

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1—1959

Л. В. СОБОЛЕВ

## ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОВОДИМОСТИ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫХ ФЕРРИТОВ

Нелинейные вольт-амперные характеристики марганцевых ферритов были изучены в 1938 г. Шульце и Греммером [1]. Они наблюдали участки с практически бесконечно большой проводимостью, то есть соответствующие пробоем образца. Возрастание проводимости было обратимым: при снятии поля восстанавливалось первоначальное значение проводимости. В настоящей работе получены вольт-амперные характеристики никель-цинковых ферритов при температурах  $-78^\circ$ ,  $0^\circ$  и  $+20^\circ\text{C}$ ; с целью выбора наилучшего режима для измерения комплексной диэлектрической проницаемости. Измерения производились методом вольтметра — амперметра, причем напряжение на образце измерялось высокоомным потенциометром ППТВ-1, поскольку сопротивление образцов не превышало 5000—6000 ом.

Как видно из рис. 1, полученные вольт-амперные характеристики имеют не совсем обычный для полупроводников вид. При исследованиях было установлено, что закон Ома оказывается справедливым только при очень слабых токах и то не для всех образцов. Нелинейность вольт-амперной характеристики появляется у некоторых образцов уже при плотностях тока порядка от 1 до 10  $\mu\text{a}/\text{cm}^2$  и у всех образцов при плотностях порядка 1  $\text{ma}/\text{cm}^2$ . У образцов электрически более прочных закон Ома сменяется законом Пуля, а при напряженности поля порядка 30—40  $\text{в}/\text{см}$  при  $20^\circ$  последний уступает место быстрому росту проводимости, характерному для электростатической ионизации в предпробойной области и наступающему затем пробоем образца. Для менее прочных образцов ни при каких напряженностях поля закон Пуля в чистом виде не выполняется: наклон кривой  $\ln\sigma = f(u)$  (где  $u$  — напряжение на образце) меняется непрерывно, причем кривая может иметь точку перегиба (рис. 1а). Характерным для всех вольт-амперных характеристик является наличие небольшого по величине критического значения напряженности поля  $E_k$ , при котором происходит пробой образца. Величина критической напряженности поля  $E_k$  убывает с ростом температуры, что свидетельствует об активации процесса пробоя. Если поле снять сразу же после возникнове-

ния пробоя, то первоначальная проводимость образца быстро восстанавливается. В предпробойный период и во время пробоя, когда плотность тока достигает значений порядка сотен  $\text{ма}/\text{см}^2$  и более, образец разогревается током, и температура его сильно возрастает (на несколько десятков градусов), что также приводит к возрастанию проводимости. Вследствие этого опыт приходится вести очень осторожно, включая ток только на очень короткое время, необходимое для отсчета по приборам. На зависимость проводимости от поля накладывается еще зависимость от температуры, поэтому вольт-амперная характеристика образца в области  $E_k$  получается несколько искаженной: вместо излома характеристики в области  $E_k$  видно плавное искривление, а само зна-

