

СВЯЗЬ МЕЖДУ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ И МНИМОЙ ЧАСТЯМИ
ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА ПРИ РАЗМЕРНОМ ЭФФЕКТЕ

И. П. Крылов

При измерении радиочастотного поверхностного импеданса $Z = R + iX$ тонких металлических пластин, помещенных в магнитное поле H , на кривой зависимости $Z(H)$ наблюдается особенность ΔZ при том значении магнитного поля, когда диаметр экстремальной траектории электрона равен толщине образца. Этот тип размерного эффекта был

обнаружен Гантмахером на олове [1] и предложен им в качестве инструмента для изучения ферми-поверхностей чистых металлов. Впоследствии был исследован и другой тип радиочастотного размерного эффекта, обусловленного электронами опорной точки [2]. В работе [1], где измерялась мнимая часть импеданса, было отмечено, что возникающие линии размерного эффекта весьма разнообразны по форме, причем последняя не зависит от частоты внешнего электромагнитного поля, толщины образца и не меняется после травления поверхности металла. Для дальнейшего изучения факторов, влияющих на форму линии, в экспериментах с индием нами было обращено внимание на взаимосвязь изменений мнимой и действительной частей поверхностного импеданса при размерном эффекте.

Эксперименты производились при температуре $T = 1,3^{\circ}\text{K}$ на монокристаллических образцах, выращенных из индия высокой чистоты ($\sim 10^{-4}\%$ примесей) в разборной полированной кварцевой форме [3]. Образцы представляли собой диски диаметром 18 мм и толщиной 0,3 - 0,4 мм. При температуре $T = 1,3^{\circ}\text{K}$ длина свободного пробега электронов, оцененная из экспериментальных данных [4], составляла 0,5 мм. Образец помещался в катушку колебательного контура радиочастотного генератора. Частота генерации была $f \sim 3$ мГц, амплитуда генерации $U \sim 0,1$ в. Для исследования зависимости $Z(H)$ применялась модуляционная методика. Частота модуляции магнитного поля была равна 20 Гц. Производя частотное [1] или амплитудное детектирова-

ние несущей частоты генератора, мы регистрировали сигнал, пропорциональный соответственно $\partial f / \partial H \sim -\partial X / \partial H$ или $\partial U / \partial H \sim -\partial R / \partial H$. Калибровка абсолютной чувствительности схем не производилась.

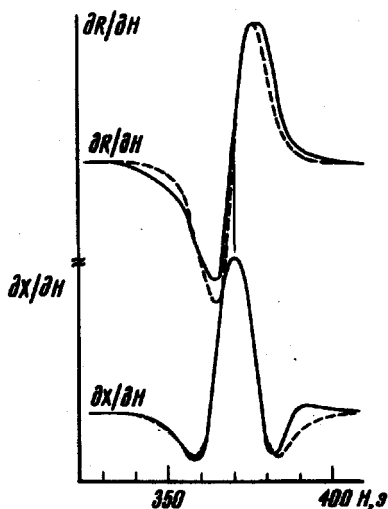
В результате экспериментов оказалось, что при прохождении линии размерного эффекта изменения мнимой и действительной частей импеданса не пропорциональны друг другу. Качественное сравнение экспериментальных кривых $\partial R / \partial H$ и $\partial X / \partial H$ показывает, что для всех наблюдавшихся на индии линий размерного эффекта, среди которых встречаются кривые довольно сложной формы, экстремумы одной функции приходятся на места наиболее резкого изменения другой (каждая функция определена с точностью до множителя и произвольной постоянной). То же самое наблюдается для линий размерного эффекта на опорной точке. В целях расширения рассматриваемого круга явлений было бы интересно изменить геометрию эксперимента. Например, применить методику, подобную использованной в работе [5], где регистрировался сигнал, прошедший сквозь металлическую пластину, или с нашей аппаратурой поставить опыт при наличии скин-слоя только на одной поверхности пластины из исследуемого металла (этого можно достигнуть, если на другую поверхность образца нанести металлическую пленку достаточной толщины). Однако уже проведенные наблюдения позволяют поставить вопрос о существовании связи между изменениями ΔR и ΔX при размерных эффектах, обусловленной какими-то общими свойствами уравнений движения электронов в металле.

