

## АНОМАЛЬНЫЙ ИМПЕДАНС СВЕРХПРОВОДНИКА В РЕЗИСТИВНОМ СОСТОЯНИИ, СОЗДАННОМ СВЧ ОБЛУЧЕНИЕМ

*С.К.Толпыго, В.А.Тулин*

Исследована частотная зависимость импеданса тонкой сверхпроводящей пленки в резистивном состоянии, созданном СВЧ облучением. Показано, что для частот  $f \lesssim 300$  МГц импеданс резистивного состояния превышает импеданс нормального состояния.

В предыдущих работах [1, 2] было показано, что тонкая пленка сверхпроводника, помещенная в постоянное магнитное поле параллельное ее поверхности, переходит в резистивное состояние при достижении некоторой критической мощности сверхвысокочастотного (СВЧ) облучения. Этот переход проявляется в виде резкого скачка активной составляющей поверхностного импеданса пленки. После скачка наблюдалась широкая резистивная область как по мощности облучения, так и по магнитному полю, причем для использованных в работах [1, 2] частот облучения импеданс резистивного состояния был всегда меньше импеданса пленки в нормальном состоянии.

Настоящая работа была предпринята с целью изучить некоторые свойства обнаруженного состояния сверхпроводника, в частности его отклик на слабое электромагнитное поле, не совпадающее по частоте с частотой облучения. Мы исследовали пленки алюминия толщиной около 700 Å, напыленные в вакууме на подложки из стекла или кремния.

Сильное СВЧ поле создавалось с помощью спиральной катушки, которая располагалась со стороны подложки параллельно пленке. Для предотвращения воздействия СВЧ поля на края пленки, которые обычно далеки от совершенства, между подложкой и спиралью располагался медный экран с диафрагмой диаметром 3 мм, характерные же размеры пленок около  $1 \times 1$  см<sup>2</sup>. Зазор между образующей спирали и поверхностью пленки составлял около 2 мм. Более подробные сведения о конструкции облучающей ячейки приведены в работе [2]. С противоположной стороны пленки параллельно ей также располагалась спиральная катушка, которая служила для измерения импеданса. Включенная параллельно катушке переменная емкость позволяла менять частоту такого резонансного контура от 150 до 750 МГц. Чтобы избежать возможного влияния неоднородностей поля облучения у краев диафрагмы, между измерительной катушкой и пленкой располагался второй медный экран с диафрагмой диаметром 2 мм. Центры диафрагм в обоих экранах находились на одной оси, а плоскости их были параллельны, так что фактически измерялся импеданс участка пленки в центре пятна находящегося под облучением. Мощность, поступающая в измерительную катушку, была много меньше мощности, поступающей в катушку облучения, а последняя не превышала  $10^{-2}$  Вт. СВЧ магнитные поля обеих катушек были взаимно параллельны и параллельны внешнему постоянному магнитному полю. Вся выше описанная конструкция располагалась в ванне сверхтекучего гелия.

Эксперимент проводился следующим образом при фиксированной температуре и мощности облучения производилась запись зависимости изменения мощности, прошедшей через измерительную катушку, от внешнего магнитного поля. При отсутствии дисперсии это изменение мощности пропорционально изменению активной составляющей импеданса пленки, так как параметры резонатора от магнитного поля не зависят. Для устранения дисперсии в каждом значении магнитного поля производилась подстройка генератора на резонансную частоту контура. На рис. 1 показан пример записи зависимости активной составляющей импеданса пленки от магнитного поля для нескольких частот при облучении на частоте 400 МГц. Видно, что в соответствии с результатами работ [1, 2] в некотором магнитном поле  $H_{k1}$  происходит скачок импеданса. Если частота измерения достаточно высока, то характер изменения импеданса соответствует описанному в [1, 2], а именно, импеданс после скачка меньше импеданса нормального состояния пленки, плавно растет с ростом магнитного поля и достигает уровня нормального состояния в поле равном параллельному критическому  $H_K$ . С уменьшением же частоты измерения величина скачка растет, и начиная с некоторой характерной частоты происходит скачок в состояние, обладающее импедансом большим, чем импеданс нормального состояния пленки. Зависимость импеданса от магнитного поля теперь имеет вид кривой с максимумом, положение которого может и не совпадать с полем  $H_{k1}$ . В поле  $H_K$  импеданс опять становится равным импедансу нормального металла. С уменьшением частоты измерения обнаруженная аномалия импеданса увеличивается. Для характеристики этого на рис. 2 показана зависимость величины  $R_{СК}/(R_N - R_{k1})$  от частоты, где  $R_{СК}$  —

амплитуда скачка,  $R_N$  — импеданс нормального состояния и  $R_S$  — импеданс сверхпроводящего состояния в поле  $H_{k1}$ . Черные точки соответствуют частоте облучения 400 МГц и мощности при которой  $H_{k1}/H_K = 0,78$ , светлые точки получены на другом образце при частоте облучения 700 МГц и  $H_{k1}/H_K = 0,83$ . Характерная частота, начиная с которой импеданс резистивного состояния начинает превышать импеданс нормального металла, несколько меняется от образца к образцу, но всегда остается около 300 МГц. К сожалению нам пока не удалось исследовать диапазон частот ниже 100 МГц, поэтому мы не можем сказать будет ли продолжаться аномальный рост импеданса или выйдет на насыщение, или имеет вид зависимости с максимумом. Мы проводили эксперименты, используя в основном три частоты облучения — 400, 700 и 1000 МГц, качественная картина описанных выше явлений при этом одна и та же. Важно отметить, что если частота облучения становится меньше той же характерной частоты, то импеданс измеренный прямо на частоте облучения тоже имеет аномальный максимум. Поэтому можно утверждать, что аномальное поведение импеданса в резистивном состоянии не связано с тем, что на сверхпроводник воздействуют две электромагнитные волны с разными частотами.

