

Сверхпроводящий эффект близости.

В современной физике сверхпроводимость является одним из наиболее изучаемых явлений. Эффект потери сопротивления металлом при низких температурах, открытый Камерлинг-Оннесом в 1911 году, получил микроскопическое объяснение лишь в конце 1950-х годов в теории Бардина, Купера и Шриффера (БКШ). Исследования показали, что отсутствие сопротивления электрическому току есть лишь одно из широкого круга явлений, связанных со сверхпроводимостью. В частности, результатом глубокого понимания природы сверхпроводящего состояния явилось открытие эффекта Джозефсона, который заключается в возможности протекания в отсутствие напряжения бездиссипативного тока в контакте между двумя сверхпроводниками через так называемую слабую связь (в простейшем случае – область, сделанную из несверхпроводящего вещества). Помимо фундаментальной важности многих задач, связанных со сверхпроводимостью, интерес к ним обусловлен также многочисленными практическими применениями.

В последние годы в связи с совершенствованием экспериментальной технологии стало возможным изучение сверхпроводимости на очень малых масштабах (которые в то же время больше межатомных), эту область исследований можно назвать сверхпроводящей мезоскопией. Многие эффекты в этой области связаны с явлением, теоретически предсказанным в работах А.Ф.Андреева (1964). Оказалось, что на границе раздела сверхпроводника и нормального металла имеет место необычное отражение квазичастиц, так называемое андреевское отражение, при котором электрон, падающий из нормального металла, отражается в виде дырки, летящей ровно назад.

С системами, в которых осуществляется контакт между сверхпроводником и нормальным металлом, связана совокупность явлений, называемая эффектом близости (иными словами, это эффекты взаимовлияния двух веществ). Характерный пространственный масштаб эффекта близости имеет порядок сверхпроводящей длины когерентности (ориентировочно – от десятков нанометров до микронов, в зависимости от системы). Именно на такую глубину сверхпроводимость «проникает» в нормальный слой, т.е. нормальный металл вблизи границы приобретает сверхпроводящие свойства (рис. 1). Исследование SN систем (S – сверхпроводник, N – нормальный металл) было начато еще около пятидесяти лет назад, однако технология, позволяющая получать и исследовать экспериментальные образцы мезоскопических размеров, была создана сравнительно недавно.

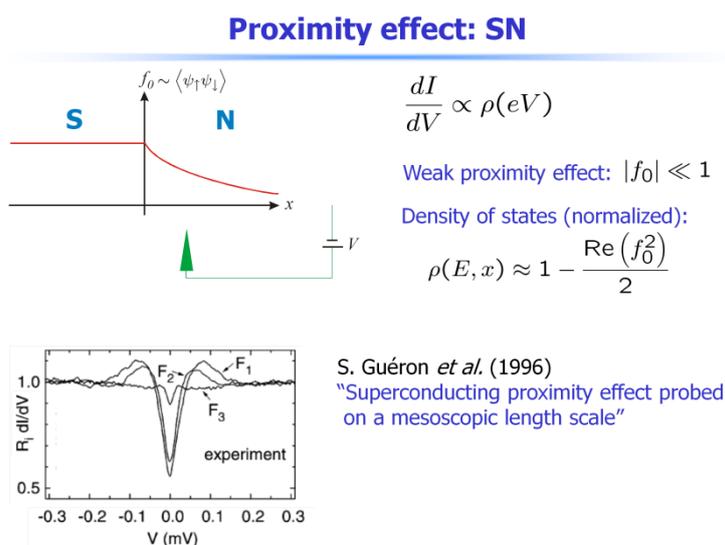


Рис. 1. Эффект близости в SN контакте. Функция f_0 характеризует сверхпроводимость в каждой точке системы.

Proximity effect: SF

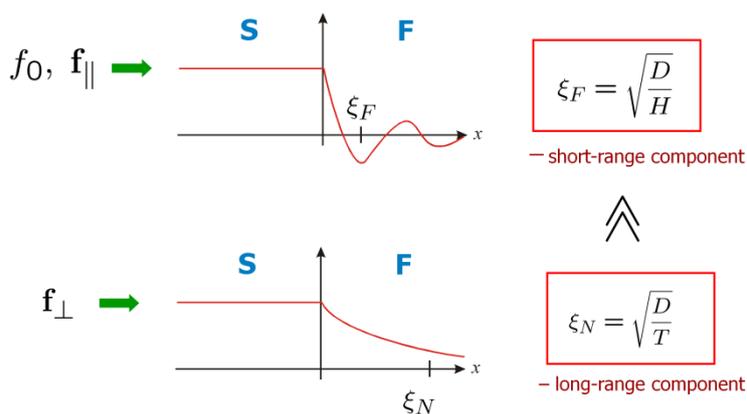
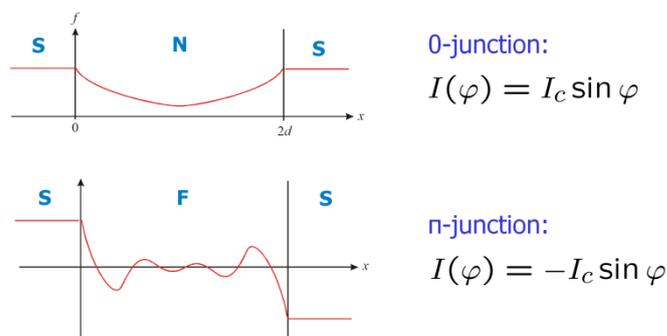


Рис. 2. Эффект близости в SF контакте. В системе возникает несколько сверхпроводящих компонент, по-разному проникающих в F слой.