Как известно, для резонансных эффектов, например ядерного резонанса, где восприимчивость является функцией частоты, связь между поглощением и дисперсией определяется соотношениями Крамерса-Кронига [6]. В случае размерных эффектов мы имеем дело с совершенно иным типом явлений, поскольку ни положение, ни форма линии от частоты электромагнитного поля ν практически не зависят. Мы попытались, однако, проверить в случае линии размерного эффекта наиболее простой симметричной формы существование интегральных соотношений между ΔR и ΔX , которые могут быть получены из соотношений Крамерса-Кронига путем формальной замены переменной ν на величину магнитного поля H . С этой целью мы сравнили кривые $\partial R(H)/\partial H$ и $\partial X(H)/\partial H$ для специально подобранной линии размерного эффекта с приведенными в работе [6] функциями, связанными соотношениями Крамерса-Кронига (см. рисунок, где пунктиром нанесены производная от гауссовой кривой и функция, полученная из нее [6] при помощи указанных соотношений).

Довольно хорошее совпадение приведенных на рисунке графиков говорит в пользу существования предполагаемых интегральных соотношений между ΔR и ΔX . Подчеркнем, что речь идет лишь об изменениях импеданса при размерном эффекте, а область интегрирования включает ширину линии, но не распространяется на все значения магнитного поля.

В связи с этим необходимо отметить, что описанные соотношения между ΔR и ΔX несправедливы для явлений,

где, в отличие от размерных эффектов, существенно квантование энергетических уровней электрона в магнитном поле. Действительно, в случае другого не зависящего от частоты эффекта - квантовых осцилляций поверхностного им-



Запись линии размерного эффекта на образце из индия толщиной 0,3 мм. Нормаль к поверхности образца $\parallel [001]$, высокочастотное электрическое поле на поверхности образца вдоль $[100]$. Угол между H и ось $[010]$ равен 37° . Масштаб по оси ординат произвольный, разный для верхней и нижней кривой

педанса - немонотонные изменения $\Delta R(H)$ и $\Delta X(H)$ пропорциональны. Это следует из теоретического рассмотрения [7] и проверено нами экспериментально. При $H = 8 + 10$ кэ наблюдались осцилляции импеданса монокристаллов индия, периодичные в обратном поле, причем R и X осциллировали без заметного сдвига фазы.

В настоящее время отсутствуют теоретические расчеты формы линии размерного эффекта, проведение которых представляет известные трудности. Возможно, однако, что обнаруженная связь ΔR и ΔX при размерном эффекте может быть обоснована, исходя непосредственно из общих свойств

уравнений распределения токов в металле без проведения расчетов формы линий для различных конкретных случаев.

Автор глубоко благодарен В.Ф.Гантмахеру за повседневное руководство и Ю.В.Шарвину за подробное обсуждение результатов и ценные советы.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
14 апреля 1965 г.

Литература

- [1] В.Ф.Гантмахер. ЖЭТФ, 44, 811, 1963.
- [2] В.Ф.Гантмахер, Э.А.Канер. ЖЭТФ, 45, 1480, 1963.
- [3] Ю.В.Шарвин, В.Ф.Гантмахер. ПТЭ, № 6, 165, 1963.
- [4] В.Ф.Гантмахер, И.П.Крылов. ЖЭТФ, 47, 2111, 1964.
- [5] W.M. Walsh, C.C. Grimes. Phys. Rev.Lett.,13 (17), 523, 1964.
- [6] G.E.Pake, E.M.Purcell. Phys.Rev., 74, 1184, 1948.
- [7] М.Я.Азбель. ЖЭТФ, 34, 1158, 1958.