

УДК 537.362

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ДЕ ГААЗА – ВАН АЛЬФЕНА В ВТСП $YBaCuO$

А. И. Быков¹, А. И. Головашкин, М. И. Долотенко¹, О. М. Иваненко,
Н. П. Колокольчиков¹, Ю. В. Кудасов¹, К. В. Мицен, В. В. Платонов¹, О. М. Таценко¹

Выполнены низкотемпературные (4,2 К) измерения осцилляций намагниченности ориентированных поликристаллических образцов ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ при изменении магнитного поля до 300 Тл. Магнитные поля создавались с помощью магнитокумулятивного генератора МК-1 методом сжатия магнитного потока цилиндрической детонационной волной. Фурье-анализ сигналов намагниченности в полях $B > B_{c2}$ показал наличие осцилляций с частотами 3, 8, 10, 13 и 20 кТл.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению свойств ВТСП, вопрос о природе нормального состояния в этом классе соединений остается до сих пор открытым. Некоторые предположения о существовании поверхности Ферми в ВТСП были сделаны на основе анализа результатов экспериментов по позитронной аннигиляции и фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением [1], однако трудности с интерпретацией этих данных не позволили сделать однозначных выводов. Измерение эффекта де Гааза – ван Альфена (дГВА) дает прямую информацию о поверхности Ферми и может пролить свет на природу нормального состояния ВТСП. Этот эффект проявляется в периодических по обратному магнитному полю осцилляциях магнитной восприимчивости и является следствием квантования электронных состояний в магнитном поле. Частота осцилляций магнитной восприимчивости F пропорциональна площади экстремального сечения поверхности Ферми A_{ext} перпендикулярного к направлению поля:

¹НИИ экспериментальной физики, 607200 Арзамас-16, Россия.

$$F = \hbar c A_{ext} / 2\pi e.$$

Оценка возможности экспериментального наблюдения осциллирующей магнитной восприимчивости приводит к довольно жестким требованиям, предъявляемым к условиям эксперимента. Во-первых, для наблюдения эффекта необходимо, чтобы электрон в металле совершал циклическое движение, что возможно лишь в том случае, когда длина свободного пробега l превосходит размер циклотронной орбиты в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Т.е. величина квантующего поля ограничена снизу значением H_l , зависящим от l , при котором характерный размер орбиты сравним с длиной свободного пробега. Если принять для ВТСП $l = 10$ нм, то величины требуемых полей должны составлять более 50 Тл (в зависимости от принятой эффективной массы m). Кроме того, температуры должны быть достаточно низкими для соблюдения условия $kT \ll \hbar\omega_c$, где ω_c – циклотронная частота $\omega_c = eH/mc$, т.е. условия малости температурного уширения уровней Ландау по сравнению с расстоянием между уровнями. Низкие температуры нужны также для того, чтобы длина свободного пробега относительно рассеяния на фононах была достаточно большой, сравнимой с размером циклотронной орбиты. Обычно измерения эффекта дГВА проводятся в нормальном состоянии, когда поле полностью проникает в образец и одно из основных требований – однородность магнитного поля по объему образца. В ВТСП выполнение этих условий связано с большими трудностями, т.к. для перевода ВТСП в нормальное состояние при низких температурах нужны поля, превышающие 100 Тл.

Однако наблюдать эффект дГВА можно и в сверхпроводящем состоянии [2] несмотря на то, что магнитное поле проникает в сверхпроводник крайне неоднородно из-за вихревой структуры. Возможность наблюдения осциллирующей дГВА в сверхпроводящем состоянии связана с тем, что этот эффект является чисто квантовым по природе, аналогично эффекту Аронова – Бома. Распределение магнитного потока внутри орбиты не имеет значения, поскольку квантование фазового интеграла не зависит от распределения магнитного потока внутри контура интегрирования и определяется только интегральным потоком через циклотронные орбиты $(2e/\hbar) \oint A ds = 2\pi n$.

Таким образом, при полях меньших верхнего критического поля (в сверхпроводящем состоянии) это условие означает, что число абрикосовских вихрей через каждую циклотронную орбиту должно быть с высокой точностью постоянным. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы циклотронную орбиту пронизывало достаточно

большое число квантов. Оценка размера циклотронной орбиты для $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в перпендикулярном поле 50 Тл дает величину ~ 100 нм. Это соответствует ~ 10 квантам потока в пределах орбиты, что явно недостаточно для того, чтобы говорить о постоянстве потока. Этим фактором можно объяснить неустойчивый характер осцилляций в экспериментах [3], выполненных на образцах $YBaCuO$ в полях до 50 Тл. В работе [4] измерения эффекта дГВА проводились в полях до 100 Тл, однако никакой информации о состоянии образца (нормальном или сверхпроводящем) не имеется. Мы считаем, что для уверенной интерпретации экспериментальных результатов необходимо, чтобы образец падал в нормальном состоянии, т.е. для наблюдения эффекта дГВА в полях перпендикулярных слоям необходимы поля выше 100 Тл.

