Физика низких температур, 1996, т. 22, № 6, с. 669–671

Прямые измерения эффекта Бернулли в сверхпроводниках

Ю. Н. Цзян, О. Г. Шевченко

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47

Предложен метод измерения величины потенциала Бернулли в сверхпроводниках при скорости электронов близкой к критической. Измерена максимальная величина потенциала Бернулли в сверхпроводнике I рода (тантал). Найденное значение указывает на соответствие массы электрона в куперовской паре массе свободного электрона.

Запропоновано метод вимірювання величини потенціалу Бернуллі у надпровідниках при швидкості електронів близькій до критичної. Виміряно максимальну величину потенціалу Бернуллі у надпровіднику I роду (тантал). Знайдене значення свідчить про відповідність маси електрона в куперівській парі масі вільного електрона.

В последнее время в связи с появлением ВТСП возобновился интерес к исследованию в сверхпроводниках явлений, обусловленных эффектом Бернулли, возможность проявления которого, как указывал Лондон [1], непосредственно вытекает из электродинамических свойств сверхпроводников. Эффект состоит в возникновении электрического поля (разности потенциалов) в объеме сверхпроводника с током между его частями с неравной плотностью тока, что приводит к изменению плотности поверхностных зарядов, т.е. электростатического потенциала сверхпроводника в целом.

Подобно эффекту Холла в обычных проводниках поле Бернулли направлено перпендикулярно току. Однако на этом аналогия с эффектом Холла заканчивается, поскольку напряжение Бернулли, в отличие от напряжения Холла, не может быть измерено с помощью вольтметра (мы исключаем случай смешанного состояния сверхпроводников II рода), как это неоднократно обсуждалось [2, 3]. В силу симметрии задачи поверхность сверхпроводника I рода является поверхностью равного потенциала, в отличие от поверхности нормального проводника, в котором реализуется эффект Холла. Действительно, из уравнения Лондона

$$\mathrm{rot}\ \mathbf{v}_s = -\frac{e}{m}\frac{\mathbf{H}}{c} \qquad (1)$$

($\mathbf{v}_s$ — скорость «сверхтекучей» компоненты тока; e, m — соответственно заряд и масса электрона; c — скорость света) и теоремы Бернулли

$$eU + 1/2 m v_s^2 = \mathrm{const} \qquad (2)$$

(U — электростатический потенциал) следует, что поле Бернулли

$$\mathbf{E} = -\ \mathrm{grad}\ U = \frac{1}{c}(-\mathbf{v}_s \times \mathbf{H}) . \qquad (3)$$

У противоположных поверхностей сверхпроводника 1 и 2 собственное поле тока H принимает значения $H_{1,2} = \pm|\mathbf{H}|$ и соответственно $E_{1,2} = \mp|\mathbf{E}|$. Следовательно, потенциалы противоположных поверхностей сверхпроводника равны: $U_1 = U_2 = U$.

В этой ситуации исследования поверхностного электростатического потенциала можно проводить в разрыве цепи, нарушающем непрерывность химического потенциала, т.е. емкостным методом. Попытки измерить потенциал Бернулли таким образом предпринимались неоднократно [4–8]. Хотя качественные доказательства обнаружения эффекта Бернулли в сверхпроводниках не вызывают сомнения, количественные результаты чаще всего не соответствовали тем предсказаниям теории, которые могли бы быть использованы для проверки некоторых фундаментальных соотношений.

Поскольку $\mathbf{H} \perp \mathbf{v}_s$, из (3) следует, что поле Бернулли квадратично по току, а максимальное напряжение $\Delta\Phi$ на конденсаторе, одна из обкладок которого является сверхпроводником, при $v_s \approx v_c$ (v_c — критическая скорость сверхпроводящих электронов) должно составлять [1,2,8]

$$\Delta\Phi = \frac{2e}{mc^2}\lambda^2(0)\, H_c^2(T) , \qquad (4)$$

© Ю. Н. Цзян, О. Г. Шевченко, 1996

$\lambda(0)$ — глубина проникновения при $T = 0$; $H_c(T)$ — критическое поле; T — температура.

При 4,2 К разность потенциалов на конденсаторе с проволочной обкладкой из Pb ($H_c \approx 350$ Э, $\lambda(0) \approx 40$ нм) не превышает 670 нВ, для Та ($H_c \approx \approx 50$ Э) — 20 нВ, если полагать, что эффективная масса сверхпроводящих электронов m соответствует массе свободных электронов. Как показывает недавняя дискуссия [9], измерение эффективной массы куперовских пар до сих пор остается одной из наиболее актуальных задач эксперимента, и исследование эффекта Бернулли предоставляет такую возможность как для традиционных, так и в особенности для высокотемпературных сверхпроводников.

