

При $T=0$ К в сверхпроводнике над щелью таких нормальных электронов нет. Оказалось, что ширина щели зависит от температуры. Она максимальна при $T=0$ К и обращается в нуль, т. е. щель исчезает при $T=T_c$.

11.8. КВАНТОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Выталкивание магнитного потока из сверхпроводника, которое обсуждалось выше, наблюдается в том случае, когда сверхпроводящий образец является сплошным. Предположим теперь, что сверхпроводник имеет сквозную полость. Если с этим образцом попытаться повторить эксперимент, изображенный на рис. 11.3, то результат будет таким, как показано на рис. 11.11. При температурах выше T_c магнитный поток проходит как через сам образец, так и через полость. Охлаждение образца до температур ниже T_c приведет к тому, что вещество станет идеальным диамагнетиком и магнитный поток будет вытолкнут из него. Несмотря на отсутствие магнитного потока в веществе поток в полости останется.

Выше мы говорили, что магнитный поток в сверхпроводящем материале уничтожается за счет возникающих незатухающих поверхностных токов, которые создают намагниченность, направленную против внешнего поля. Эти токи, обозначенные на рисунке через i_1 , должны также уничтожить и магнитный поток в полости. Однако, как показывает эксперимент, этот поток существует, следовательно, он должен создаваться токами i_2 , текущими в противоположном токам i_1 направлении по поверхности полости.

Поскольку в сверхпроводящем состоянии сопротивление контура равно нулю, токи будут незатухающими. Если теперь выключить внешнее магнитное поле, то магнитный поток внутри полости будет поддерживаться этими незатухающими токами.

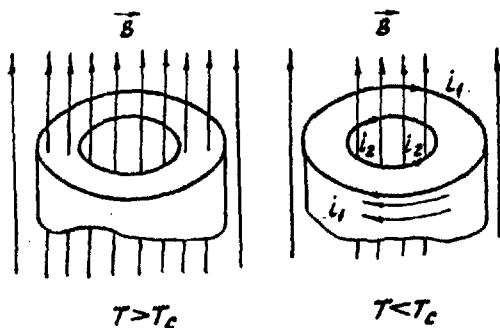


Рис. 11.11. Сверхпроводник со сквозной полостью в магнитном поле

Считая, что сверхпроводимость представляет собой сугубо квантовое явление, Ф. Лондон в 1950 г. предположил, что за-
хваченный магнитный поток должен быть равен целому числу
«квантов потока $\Phi_0 L$ », причем

$$\Phi_0 L = \frac{h}{e}. \quad (11.6)$$

Здесь, как и ранее, h — постоянная Планка, e — заряд электрона.

При этом предполагалось, что сверхпроводящий ток переносится отдельными электронами. В экспериментах, выполненных десятью годами позже, это предположение о *квантовании магнитного потока* блестяще подтвердилось. Однако оказалось, что измеренный квант потока, получивший название *флюксона*, равен постоянной Планка, деленной на двойной заряд электрона.

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}. \quad (11.7)$$

Эти эксперименты свидетельствовали о том, что сверхпроводящий ток переносится частицами с зарядом $2e$. Такими частицами являются связанные пары электронов, получившие название *куперовских пар*.

Что означает сам факт квантования потока? Ведь приложенное поле не обязательно должно быть таким, чтобы созданный им магнитный поток через сквозную полость был точно равен целому числу флюксонов $m \Phi_0$. Дело, однако, в том, что при переходе образца в сверхпроводящее состояние величина возникающего тока, циркулирующего по поверхности полости и поддерживающего магнитный поток в этой полости, точно равна силе тока, соответствующего ближайшему целому числу флюксонов. Если, например, приложенное поле создает в отверстии поток $\left(m + \frac{1}{3}\right) \Phi_0$, то в сверхпроводящем состоянии возникает ток, создающий поток в этом отверстии, равный $m \Phi_0$. Если же напряженность поля была такова, что для нормального состояния создавался поток $\left(m + \frac{3}{4}\right) \Phi_0$, то после сверхпроводящего перехода величина циркулирующего тока будет такой, чтобы созданный ею магнитный поток в отверстии был $(m+1) \Phi_0$.

Все это свидетельствует о сильной корреляции куперовских пар между собой. Эксперимент дает основание считать, что все куперовские пары, участвующие в образовании сверхпроводящего тока, имеют одно и то же квантовое число n . При переходе к следующему квантовому числу n_1 все куперовские пары должны перейти в новое состояние. Если бы отдельная пара могла повысить свое квантовое число на единицу, в то время

как все остальные пары остались бы в прежнем состоянии, т.е. связанное с этим изменение магнитного потока было бы на много меньше, чем показывает эксперимент.

До сих пор речь шла о квантовании магнитного потока в сверхпроводнике со сквозной полостью. В то же время магнитный поток в виде флюксонов или связок из них проникает в сверхпроводник, если в нем имеются пронизывающие нормальные области (в смешанной фазе сверхпроводников 2-го рода).

11.9. ЭФФЕКТЫ ДЖОЗЕФСОНА

В 1962 г. Б. Джозефсоном теоретически были предсказаны эффекты слабой сверхпроводимости, получившие название *эффектов Джозефсона*, которые впоследствии были обнаружены и экспериментально. Эффекты Джозефсона, так же как и эффект квантования магнитного потока подтверждают, что сверхпроводимость является чисто квантовым эффектом, проявляющимся в макроскопических масштабах, и что между носителем сверхпроводящего тока — куперовскими парами — существует жесткая фазовая корреляция.

Различают *стационарный* и *нестационарный* эффекты Джозефсона. Стационарный эффект заключается в том, что сверхпроводящий ток может течь в отсутствие электрического поля через зазор между сверхпроводниками, заполненный изолятором, если толщина слоя изолятора достаточно мала (1—2 нм). Это означает, что куперовские пары, с помощью которых переносится сверхпроводящий ток, могут туннелировать из одного сверхпроводника в другой через слой диэлектрика. Туннельный ток проходит через зазор без падения напряжения, если его плотность не превышает некоторой критической величины, которая является характеристикой туннельного контакта. Этот сверхпроводящий ток чувствителен к наличию любого магнитного поля. Он обращается в нуль всегда, когда полный магнитный поток в диэлектрическом зазоре равен целому числу квантов потока Φ_0 . Эта зависимость джозефсоновского тока от магнитного поля дается выражением

$$I = I_0 \frac{\sin \pi \Phi / \Phi_0}{\pi \Phi / \Phi_0}, \quad (11.8)$$

где I_0 — величина тока, зависящая от свойств контакта и не зависящая от поля, Φ — полный магнитный поток в туннельном контакте.

Если плотность туннельного тока превышает критическое значение, то на контакте возникает разность потенциалов V и