

ДОМЕНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МЕТАЛЛЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.В.Бойко, Ю.Ф.Подрезов, Н.П.Климова

Впервые экспериментально обнаружены домены сильного электрического поля в меди при низких температурах в условиях разогрева образца током.

Возможность появления электрических доменов в металле теоретически предсказана в работе ¹. Их существование обусловлено неустойчивостью однородного распределения электрического поля на участке вольт-амперной характеристики с отрицательной дифференциальной проводимостью $j' \equiv \partial j / \partial E$ – вольт-амперная характеристика N -типа (j – плотность тока, E – напряженность электрического поля). Реализация такой характеристики в металлах возможна в условиях джоулева разогрева при выполнении неравенства $d / d T [\sigma(T) q(T)] < 0$ ($\sigma(T)$ – проводимость, $q(T)$ – поток тепла из образца при заданных условиях тепловода) ¹. Оно легко осуществляется для чистых металлов при низких температурах, когда $\sigma(T) \sim T^{-3} \div T^{-5}$. В случае слабой зависимости $q(T)$, например, $q(T) \sim (T - T_0) T_0$ (T_0 – температура окружающей среды), и высокой температуры Дебая металла это неравенство может выполняться и для относительно грязных образцов ($\sigma_{4,2\text{K}} / \sigma_{300\text{K}} \cong 10 - 50$). В соответствии с оценками, плотности тока, при которых $j' < 0$, порядка 10^9 A/m^2 , что экспериментально легко достижимо на тонких образцах.

Для изготовления образцов в настоящей работе был использован медный провод сечением $\sim 10^{-9} \text{ м}^2$ ($\phi 0,05 \text{ мм}$) и отношением $\sigma_{4,2\text{K}} / \sigma_{300\text{K}} = 75$. Измерения проводились на стоянном токе в жидком гелии на образцах двух видов. Один из них представлял собой оклеенную многovitkovую катушку с плотной намоткой (длина провода $\sim 1 \text{ м}$), другая – неизолированный медный провод, растянутый на крючках из нержавеющей стали $0,1 \text{ мм}$, расположенных на подпружиненной рамке. Такие крючки практически не изменяют условий теплообмена и распределения тока и позволяли измерять напряженность электрического поля, усредненную по участкам, $\bar{E}_i = V_i / l_i$, обычным потенциометрическим методом (V_i – падение напряжения на участке длиной l_i).

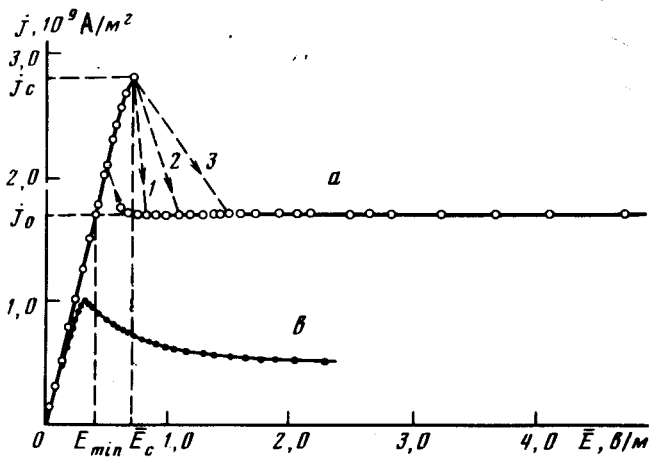


Рис. 1

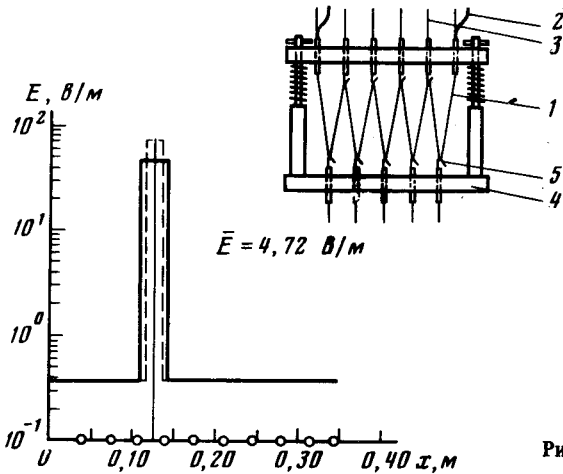


Рис. 2

Вольт-амперные характеристики исследованных образцов, представляющие собой зависимость $j(\bar{E})$, приведены на рис.1 ($\bar{E} = V/L$, V — падение напряжения на образце, L — длина). Кривая a относится к образцам, растянутым на крючках (1 — $L = 1,01$ м; 2 — $L = 0,73$ м; 3 — $L = 0,34$ м). Как видно из рисунка, вольт-амперная характеристика практически линейна вплоть до значения $\bar{E}_c = 0,7$ В/м. Из точки $j_c(\bar{E}_c)$ за время, меньшее 0,1 с, происходит спонтанный переход на ветвь вольт-амперной характеристики, характеризующуюся плотностью тока, не зависящей от \bar{E} . Длина образца влияет только на величину приращения $\bar{E} - \bar{E}_c$ в момент перехода, что объясняется различным соотношением сопротивления внешней цепи и образца (отклонение от режима заданного напряжения). При уменьшении \bar{E} обнаружен гистерезис. Прямое и обратное прохождение отмечены на рисунке стрелками.

