

АНОМАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ ВОЛЬФРАМА В МАЛЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

А.В.Голик, А.П.Королюк, В.И.Хижный

Экспериментально обнаружено проникновение электромагнитного СВЧ сигнала через пластину вольфрама в условиях аномального скин-эффекта, когда внешнее магнитное поле отсутствует или мало.

Известно, что при низких температурах в достаточно чистых металлах, в присутствии постоянного магнитного поля H возможно распространение различных слабозатухающих элек-

ромагнитных волн¹. При $H = 0$ электромагнитная волна, падающая на поверхность металла, проникает вглубь лишь на глубину скин-слоя δ . В настоящее время появились теоретические работы²⁻⁴, в которых указывается на возможность распространения электромагнитных волн или эффективного "затягивания" поля из скин-слоя вглубь металла в отдельных кристаллографических направлениях, определяемых локальной геометрией поверхности Ферми (ПФ), в отсутствие постоянного магнитного поля.

Целью настоящей работы явилось прямое экспериментальное наблюдение проникновения электромагнитного СВЧ сигнала через пластинку вольфрама в условиях аномального скин-эффекта. Образец для измерений толщиной $d = 0,95$ мм был вырезан на электроискровом станке из монокристалла¹⁾ с отношением сопротивлений $\rho_{300}/\rho_{4,2} = 4 \cdot 10^4$, шлифован абразивными порошками и электрохимически отполирован. Схема эксперимента представлена на рис. 1. На одной поверхности образца, являвшегося общей стенкой между двумя резонаторами, возбуждался линейно поляризованный СВЧ ток \vec{j} , а на другой поверхности ток аналогичным образом регистрировался. Эксперимент проводился в геометрии: $n \parallel [110]$, $\vec{j} \parallel [\bar{1}10]$ (n – вектор нормали к поверхности образца). Вектор постоянного магнитного поля H величиной $0 \div 1$ кЭ мог ориентироваться в произвольном направлении, лежащем в плоскости (001). Эксперимент проводился на частотах 500 – 600 МГц в режиме непрерывных колебаний. Тщательная экранировка передающего и приемного трактов позволила уменьшить величину сигнала "просачивания" в обход образца до уровня, меньшего порога чувствительности аппаратуры, равного – 125 дБ/Вт. Амплитуда накачки СВЧ поля на поверхности образца не превышала 0,5 Э.

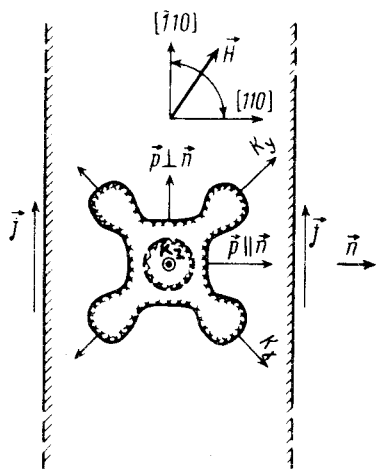


Рис.1

Рис. 1. Геометрия эксперимента и электронный "валет" поверхности Ферми вольфрама

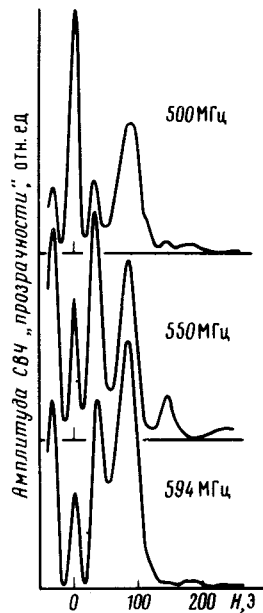


Рис.2

Рис. 2. Экспериментальные записи амплитуды электромагнитной СВЧ "прозрачности" вольфрама при 1,7К

Были получены следующие основные экспериментальные результаты.

I. В области гелиевых температур при $H = 0$ всегда регистрировался СВЧ сигнал на приемной поверхности образца.

II. Амплитуда регистрируемого сигнала при $H = 0$ увеличивалась при понижении температуры от 4,2 до 1,7К в 6 – 10 раз и регистрировалась на уровне не хуже – 80 дБ/Вт при 1,7К.

1) Слиток вольфрама был выращен в ИФТТ АН СССР.

