

ПОВЕРХНОСТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В ОЛОВЕ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ю. П. Гайдук, А. П. Перов

1. В работе [1] было показано, что в сильном магнитном поле H статическая проводимость металла у поверхности в области глубиной порядка r (r – ларморовский радиус) отличается от проводимости в глубине. Позднее был рассчитан поверхностный импеданс с учетом этого обстоятельства [2]. Было показано, что при выполнении условий

$$r \ll \delta \ll \ell, \quad H \parallel n \quad (1)$$

для чистых металлов на частотах $\omega < \nu$ должен иметь место скин-эффект нового типа (δ – глубина проникновения электромагнитного поля, ν и ℓ соответственно частота столкновений и длина свободного пробега электронов проводимости, n – нормаль к поверхности металла). Важной особенностью импеданса в этих условиях является его чувствительность к характеру рассеяния электронов на поверхности: при зеркальном отра-

жении величина δ больше или равна, а при диффузном – значительно меньше, чем глубина проникновения электромагнитного поля, рассчитанная по значению статической проводимости для нормального скин-эффекта (рис. 1).

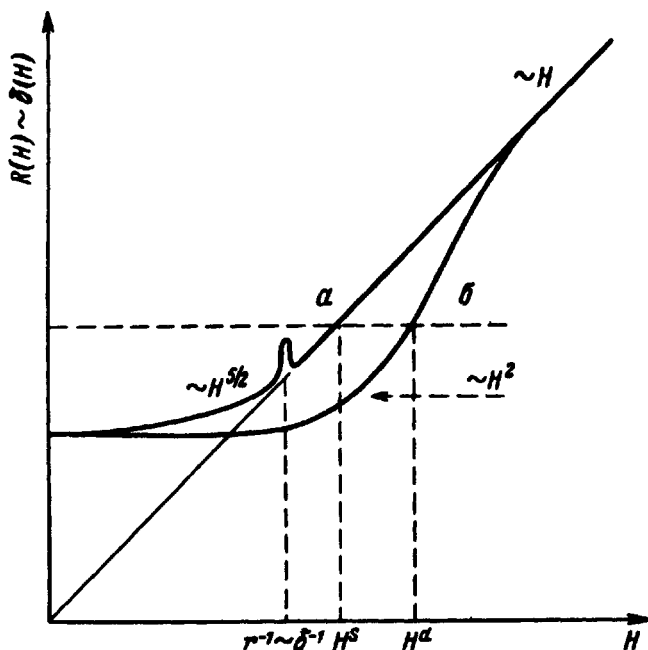


Рис. 1. Зависимости глубины проникновения электромагнитного поля в металл δ при $\omega = \text{const}$ от величины магнитного поля при $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$ согласно (2); a – зеркальное отражение электронов от поверхности металла, b – диффузное; H^d и H^s – значения величины магнитного поля соответственно для диффузного и зеркального рассеяния электронов, при которых $\delta(H^d) = \delta(H^s)$

В настоящей работе сообщаются результаты исследования поверхностного импеданса олова в магнитном поле, которые указывают на существование скин-эффекта, предсказанного в работе [2]. Обнаружено также, что в сильном магнитном поле ($\omega_c > \nu$, $\omega_c = eH/\pi^*c$ – циклотронная частота) существует область, в которой глубина проникновения δ с ростом магнитного поля уменьшается. Такое поведение связано со специфической ролью диффузного рассеяния электронов проводимости на поверхности металла при $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$.

2. Импеданс на частотах 1 – 10 $\mu\text{и}$ исследовался двумя способами: 1) измерением зависимости производной действительной части импеданса от магнитного поля ($\partial R/\partial H = f(H)$); 2) непосредственным определением глубины скин-слоя с помощью звука, возбуждаемого в образце. Определение величины δ с помощью звуковой волны, имеющей длину λ , основано на том, что при

$$\lambda = \pi\sqrt{2} \delta(\omega, H) \quad (2)$$

должен наблюдаться максимум интенсивности стоячей звуковой волны [3].

Образец олова с исходным отношением $\rho_{300^\circ\text{K}} / \rho_{4,2^\circ\text{K}} \approx 10^5$ был вырашен в кварцевой разборной форме и представлял собой диск диаметром 18 мм и толщиной 1 мм. Поверхности образца были зеркальными. Кристаллографические оси C_4 и C_2 лежали в плоскости образца. Длина свободного пробега электронов ℓ в образце при температуре $4,2^\circ\text{K}$ составляла ~ 1 мм. Образец, вложенный в катушку высокочастотного генератора, помещался в сверхпроводящий соленоид.

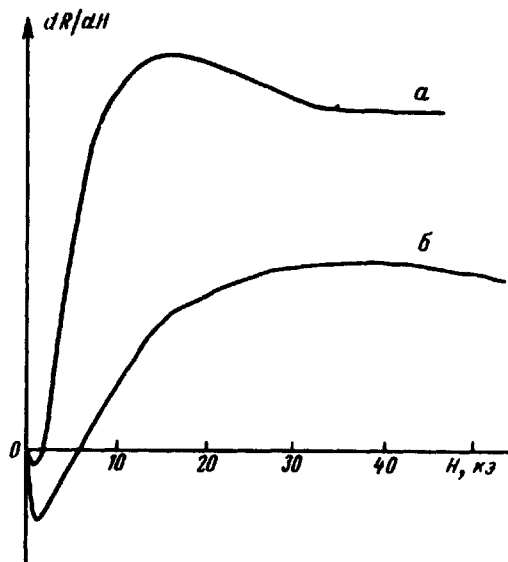


Рис. 2. Экспериментальные зависимости производной действительной части импеданса $\partial R / \partial H$ от магнитного поля. $H \parallel n$, $T = 4,2^\circ\text{K}$, $E \parallel C_2$, $a - f = 1,6$ мГц, $b - f = 12$ мГц