Вид вольт-амперной характеристики (кривая a рис.1) и наличие гистерезиса свидетельствуют о возникновении неоднородного распределения поля в образце — рождении электрического домена². И действительно, при исследовании распределения электрического поля на образце, изображенном на вставке рис.2 (1 — медная проволока, 2 — токовые, 3 — потенциальные выводы, 4 — подпружиненная рамка, 5 — нержавеющие крючки), было обнаружено, что в момент резкого падения плотности тока на одном из участков медного провода напряженность резко возрастала, в то время как на остальной части уменьшалась. Процесс рождения домена заканчивался при достижении плотности тока $j = j_0$. Участок, на котором появляется домен электрического поля, не локализован в пространстве — домен мог возникнуть в любой точке образца и хаотически перемещаться вдоль длины провода, сохраняя при $\bar{E} = \text{const}$ свою ширину. Этот факт был установлен в результате обработки эксперимен-

тальных данных одновременной автоматической записи падения напряжения как на участке с доменом, так и на соседних с ним участках провода с помощью пятиканального самописца Н-327-5.

Напряженность поля вне домена была всегда близка к значению E_{min} , соответствующему линейному участку вольт-амперной характеристики при $j = j_0$.

С увеличением средней напряженности поля домен был устойчив во всей исследованной области \bar{E} . При уменьшении \bar{E} он существовал и при $\bar{E} < \bar{E}_c$, что обуславливало гистерезис. Переход к однородному распределению поля происходил в момент скачкообразного возрастания j до значения, соответствующего линейной ветви вольт-амперной характеристики.

На рис.2 сплошной линией изображено распределение напряженности электрического поля \bar{E}_i вдоль длины медного провода при $\bar{E} = 4,72$ В/м в момент времени, когда возникший домен оказался между двумя соседними потенциальными контактами, расстояние между которыми $l_i = 3,3$ см. Расположение потенциальных контактов отмечено на оси абсцисс рис.2 точками. Пунктиром на этом рисунке изображено распределение напряженности поля в домене в предположении, что его форма близка к прямоугольной, а ширина ~ 2 см. При оценке ширины мы исходили из результатов автоматической записи изменения напряжения со временем на соседних с доменом участках провода, а также из того факта, что его ширина при $\bar{E} = 4,72$ В/м не может быть меньше 1 см, так как в этом случае температура в домене была бы близка к температуре плавления меди.

Как видно из рисунка, напряженность электрического поля в домене почти в 200 раз превышает напряженность поля вне его.

Влияние условий теплопередачи на характер распределения E , а следовательно, и на вид вольт-амперной характеристики иллюстрируется кривой b на рис.1, относящейся к образцу, выполненному в виде катушки. Такая конструкция позволяла создать хорошую теплопередачу не вдоль тока, а между соседними витками образца, что значительно уменьшало его эффективную длину, сохраняя при этом режим заданного напряжения. Для образцов длиной $L < 2\pi [j_c \kappa T d / (\bar{E}_c q(T) \text{Max } |j'|)]^{1/2}$ должно быть устойчивое однородное распределение поля¹. (κ — теплопроводность металла, d — толщина образца). Полученная для эффективно короткого образца вольт-амперная характеристика (кривая b рис.1) соответствует статической характеристике с отрицательной дифференциальной проводимостью и не имеет гистерезиса, а распределение поля однородно во всем интервале \bar{E} . Меньшие, по сравнению с кривой a значения j_c и \bar{E}_c объясняются уменьшением $q(T)$ в этом эксперименте, вследствие лучшей изоляции образца от окружающей среды.

В заключение хотелось бы отметить, что обнаруженное в настоящей работе явление может представлять интерес, не только с точки зрения физики твердого тела, но и, благодаря нелинейности вольт-амперной характеристики, найти техническое применение.

Литература

1. Слуцкин А.А., Кадигрбов А.М. Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, 219.
2. Волков А.Ф., Коган Ш.М. УФН, 1968, 96, 633.

Поступила в редакцию
27 февраля 1982 г.

После переработки
17 мая 1982 г.