Постановка эксперимента

В термодинамическом равновесии системы проводников, образующих электрическую цепь с конденсатором, последний «заряжен» до потенциала, соответствующего контактной разности потенциалов порядка электрон-вольта. По этой причине метод Кельвина измерения электростатических потенциалов (метод вибрирующих пластин конденсатора) для измерения потенциалов Бернулли нановольтового уровня не пригоден. Четность по току потенциала Бернулли, вытекающая из (4), позволяет использовать квазистационарный ток, выделяя его вторую гармонику в качестве искомого сигнала. При этом, однако, необходимо сделать так, чтобы электрохимический потенциал регистрирующей цепи, а с ним и контактная разность потенциалов не нарушались. Эти требования соблюдаются в конфигурации использованной нами измерительной схемы, показанной на рис. 1,*а*. В нашем эксперименте конденсатором служила система из двух близко расположенных параллельных проволочных проводников диаметром 50 мкм каждый (измеренная емкость такого проволочного конденсатора составляла 140 пФ). Один из них — проволока из Та (образец). Второй — нормальный металл (нихром). Потенциал Бернулли в сверхпроводящей проволоке при температуре $T = 4{,}2$ К $= (T_c - 0{,}18$ К) возбуждался с помощью квазистационарного тока I частотой $f = 21{,}5$ Гц и формы, показанной на рис. 1,*а*, обеспечившей подавление четных гармоник в регистрирующей цепи (первичной обмотке низкотемпературного трансформатора) до уровня 1 мкА при амплитуде тока через образец 1 А. Амплитуда тока выбиралась несколько больше его критического значения, так что дважды за период конденсатор «заряжался» потенциалом Бернулли максимально возможной величины, определяемой выражением (4). Разряд конденсатора, т.е. измерение его потенциала, осуществлялся через первичную обмотку низкотемпературного трансформатора T с постоянной времени затухания амплитуды порядка $1/2f$. Полезный сигнал частотой $2f$ выделялся с помощью синхронного детектирования и усреднялся по результатам измерений для двух противоположных фаз питающего образец тока, коммутация которых осуществлялась переключателем F. Фаза сигнала Бернулли при этом не может изменяться, в то время как фаза любых индукционных паразитных сигналов изменяется соответственно изменению фазы исходного сигнала.

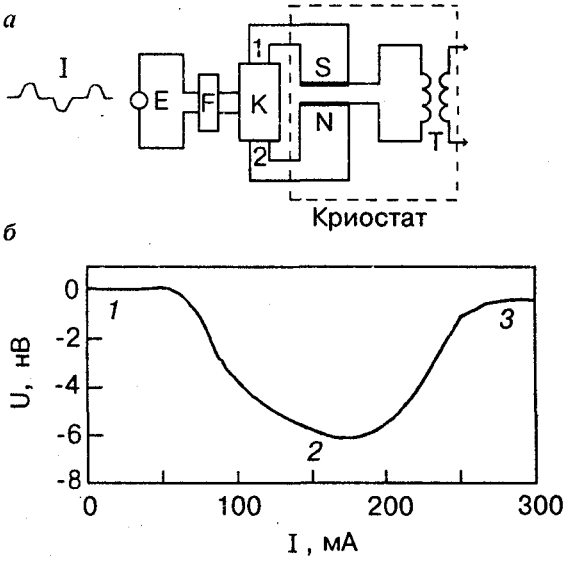

Рис. 1. Схема измерения: E — источник тока; F — переключатель фазы; K — коммутатор тока; T — трансформатор; S — сверхпроводник; N — нормальный металл (*а*). Зависимость сигнала Бернулли от амплитуды квазистационарного тока, переключающего состояние сверхпроводника. Ток проходит через нормальный металл при температуре ванны 4,2 К (*б*).

Результаты и обсуждение

На рис. 1,*б* и 2 показаны усредненные по записям с самописца зависимости сигнала частотой $2f$ от амплитуды тока I частотой f, пропускаемого через одну из обкладок проволочного конденсатора.

В первом случае (рис. 1,*а*, положение *2* переключателя K) ток пропускался через обкладку из нормального металла (N) — высокоомную нихромовую проволоку ($R = 50$ Ом) — с двойной целью: периодически переключать магнитно-тепловым образом резистивное состояние сверхпроводящей обкладки (S) и, кроме того, за счет нагрева повышать температуру сверхпроводника от температуры термостата (4,2 К) вплоть до критической (4,38 К). При некоторых значениях тока сигнал частотой $2f$ возникал, нелинейно увеличивался с ростом тока, достигал максимума и исчезал при $T \geq T_c$. Сигнал вел себя в соответствии с характером проявления потенциала Бернулли при