На рис. 2 представлены зависимости $(\partial R / \partial H) = f(H)$ при $H \parallel n$. В общем случае, представленным кривой *a*, можно указать три участка, каждому из которых соответствует характерная зависимость высокочастотной проводимости от магнитного поля. Участок кривой в максимальных магнитных полях, где $\partial R / \partial H = \text{const}$, соответствует нормальному скин-эффекту, так как в этом случае $\sigma(H) \approx \sigma(0)(\omega_c \tau)^{-2}$, и

$$R(\omega, H) = \frac{2\sqrt{2}\pi\omega_c\tau}{c} \sqrt{\frac{\omega}{4\pi\sigma(0)}} \sim H, \quad (3)$$

(τ — время релаксации, $\sigma(0)$ — величина статической проводимости, при $H = 0$, c — скорость света). Для кривой *b* этот участок должен находиться в еще больших полях H . При уменьшении величины H и, соответственно, величины δ происходит переход от нормального скин-эффекта к скин-эффекту нового типа. Характерной чертой здесь является максимум кривой $\partial R / \partial H = f(H)$ и участок линейного роста. Такой вид $\partial R / \partial H = f(H)$ соответствует квадратичной зависимости $R(H)$ и переходу к нормальному скин-эффекту в соответствии с рис. 1 (кривая *b*). Третий тип зависимости импеданса, когда $\partial R / \partial H < 0$, наблюдается при еще меньших значениях H , в которых, однако, по-прежнему $\omega_c > \nu$. В этой области магнитного поля δ уменьшается с ростом H , что означает увеличение высокочастотной проводимости $\sigma(\omega, H)$. Возрастание проводимости в сильном

магнитном поле также можно связать только с диффузным рассеянием электронов. При зеркальном отражении проводимость у поверхности не может возрасти относительно проводимости в глубине, так как при этом траектория электрона не смещается в направлении электрического поля. В этой области магнитного поля соотношение (1), по-видимому, уже не выполняется, а имеет место другое: $\delta \ll r \ll \ell$. Теоретическое рассмотрение такой ситуации еще не проводилось.

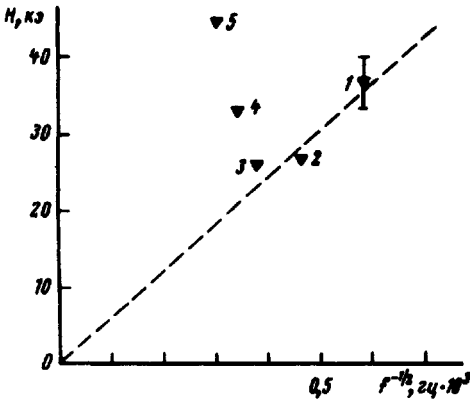


Рис. 3. Зависимость величины H_M от частоты. Экспериментальные точки соответствуют резонансам с номерами $n = 1, 2, 3, 4, 5$; $f_{\text{рез}} = 0,93(2n + 1) \text{ мГц}$; $T = 4,2^\circ\text{K}$

3. Как следует из рис. 1, при диффузном рассеянии электронов на поверхности и при условии (1) δ должно быть меньше, чем при нормальном скин-эффекте. Это положение подтверждается непосредственным измерением толщины скин-слоя с помощью возбуждаемых в образце ponderomotorной силой $F = c^{-1}[j H]$ (j — плотность тока в скин-слое) стоячих звуковых волн, частоты которых определяются соотношением

$$f_{\text{рез}} = \frac{\omega_{\text{рез}}}{2\pi} = \frac{s_p(2n + 1)}{d}$$

(s_p — скорость поперечного звука, d — толщина пластины, $2n + 1$ — число полуволн в стоячей волне). Достижение максимума интенсивности стоячей звуковой волны и, следовательно, выполнение условия (2) осуществлялось изменением величины δ при увеличении H . По положению максимума при фиксированной частоте $f_{\text{рез}}$ определялась величина магнитного поля H_M , при которой толщина скин-слоя равна $\delta(f_{\text{рез}}, H_M) = \lambda/\sqrt{2}\pi$.

На рис. 3 представлены результаты этих измерений. В выбранной системе координат прямая, исходящая из начала, является линией постоянного значения величины импеданса Z , равного $\sim s_p/c$, при условии, что всегда имеет место нормальный скин-эффект (см. рис. 3). Отклонение экспериментальных точек, соответствующих условиям, в которых $Z \sim s_p/c$, от этой прямой связано, таким образом, с отличием от статического значения. Экспериментальные точки, соответствующие первым номерам резонансов $n = 1, 2$, хорошо ложатся на эту прямую, т. е. скин-эффект близок к нормальному. Это естественно, так как в этих условиях неравенство $\delta < \ell$ не является сильным (при $n = 2$, $\delta(H_M) = 0,1 \text{ мж}$). Дальнейшее повышение частоты усиливает неравенство $\delta < \ell$ и приводит к увеличению

H_M относительно ожидаемых значений (пунктир на рис. 3). Это указывает на отличие $\sigma(\omega, H)$ от статического значения, что связано с диффузным рассеянием электронов на поверхности (рис. 1 кривая б). При чисто зеркальном отражении величина H_M должна лишь монотонно уменьшаться.

Физический факультет
Московского
государственного университета
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
12 февраля 1971 г.

Литература

- [1] М.Я.Азбель, В.Г.Песчанский. ЖЭТФ, 49, 572, 1965.
 - [2] М.Я.Азбель, С.Я.Рахманов. ЖЭТФ, 57, 295, 1969.
 - [3] В.Я.Кравченко. ЖЭТФ, 54, 1494, 1968.
-