

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС ВИСМУТА ПРИ БОЛЬШИХ АМПЛИТУДАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В. Т. Долгополов, Л. Я. Марголин

Обнаружено, что при гелиевых температурах и амплитудах переменного электромагнитного поля выше некоторой критической существуют области магнитных полей, в которых образцы висмута могут находиться в нескольких устойчивых состояниях, характеризующихся различными зависимостями производных действительной и мнимой части поверхностного импеданса от магнитного поля.

Мы сообщаем результаты предварительных экспериментов по изучению зависимости производных поверхностного импеданса висмута от величины магнитного поля H при больших амплитудах электромагнитных волн.

Эксперименты выполнены на образцах, имевших форму дисков диаметром 18 мм и толщинами $d = 0,25 \pm 0,6$ мм. Нормаль к плоскости диска составляла угол в 3° с тригональной осью. Длина свободного пробега электронов в металле была такова, что позволяла без труда регистрировать радиочастотный размерный эффект.

Образцы помещались внутрь катушки индуктивности, входившей в состав одного из плеч двойного T -образного моста. На вход моста подавалось напряжение от радиочастотного генератора, сигнал с выхода моста поступал на стандартную схему демодуляции, узкополосного усиления и синхронного детектирования (см., например, [1]). Измерительная установка позволяла регистрировать производные по магнитному полю от действительной и мнимой части поверхностного импеданса металла: $\partial R/\partial H = f(H)$ и $\partial X/\partial H = f(H)$. Следует, однако, отметить, что знак производных в наших экспериментах не контролировался.

Амплитуда электромагнитного поля определялась по напряжению на катушке индуктивности $H \sim 0,4 \pi nU/\omega L$, где L — индуктивность катушки с образцом, n — число витков катушки на единицу длины, ω — частота. Эксперименты выполнены при $H \leq 10$ э. При этом максимальный перегрев образца относительно гелиевой ванны был порядка $0,2^\circ\text{K}$.

Постоянное магнитное поле было направлено параллельно плоскости образца. Для уточнения ориентации магнитного поля относительно кристаллографических осей образца использовалось наблюдение линий радиочастотного размерного эффекта.

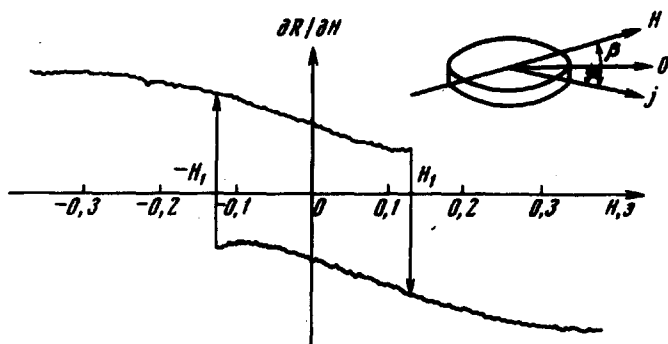


Рис. 1. Пример записи производной действительной части поверхностного импеданса висмута как функции магнитного поля. $H = 6,3$ э, $\alpha = -12^\circ$, $\beta = 25^\circ$, $d = 0,4$ мм, температура гелиевой ванны $1,3^\circ\text{K}$. Схема отсчета углов изображена в правом верхнем углу (C_1 – биссекторная ось, образующая минимальный угол с направлением высокочастотных токов j).

Обнаружено, что при гелиевых температурах и больших значениях H существует область магнитных полей $-H_1 < H < H_1$, в которой образцы висмута могут находиться в нескольких устойчивых состояниях, характеризующихся различными зависимостями производных действительной и мнимой части поверхностного импеданса от магнитного поля. В простейшем случае имеются два таких состояния (рис. 1). Переход из одного состояния в другое происходит скачкообразно при определенных значениях магнитного поля (H_1 и $-H_1$ на рис. 1). Специальными экспериментами было установлено, что скачком при переходе изменяются не только производные, но и сами величины действительной и мнимой части поверхностного импеданса. В общем случае в области $-H_1 < H < H_1$ имеется набор состояний, каждое из которых устойчиво в некотором интервале магнитных полей (рис. 2).

Ширина области магнитных полей $-H_1 < H < H_1$, в которой существуют несколько устойчивых состояний, определяется следующими параметрами: величиной H , ориентацией постоянного магнитного и переменного электромагнитного полей относительно кристаллографических осей образца и температурой. От частоты переменного электромагнитного поля в том диапазоне частот, где мы могли это проверить ($0,3 \div 1,7$ мГц), величина H_1 не зависит.

При фиксированном направлении вектора H область с несколькими устойчивыми состояниями существует, если амплитуда переменного поля превышает критическое значение $H > H_k$ ($H_1 = 0$, при $H \leq H_k$), причем дальнейшее увеличение H приводит к расширению этой области. Критическое значение амплитуды переменного поля возрастает при

повышении температуры образца $\left(\frac{H_K^{\sim}(4,2^{\circ}\text{K})}{H_K^{\sim}(1,5^{\circ}\text{K})} \approx 2 \right)$. Зависимость H_K^{\sim} от направления постоянного магнитного поля изображена на рис. 3.