В настоящее время в лабораторной практике удается получать постоянные магнитные поля до 25 – 30 Тл с помощью гибридного магнита, а также импульсные поля до 70 – 80 Тл разрядом конденсатора через специально сконструированные катушки. Единственный метод получения полей выше 100 Тл, необходимых для исследования эффекта дГВА в ВТСП, является сжатие магнитного потока детонационной волной. Для получения магнитных полей до 300 Тл нами был использован магнитокумулятивный генератор МК-1. Магнитное поле в МК-1 создается разрядом конденсаторной батареи и дальнейшим сжатием магнитного потока детонационной волной. Время нарастания импульса поля ≈ 20 мксек. Ранее [5] на этом же генераторе нами были измерены значения верхнего критического поля $B_{c2}(T)$ для $YBaCuO$. Было найдено, что $B_{c2}(4,2 K) \approx 160$ Тл.

Измерения в таких высоких импульсных полях накладывают определенные ограничения на исследуемые образцы [4]. Монокристаллы $YBaCuO$ размером порядка 10 мм погружались в жидкую эпоксидную смолу и смесь медленно полимеризовалась в течение 8 – 12 часов в постоянном магнитном поле 8 Тл. В результате получались образцы ($d = 1$ мм длиной 4,5 мм) с ориентацией оси "с" вдоль поля с точностью порядка 2° , содержащие около 17% объема сверхпроводящих монокристаллов, что ниже порога перколяции, который составляет 31%. Таким образом, магнитное поле легко проникает между гранулами за время импульса. Для данных измерений образец был любезно предоставлен нам проф. Мюллером из Лос-Аламосской Национальной Лаборатории.

Измерительный узел для регистрации эффекта дГВА представлял собой две пары намотанных навстречу друг другу катушек, сбалансированных с высокой точностью по емкости и индуктивности в широком диапазоне частот. Катушки наматывались непосредственно на образец $YBaCuO$ или на стеклянные цилиндры. Диаметр катушек

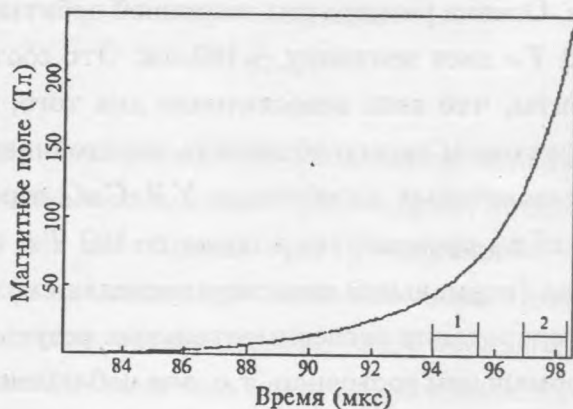


Рис. 1. Временная зависимость магнитного поля в генераторе МК-1 в процессе сжатия магнитного потока взрывной волной. Цифрами 1 и 2 отмечены интервалы с минимальным уровнем шумов.

1 мм, число витков 30, намотка осуществлялась проводом ПЭТВ-2 диаметром 70 мкм. Пары катушек стекло-стекло и стекло- $YBaCuO$ располагались на стеклотекстолитовом держателе симметрично относительно оси генератора сверхвысокого магнитного поля. Узел стекло-стекло использовался для записи шумового сигнала. Охлаждение измерительного узла осуществлялось жидким гелием. Магнитное поле измерялось зондами. На рис. 1 показана экспериментальная зависимость магнитного поля, усиленного сжатием взрывной цилиндрической волной, от времени.

Для анализа дГВА сигнала были выделены два временных интервала 94,0 – 94,7 мксек и 96,8 – 98,2 мксек, соответствующие интервалам полей 50 – 85 Тл ($B < B_{c2}$) и 140 – 230 Тл ($B > B_{c2}$). Выбранные интервалы характеризовались наименьшей величиной шума. (Шумы имели характерную частоту 5 – 7 МГц и наблюдались на осциллограммах, полученных как от измерительных узлов, так и от зондов магнитного поля. Возможная причина этого шума – взрыв оболочки металлodieлектрического каскада.) На рис. 2 представлены осциллограммы сигнала дГВА от пары $YBaCuO$ и стекло (а) и шумовой сигнал от пары стекло – стекло (б) для интервала 140 – 230 Тл. Для выбранных временных интервалов был проведен Фурье-анализ сигналов. На интервале 50 – 85 Тл отчетливых пиков эффекта дГВА, превышающих уровень шума, не наблюдалось. Спектр на участке, соответствующем полям 140 – 230 Тл, представлен на рис. 3. Здесь приведены спектральные плотности как сигнала, так и шума.