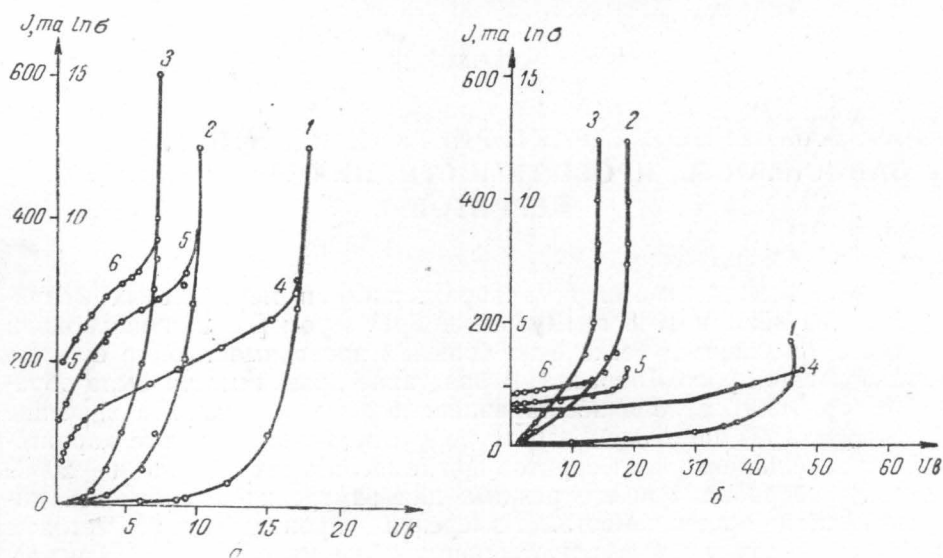


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики никель-цинковых ферритов: *a* —  $\text{NiO}_{0,25} \cdot \text{ZnO}_{0,75} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  и *б* —  $\text{NiO}_{0,75} \cdot \text{ZnO}_{0,25} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  при температурах: 1 —  $78^\circ$ ; 2 —  $0^\circ$ ; 3 —  $+20^\circ$ ; 1, 2, 3 —  $I = f(U)$ ; 4, 5, 6 —  $\ln \sigma = \varphi(U)$

чение  $E_k$  получается несколько заниженным. Если оставить поле включенным после возникновения пробоя, то может наступить разрушение образца. Это свидетельствует о том, что пробой развивается во всей толще образца между электродами.

Указанные особенности вольт-амперных характеристик и явление пробоя ферритовых образцов можно качественно объяснить, если использовать модель строения поликристаллического феррита в виде неоднородного сопротивления и механизм проводимости конгломерата полупроводниковых зерен, развитый А. А. Горевым и А. И. Пирязевой [4]. Отдельные зерна поликристаллического феррита разделены прослойками, имеющими значительно большее сопротивление, чем сами зерна. Эти слои повышенного сопротивления имеют очень малую толщину порядка  $10^{-4} \div 10^{-6}$  см, тогда как зерна в поперечнике около  $10^{-2} \div 10^{-3}$  см. Вследствие этого напряжение, приложенное к образцу, падает в основном на сопротивлениях прослоек. Напряженность поля в прослойках будет составлять  $10^4 \div 10^5$  в/см при напряжениях на всем образце порядка единиц и десятков вольт, то есть как раз те напряженности, которые требуются теориями пробоя (например, Френкеля [4])

для возрастания проводимости за счет электростатической ионизации. Поэтому будем считать, что возрастание проводимости образца с ростом напряженности поля происходит вследствие пробоя прослоек между отдельными зернами. Если в какой-либо цепочке зерен между электродами образца будут пробиты все прослойки, то сопротивление этой цепочки будет складываться только из сопротивлений зерен и по величине начальное сопротивление образца будет значительно превосходить его. Следовательно, появление такой цепочки должно приводить к скачкообразному возрастанию проводимости, что должно отмечаться на вольт-амперной характеристике образца в виде резкого излома. Оче-

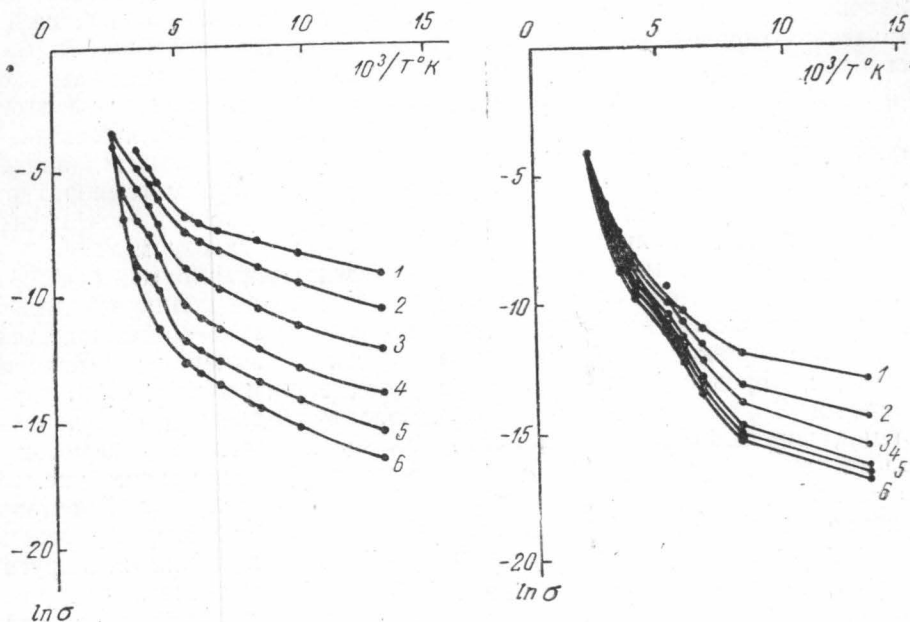


Рис. 2. Температурная зависимость проводимости никель-цинковых ферритов: слева —  $\text{NiO}_{0.25} \cdot \text{Zn}_{0.75} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  справа —  $\text{NiO}_{0.75} \cdot \text{Zn}_{0.25} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  в интервале температур от  $-196^\circ$  до  $+200^\circ$  при переменном токе различной частоты: 1 —  $10^6$  гц; 2 —  $10^5$  гц; 3 —  $10^4$  гц; 4 —  $10^3$  гц; 5 —  $10^2$  гц; 6 — постоянный ток

