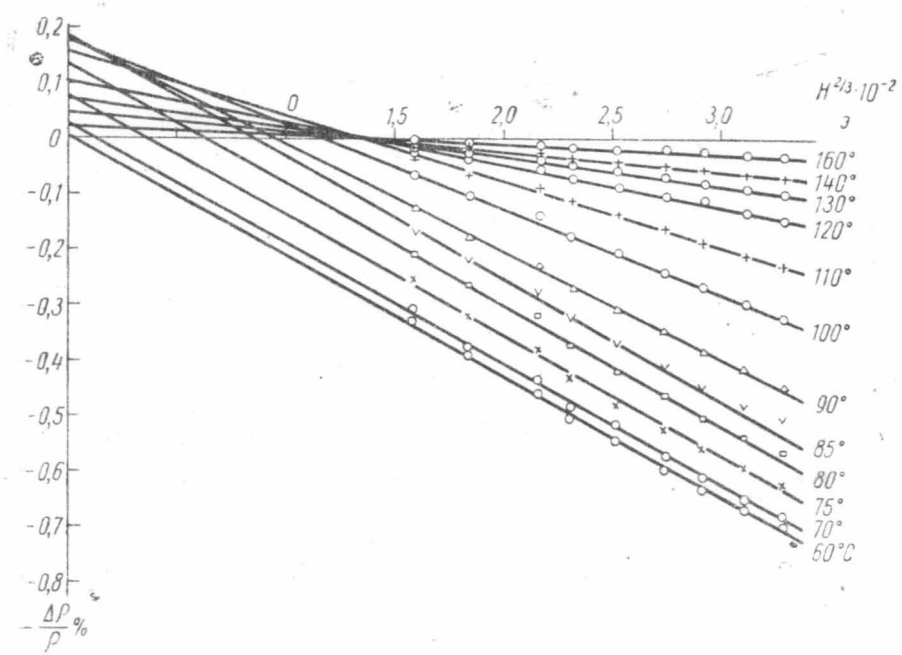


Рис. 8. Зависимость гальваномагнитного эффекта от  $H^{2/3}$  непосредственно вблизи точки Кюри

одинаковые результаты. Однако при приближении к точке Кюри кривые расходятся. Кривая  $(\sigma t_s)$ , определенная по методу «термодинамических коэффициентов», идет круто вниз, достигая значения  $\sigma_s = 0$  на температурной оси. Кривая  $\sigma_s(t)$ , определенная по гальваномагнитному эффекту, приближается к оси температур постепенно, образуя так называемый «хвост» самопроизвольной намагниченности. Наличие длинного «хвоста» в изучаемом феррите подтверждает мысль о том, что в нем сильно сказывается влияние неоднородности состава образца на магнитное превращение.

Наконец, отметим, что как для металлических ферромагнетиков, так и для феррита непосредственно вблизи точки Кюри хорошо выполняется зависимость гальваномагнитного эффекта от  $H^{2/3}$  (рис. 8). Природу положительных отрезков, отсекаемых на оси координат прямыми  $\Delta\rho/\rho \cdot (H^{2/3})$ , мы в настоящее время объяснить не можем.

Авторы приносят благодарность профессору К. П. Белову за ценные указания при выполнении данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. De Voer J. H., Verwey E. J. W. Proc. Phys. Soc., 49, 59, 1937.
2. Комар А. П., Ключин В. В. Изв. АН СССР, сер. физ., 18, 3, 1954.
3. Иоффе В. А., Зонн З. Н. и Хвостенко Г. И. ЖТФ, 9, 1957.
4. Ирхин П. П., Туров Е. А. ФММ, 4, вып. 1, 1957.
5. Белов К. П., Талалаева Е. В. ЖЭТФ, 33, вып. 6 (12), 1957.
6. Белов К. П., Горяга А. Н. ФММ, 2, вып. 1, 1956.
7. Белов К. П., Зайцева Г. А. ФММ, 1, вып. 3, 1955.

Поступила в редакцию  
21.1 1959 г.

Кафедра общей физики  
для биолого-почвенного  
факультета