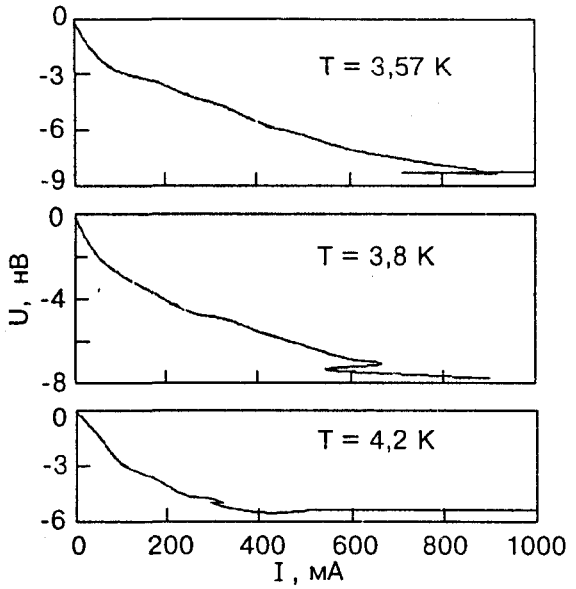

Рис. 2. Зависимость сигнала Бернулли от амплитуды квазистационарного тока, переключающего состояние сверхпроводника. Ток проходит через сверхпроводник при разных температурах ванны.

переходе от не коммутирующего состояние сверхпроводника режима *1* (рис. 1,*б*), когда нет сигнала ($I < I_c$) через коммутирующий режим *2*, когда сигнал существует, а затем снова к некоммутирующему режиму 3, который устанавливается после того, как температура сверхпроводника за счет разогрева нихромовой нитью достигает критического значения. Этот результат (рис. 1,*б*) наглядно демонстрирует то обстоятельство, что электростатический потенциал сверхпроводника изменяется даже при отключенном от сверхпроводника источнике тока при переключении его состояния из сверхпроводящего в нормальное и обратно благодаря возникающим на поверхности сверхпроводника индукционным токам. Поскольку плотность последних не могла быть измеренной, полученный результат служил только в качестве доказательства того, что наблюдаемый сигнал не является паразитным, который мог лишь монотонно возрастать с ростом тока.

Для количественных оценок величины потенциала Бернулли измерения проводились при пропускании тока через сверхпроводник *S* (рис. 1,*а*, положение *1* переключателя *K*). Результаты таких измерений для нескольких температур представлены на рис. 2. В отличие от предыдущего случая, здесь температура сверхпроводника остается постоянной либо восстанавливается до температуры термостата после каждого импульса тока, если амплитуда последнего достигает или превосходит критическое значение. По этой причине режим подобный режиму 3 в предыдущем случае здесь не реализуется, и сигнал выходит на насыщение, уровень которого в принципе мог бы соответствовать максимальной величине потенциала Бернулли, оцениваемой из выражения (4). В действительности, в связи с «размазанностью» сверхпроводящего перехода по мере увеличения критического тока, при понижении температуры происходит заметный разогрев сверхпроводника в состоянии далеком от истинно нормального (скачки на кривых рис. 2). Хотя тенденция к изменению уровня насыщения по мере понижения температуры ванны с жидким гелием и наблюдается, как это предсказывается выражением (4), количественные оценки величины потенциала Бернулли разумно делать для условий, соответствующих минимальному отличию температуры ванны от критической температуры сверхпроводника, т.е. для кривой, измеренной при температуре ванны 4,2 К. Оценки показывают, что при этой температуре разогрев сверхпроводника на вершине импульса тока с амплитудой, соответствующей критическому значению тока, приводит к уменьшению H_c по сравнению с его значением при 4,2 К (≈ 50 Э) примерно в 1,5 раза, что, в соответствии с (4), дает значение потенциала Бернулли ≈ 7 нВ. Это весьма близко к тому уровню сигнала насыщения, который демонстрирует нижняя кривая на рис. 2.

Таким образом, результаты прямого эксперимента по измерению потенциала Бернулли в сверхпроводнике I рода непосредственно указывают на соответствие между массой сверхпроводящего электрона в куперовской паре и массой свободного электрона.

После преодоления значительных технологических трудностей при изготовлении «конденсатора» с необходимыми параметрами мы надеемся провести аналогичный эксперимент на материалах ВТСП.

1. F. London, *Superfluids*, Wiley, New York (1950).
2. T. K. Hunt, *Phys. Lett.* **22**, 42 (1966).
3. P. Nozieres and W. F. Vinen, *Phil. Mag.* **14**, 667 (1966).
4. J. B. Brown and T. D. Morris, in: *Proc. 11th Int. Conf. Low Temp. Phys.*, St. Andrews (1968), p. 768.
5. T. D. Morris and J. B. Brown, *Physica* **55**, 760 (1971).
6. J. Bok and J. Klein, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 660 (1968).
7. R. J aggi, *Phys. Rev.* **122**, 448 (1961).
8. Ю. Н. Цзян, О. Г. Шевченко, *ФНТ* **12**, 816 (1986).
9. T. M. Mishonov, *Phys. Rev.* **B50**, 4009 (1994).

Direct measurement of the Bernoulli effect in superconductors

Yu. N. Chiang and O. G. Shevchenko

A method of measuring the Bernoulli potential in superconductors when the electron velocity approaches the critical one is suggested. The maximum value of the Bernoulli potential in a type-I superconductor (Ta) is measured. The magnitude obtained indicates that the effective mass of an electron in the Cooper pair is consistent with that of a free one.