видно, этот излом и определит ту критическую напряженность поля  $E_k$ , о которой говорилось выше. Однако поскольку в действительности проводимости и толщины прослоек и зерен статистически распределены, то должен наблюдаться не резкий излом вольт-амперной характеристики, а непрерывное, но достаточно быстрое возрастание тока с ростом напряженности в области значения  $E_k$ , как это и наблюдается на опыте.

Температурная зависимость проводимости Ni—Zn ферритов определялась мостовым методом. Кривые зависимости (рис. 2)  $\ln \sigma = f(1/T)$  имеют ряд изломов, свидетельствующих об изменении энергии активации процесса проводимости тока в поликристаллических ферритах. При переходе от температур выше комнатных к температурам жидкого азота, энергия активации меняется в среднем на порядок. Это изменение энергии активации можно качественно объяснить, если предположить, что поликристаллические ферриты состоят из совокупности зерен феррита, обладающих сравнительно высокой проводимостью и разделенных прослойками со значительно более низкой проводимостью [2, 3].

Можно предположить, что эти прослойки являются областями агрегации дефектов кристаллической решетки, составляющей основную объемную протяженность зерна. Эти дефекты в ферритах с электронной проводимостью являются донорами, уровни которых близко расположены у дна зоны проводимости, так что энергия активации их невелика (десятые доли электрон-вольта). Поэтому при низких температурах, когда все донорные уровни дефектов заняты, дефектная фаза близка по свойствам к диэлектрику. Следовательно, при низких температурах сопротивление образца должно быть очень большим. При температурах, близких к комнатным, большая часть электронов срывается с этих донорных уровней и переходит на уровни зоны проводимости, что приводит к возрастанию проводимости прослоек и, следовательно, к возрастанию проводимости всего образца в целом. Однако в этой области температур прослойки еще имеют значительно более высокое сопротивление (на несколько порядков), чем зерна. Вследствие этого на границах зерно — прослойка возникает межслойная поляризация, в результате которой в области границ образуются объемные заряды, концентрация которых зависит от температуры. С ростом температуры все большая и большая часть носителей заряда освобождается из этого «связанного» состояния и принимает участие в сквозном токе.

Эти предположения подтверждаются следующими опытными данными. Как уже отмечалось выше, при наложении на поликристаллический образец постоянного электрического поля пробой происходит при различной напряженности поля в зависимости от температуры. Энергия активации, определенная по температурной зависимости напряженности пробоя  $E_k$ , по порядку величины совпадает со средней энергией активации, определенной по температурной зависимости проводимости в области температур ниже  $0^\circ\text{C}$  (по спрямленной ветви кривой, рис. 2). Это убеждает нас в том, что явление пробоя сводится к электростатической ионизации донорных центров, которыми являются дефекты решетки, агрегированные в основном внутри прослоек между зернами. С другой стороны, энергия активации, определенная по высокотемпературной ветви кривой  $\ln\sigma = f(1/T)$ , хорошо совпадает с энергией активации, определенной по Брикендриджу по кривой  $\ln j_m = \psi(1/T)$ , что свидетельствует о том, что механизм проводимости в этой области температур существенным образом определяется межслойной поляризацией.

В заключение считаю необходимым принести благодарность проф. Е. И. Кондорскому за обсуждение полученных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schulze A., Gremmer W. Phys. Zeitschrift, **39**, № 6, 205, 1938.
2. Billig E., Plessner K. Prec. Phys. Soc, **64**, 361, 1951.
3. Коорс С. Phys. Rev., **83**, 121, 1951.
4. Горев А. А. и Пирязева А. И. ЖТФ, **21**, вып. 12, 1469, 1951.

Поступила в редакцию  
9. 10 1958 г.

Кафедра  
магнетизма