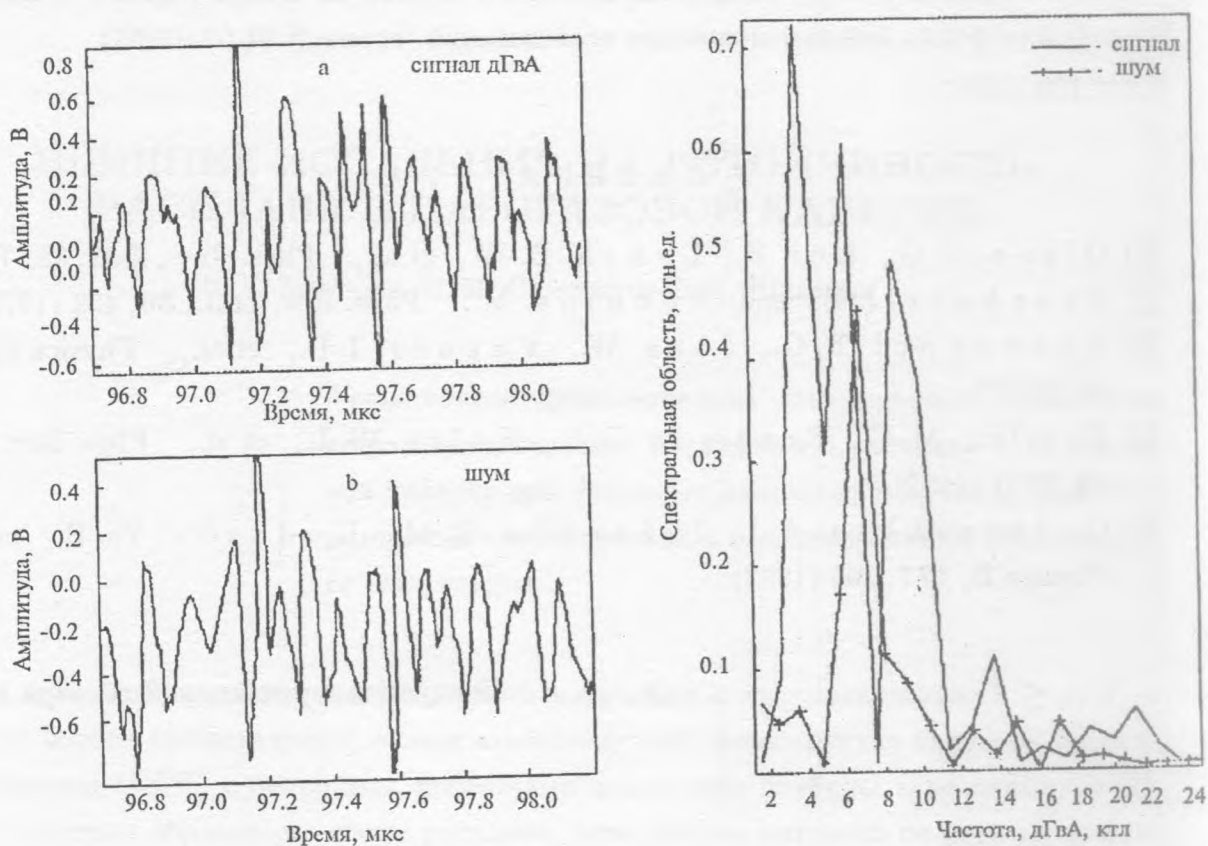


Рис. 2. Осциллограммы сигналов в интервале 96,8 – 98,2 мксек (140 – 230 Тл): а) сигнала намагниченности с измерительной пары $YBaCuO$ -стекло; б) шумового сигнала с пары стекло-стекло.

Рис. 3. Спектральные плотности сигнала намагниченности и шума, полученные Фурье-преобразованием сигнала, показанного на рис. 2.

В спектре сигнала можно выделить четыре пика, соответствующие частотам 3,8, 10, 13 и 20 кТл. Пик при 6 кТл совпадает с максимумом шумового сигнала. Пик при 3,8 кТл соответствует расчетной частоте 3,7 кТл и экспериментально наблюдался в [4]. Появление частотного максимума при 10 кТл также следует из теоретических расчетов. Эта частота соответствует экстремальному сечению типа "бочка" и ранее экспериментально не наблюдалась. Амплитуды пиков при 13 и 20 кТл лишь незначительно превосходят шумовую. Для однозначного заключения об их природе требуется проведение дополнительных измерений.

Работа выполнена при поддержке Научного Совета по ВТСП (проект N 92079) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 94-02-05307).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Olson C. G., Lui R., Lynch D. W., et al., Phys. Rev., **B42**, 381 (1990).
- [2] Graebner J. E. and Robbins M., Phys. Rev. Lett., **36**, 422 (1976).
- [3] Haanappel E. G., Joss W., Wagner I. D., et al., Physica C, **209**, 39 (1993).
- [4] Fowler M. C., Freeman B. L., Hults W. L., et al., Phys. Rev. Lett., **68**, 3937 (1992).
- [5] Golovashkin A. I., Ivanenko O. M., Kudasov Yu. B., et al., Physica B, **177**, 105 (1992).

Поступила в редакцию 2 декабря 1994 г.