С практической точки зрения такие гибридные контакты дают возможность «тонкой подстройки» сверхпроводящих свойств образца (таких, например, как энергетическая щель в спектре одночастичных возбуждений или критическая температура сверхпроводящего перехода) с помощью относительно легко контролируемых экспериментальных параметров, таких как толщины слоёв и свойства границ между ними. Возможность такого контроля интересна как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения (гибридные контакты могут найти применение в нано- и микроэлектронике).

Еще богаче физика эффекта близости в SF системах (F – ферромагнетик). Если в SN системах сверхпроводимость, грубо говоря, становится «разбавленной» за счёт N слоя, то в SF системах могут возникать особенности, не существующие в S и F слоях по отдельности. То есть комбинация различных материалов может приводить к качественным новым мезоскопическим эффектам, возникающим вблизи границы (рис. 2). Сверхпроводимость и ферромагнетизм – это два различных типа упорядочения (реализующиеся при достаточно низких температурах). Сверхпроводимость связана с образованием куперовских пар электронов, в которых, в простейшем случае, спины электронов противоположны. В ферромагнитном же состоянии спины электронов смотрят в одну сторону. Поэтому два этих состояния вещества противоречат друг другу, и объединить их в объёмном веществе очень трудно. Однако в гибридных SF системах «источники» двух различных электронных фаз разделены в пространстве, и два различных состояния встречаются друг с другом лишь возле границы. Результатом этой встречи является образование вблизи границы довольно необычного состояния. Естественно ожидать, что сверхпроводящие свойства, наведённые в несверхпроводящем слое за счёт эффекта близости, будут спадать при удалении от границы. Именно такая ситуация имеет место в SN системах. В то же время, в SF системах спадание сопровождается осцилляциями. При определённом соотношении толщины F прослойки в джозефсоновском SFS контакте и длины волны осцилляций может реализоваться так называемый пи-контакт, в котором критический джозефсоновский ток формально отрицателен (рис. 3). Такой контакт был экспериментально получен в 2001 году в ИФТТ РАН (Черноголовка) группой В.В.Рязанова.

Josephson effect



Long-range triplet component: monotonic (no oscillations) like in SN

Nevertheless: π -junction due to $\pi/2$ shifts at the SF interfaces
(the solution is discontinuous due to interface resistance)

Рис. 3. Эффект Джозефсона в SNS и SFS контактах. В случае SFS сверхпроводящие корреляции осциллируют в F слое, поэтому возможно состояние пи-контакта.

Кроме того, в SF контактах вблизи границы возникает необычное сверхпроводящее состояние, так называемая триплетная нечётная по частоте сверхпроводящая компонента. Возможность реализации такого состояния в объёме была когда-то предложена В.Л.Березинским (1974). Однако в объёме такое состояние может оказаться неустойчивым, а вот вблизи границы в SF контактах оно реализуется без сомнений. Это явление подробно обсуждалось начиная с 2001 года группой F.S.Bergeret, А.Ф.Волков, К.Б.Ефетов (особенно интересен случай неоднородной намагниченности F слоя). Оказывается, что неоднородная намагниченность ферромагнетика приводит к возникновению триплетных корреляций с одинаково направленными спинами электронов в куперовской паре путем «конвертации» из обычных синглетных куперовских пар (т.е. пар с противоположными спинами). Такие триплетные куперовские пары могут проникать в F слой гораздо глубже, чем обычные синглетные (рис. 2), и с этим связан ряд интересных и необычных явлений.

Например, в системе SFF с двумя ферромагнетиками критическая температура сверхпроводящего перехода T_c зависит от угла между намагниченностями F слоёв, причём немонотонным образом (рис. 4). Минимум вблизи ортогональной ориентации связан с генерацией в системе триплетных сверхпроводящих корреляций. Выбирая рабочую температуру такого устройства между экстремумами T_c , можно «включать» и «выключать» сверхпроводимость в системе, вращая намагниченность одного из F слоёв слабым внешним магнитным полем. Это означает возможность реализации так называемого триплетного спинового клапана. Вскоре после теоретического предсказания такой эффект был обнаружен экспериментальной группой под руководством И.А.Гарифуллина.

Triplet spin valve

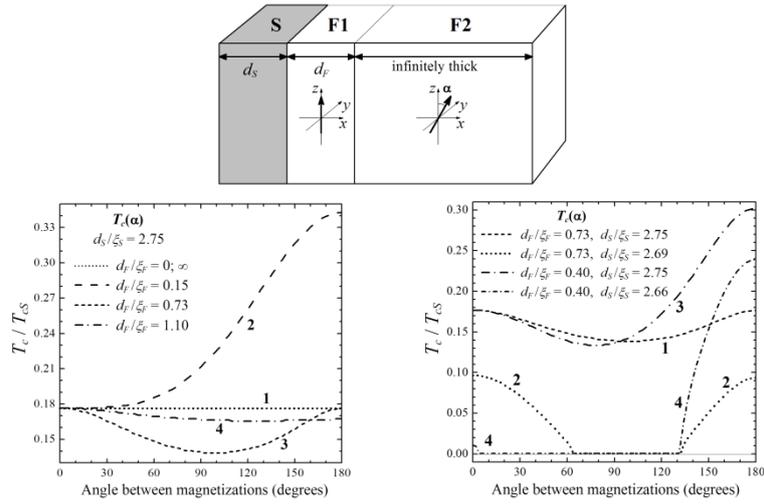


Рис. 4. Зависимость критической температуры T_c от угла между намагниченностями двух ферромагнетиков в SFF контакте. Триpletный спиновый клапан: T_c зависит от угла немонотонно, минимум вблизи ортогональной ориентации.