В нулевом магнитном поле при условии $H^{\sim} > H_K^{\sim}$ висмутовые образцы могут находиться еще в одном (неустойчивом) состоянии. При введении небольшого магнитного поля $H < H_1$ происходит переход в какое-либо из устойчивых состояний. Вернуть образец в исходное неустойчивое состояние можно лишь уменьшив переменное электромагнитное поле до значения $H^{\sim} < H_K^{\sim}$.

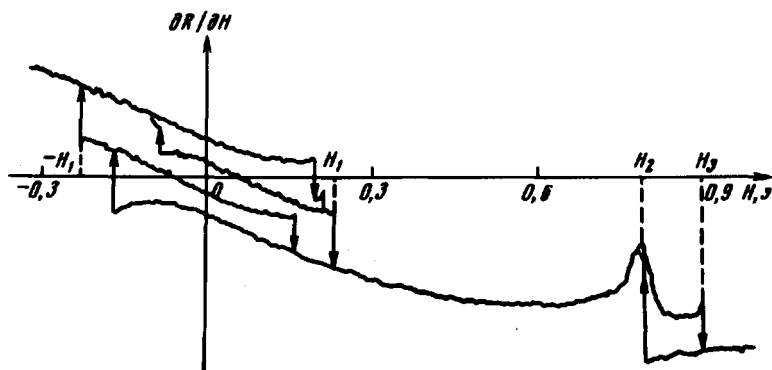


Рис. 2. Запись кривой $\partial R / \partial H = f(H)$ при $H \cong 7,3$ э, $\alpha = -1^{\circ}$, $\beta = -14^{\circ}$, $d = 0,4$ мм. Температура гелиевой ванны $1,3^{\circ}\text{K}$

Область магнитных полей $-H_1 < H < H_1$ является не единственной областью с несколькими устойчивыми состояниями. Явления, аналогичные описанным выше, наблюдаются в угловом интервале $-30^{\circ} < \gamma < 30^{\circ}$ при $H_2(\gamma) < H < H_3(\gamma)$, где $\gamma = \beta - \alpha$ (см. рис. 2).

На наш взгляд полученные результаты имеют следующее объяснение. Известно, что при наличии внешнего магнитного поля в проводниках, облучаемых радиоволнами, может быть возбужден замкнутый постоянный электрический ток. На висмуте подобный ток наблюдали при облучении образцов волнами СВЧ [2]. Одной из причин появления замкнутого постоянного тока может явиться модуляция проводимости собственным магнитным полем волны, накладывающимся на внешнее магнитное поле. При этом величина постоянного тока пропорциональна квадрату амплитуды переменного поля.

Замкнутый электрический ток создает, в свою очередь, постоянное магнитное поле, так что магнитное поле в образце является суммой внешнего поля и поля созданного выпрямленным током. При больших амплитудах радиоволн может оказаться, что при выключении внешнего магнитного поля постоянный ток не исчезает, так как для детектирования достаточно магнитного поля, созданного самим выпрямленным током. Другими словами, при амплитудах переменного поля выше некоторой критической, даже без внешнего магнитного поля возможно существование "токового" состояния металла, в котором замкнутый постоянный ток обтекает образец. В нулевом внешнем магнитном поле име-

ются два эквивалентных "токовых" состояния, отличающихся направлением выпрямленного тока. В зависимости от направления "затравочного" внешнего магнитного поля образец может находиться в любом из этих состояний.

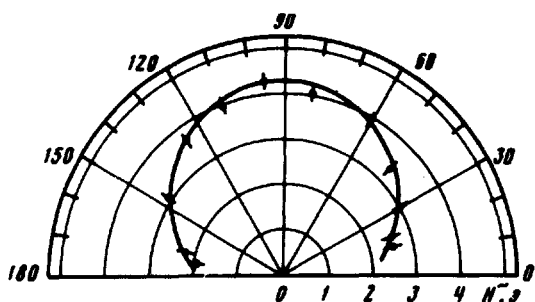


Рис. 3. Зависимость величины H_K от угла между направлением постоянного магнитного поля и высокочастотных токов. Образец толщиной $d = 0,4$ мм при $\alpha = 5^\circ$.

Приведенные соображения позволяют понять многие черты наблюдаемого явления: наличие по крайней мере двух устойчивых состояний, отсутствие зависимости ширины петли от частоты, возрастание H_K при увеличении температуры. Вместе с тем, экспериментально наблюдаемые кривые существенно сложнее, чем это следует из модели (рис. 2). Однако, предлагаемая модель, в принципе, позволяет объяснить существование и большего количества состояний за счет, например, анизотропии магнетосопротивления или разбиения образца на домены. Петля в больших полях (рис. 2) может быть связана с изменением фазовых соотношений между высокочастотными токами и переменным магнитным полем. (Амплитуда выпрямленного тока пропорциональна косинусу фазового угла, а сама фаза определяется величиной полного магнитного поля, то есть суммой внешнего поля и магнитного поля, созданного выпрямленным током).

Для доказательства справедливости предлагаемой модели необходимо прямое обнаружение магнитного поля, созданного замкнутым постоянным током.

Авторы благодарны В.Ф.Гантмахеру, Г.И.Бабкину и Г.И.Левиеву за полезные обсуждения.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
23 января 1973 г.

6 февраля 1973 г.

Литература

[1] А.Леше, Ядерная индукция. ИИЛ. М., 1963.

[2] М.С.Хайкин, С.Г.Семенчинский, Письма в ЖЭТФ, 15, 81, 1972.