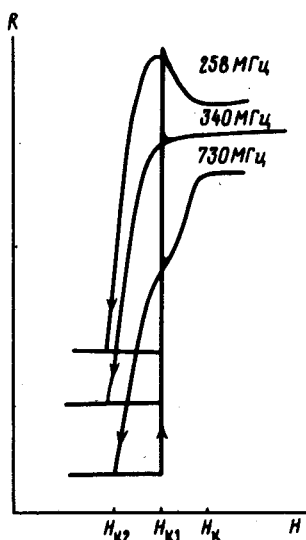


Рис. 1

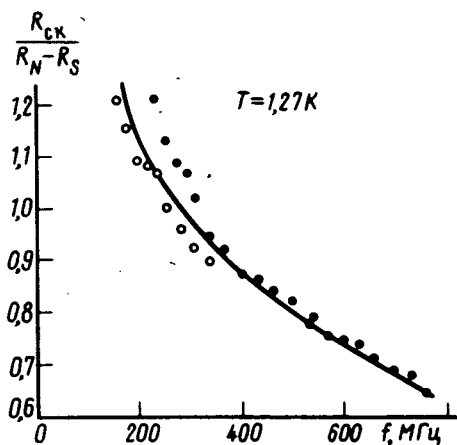


Рис. 2

Рис. 1. Зависимости активной составляющей поверхностного импеданса пленки алюминия с  $T_c = 1,50\text{K}$  от магнитного поля при  $T = 1,27\text{K}$ . Частота СВЧ облучения 400 МГц. Кривые разнесены по оси ординат

Рис. 2. Зависимости активной составляющей поверхностного импеданса пленки алюминия на частоте 169 МГц от магнитного поля для двух мощностей облучения  $P$  на частоте 700 МГц

На рис. 3 представлены записи зависимости активной составляющей импеданса пленки на частоте 169 МГц при облучении на частоте 700 МГц для двух мощностей облучения. С ростом мощности облучения максимальное значение импеданса в резистивном состоянии увеличи-

вается и выходит на насыщение. Сама же куполообразная кривая уширяется в силу того, что уменьшаются поле скачка и поле восстановления сверхпроводимости  $H_{k2}$ . Следует заметить, что даже в отсутствие мощного облучения импеданс вблизи точки фазового перехода  $H_K$  имеет аномальный максимум. Этот максимум также появляется только тогда, когда частота измерения меньше характерной частоты. Мы наблюдали его без мощного облучения и магнитного поля, но теперь уже в узкой окрестности другой точки фазового перехода  $T_c$ .

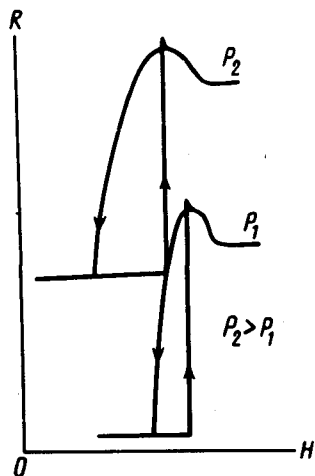


Рис. 3. Частотная зависимость  $\frac{R_{СК}}{R_N - R_S}$

для двух образцов: ● — частота облучения 400 МГц, ○ — 700 МГц. Мощности облучения примерно равны

Вопрос об избыточном по сравнению с нормальным металлом поглощении электромагнитного излучения сверхпроводником возник довольно давно. Это поглощение можно увидеть на экспериментальных кривых ряда работ [3–5] вблизи поля  $H_{c2}$  в смешанном состоянии сверхпроводников. Однако не ясно не содержат ли эти кривые примесь дисперсии, что весьма существенно. Мы наблюдали аномальный максимум импеданса в вихревом состоянии вблизи поля  $H_{c2}$ , когда магнитное поле составляет небольшой угол (до  $\sim 7^\circ$ ) с поверхностью пленки, в отсутствие мощного облучения. Оставляя подробное обсуждение этих результатов на будущее заметим, только, что амплитуда максимума импеданса в этом случае того же порядка, что и в резистивном состоянии. Поэтому можно предположить, что резистивное состояние имеет мелкодисперсную структуру типа смешанного состояния тонкой пленки.

Избыточное поглощение наблюдалось также в области поверхностной сверхпроводимости (см., например, [6]). Характерным в этом случае было наличие зависимости поглощения от взаимной ориентации электрического вектора микроволны и внешнего постоянного магнитного поля. В нашем случае резистивного состояния мы такой зависимости не обнаружили.

Из всего выше сказанного можно заключить, что избыточное поглощение появляется вблизи критических точек сверхпроводника и, возможно, связано с возникновением некоторого неоднородного состояния в сверхпроводнике, которое индуцируется в одних случаях магнитным полем, в других — СВЧ облучением.

## Литература

- [ 1 ] С.К.Толпыго, В.А.Тулин. Письма в ЖЭТФ, 28, 686, 1978.
  - [ 2 ] С.К.Толпыго, В.А.Тулин. ЖЭТФ, 78, 2352, 1980.
  - [ 3 ] R.H.Wite, M.Tinkham. Phys. Rev., 136; 203, 1964.
  - [ 4 ] J.I.Gittleman, B.Rosenblum. J. Appl. Phys., 39, 2617, 1968.
  - [ 5 ] P.Monceau, D.Saint-James, Q.Waysand. Phys. Rev., B12, 3673, 1975.
  - [ 6 ] И.Я.Краснополин, Радж Рупп, М.С.Хайкин. Письма в ЖЭТФ, 15, 516, 1972.
-