По оценкам глубина скин-слоя в данном эксперименте составляла не более 10^{-4} см. Амплитуда скин-слоя на расстоянии $d/\delta \rightarrow \infty$, обусловленная "эффективными" электронами, пропорциональна $(\delta/l)^2 x^{-2} e^{-x}$, где $x = d/l$, что дает для длины свободного пробега $l \approx 1$ мм, $l \approx d$, $\delta \sim 10^{-4}$ — $E_{\text{ск}}^{(d)} \sim E_{\text{ск}}^{(0)} (\delta/d)^2 \lesssim 10^{-6} E_{\text{ск}}^{(0)}$, а для "неэффективных" электронов $E_{\text{ск}}^{(d)} \sim E_{\text{ск}}^{(0)} \delta^2/dl$ того же порядка при $d \approx l$, что требовало для регистрации наблюдаемого отношения сигнал-шум чувствительности аппаратуры — 160 дБ/Вт без учета потерь в передаче сигнала с образца на резонатор. Эти оценки, а также увеличение амплитуды сигнала при понижении температуры, позволяют сделать вывод, что регистрируемый сигнал не связан с регистрацией скин-слоя.

III. Введение постоянного магнитного поля, параллельного поверхности образца приводит к осциллиционному подавлению сигнала, рис. 2. Значение поля "отсечки" $H = 145$ Э соответствует равенству размера максимальной циклотронной траектории носителей D_{ext} толщины образца d . Эти траектории соответствуют электронам из области "шишки валета" ПФ с импульсом $1,15 \cdot 10^{-19}$ г·см/сек. Т. е. в поле $H \perp n$ электромагнитная прозрачность образца наблюдается пока $D_{\text{ext}} \gtrsim d$.

Проникновение электромагнитного СВЧ поля сквозь образец вольфрама в направлении $[100]$ при $H = 0$ может быть связано с возбуждением слабозатухающих электромагнитных волн, обусловленных наличием мощной группы носителей с близкими значениями импульсов p_F . Для геометрии эксперимента настоящей работы существуют идентичные группы электронов, движущиеся в направлениях $[100]$. В ⁴ показано, что такая группа электронов с $p \perp n$ может оказать существенное влияние на формирование скин-слоя и обусловить возникновение слабозатухающей компоненты электромагнитного поля с длиной волны $\lambda \sim \delta$, проникающей вглубь металла. В этих же условиях группа электронов с $p \parallel n$ может возбудить длинноволновую электромагнитную моду с $\lambda \sim v_F/\omega$ (v_F — фермиевская скорость, ω — частота СВЧ сигнала). Вместе с тем, эта же группа электронов при наличии параболических точек или точек уплощения на ПФ может "затягивать" поле из скин-слоя на расстояние $\sim l$ ³.

Осциллиционный эффект зависимости СВЧ "прозрачности" образца при введении магнитного поля может быть связан с несколькими механизмами взаимодействия носителей со скиновым полем, например ⁵. Однако, идентификация траекторных или волновых типов электромагнитных возбуждений, а равно как и эффект при $H = 0$ требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Необходимо отметить, что в работе ⁶ были получены косвенные указания на распространение СВЧ поля через металлическую пластинку при $H = 0$. Однако, особенности экспериментальной методики и, по-видимому, наличие сигнала просачивания в обход образца не позволили авторам реализовать прямое наблюдение этого эффекта, что удалось сделать в настоящей работе.

Таким образом, экспериментально показано, что: 1) в чистом металле, когда $l \gtrsim d$, в отсутствие магнитного поля электромагнитные СВЧ сигналы могут распространяться на расстояния, существенно превышающие глубину скин-слоя; 2) при H параллельном поверхности, в условиях, когда $l \gtrsim d$, $d \leq D_{\text{ext}}$ осуществляется эффективный перенос электромагнитного поля сквозь пластину металла.

Авторы выражают благодарность Э.А.Канеру за полезные дискуссии и С.В.Плющевой за предоставление монокристаллов вольфрама.

Литература

1. Константинов О.В., Перель В.И. ЖЭТФ, 1960, 38, 161.
2. Каганов М.И., Контарович В.М., Лисовская Т.Ю., Степанова Н.А. Препринт ДонФТИ-82-54.
3. Ивановски Г.И., Каганов М.И. ЖЭТФ, 1982, 83, 2320.
4. Безуглый Е.В. ФНТ, 1983, 9, №5, в печати.

5. Лурье М.А., Песчанский В.Г., Ясемидис К. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 193.

6. Phillips T.G., Baraff G.A., Schmidt P. H. Phys. Rev. B, 1972, 5, 1283.

Институт радиофизики
и электроники
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
15 февраля 1983г.
После переработки
8 июня 1983г.