

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  $\Phi_0$ . 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,  $\Phi$  — полный магнитный поток в туннельном контакте.

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

при этом, как предсказал Джозефсон, должен появиться высокочастотный переменный ток с частотой

$$\omega = \frac{2eV}{\hbar}. \quad (11.9)$$

Это нестационарный эффект Джозефсона. Вскоре после предсказания этот переменный джозефсоновский ток был обнаружен экспериментально. В нестационарном эффекте Джозефсона мы сталкиваемся с весьма интересным явлением, когда постоянное электрическое поле может вызвать переменный ток.

Как следует из макроскопической теории сверхпроводимости, эффекты Джозефсона определяются фазами куперовских пар в обоих сверхпроводниках и соотношением между ними.

### 11.10. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Необычные свойства сверхпроводников, такие как нулевое сопротивление, выталкивание магнитного поля, эффекты Джозефсона и ряд других, уже многие годы привлекают внимание создателей новой техники. Очень заманчиво использовать сверхпроводники в электротехнике и энергетике. Сегодня из-за наличия сопротивления подводящих проводов теряется от 30 до 40 % производимой электроэнергии. Это потери на джоулево тепло. Если бы осуществить передачу электроэнергии по сверхпроводящим проводам, это было бы равносильно увеличению ее выработки более чем на треть. На основе сверхпроводников можно было бы создавать генераторы и электродвигатели с более высоким КПД. С помощью сверхпроводящих соленоидов уже сейчас создаются огромные магнитные поля, которые используются для удержания плазмы в экспериментальных установках для управляемого термоядерного синтеза. Очень сильные магнитные поля нужны для создания транспортных средств на магнитной подушке. Эффекты Джозефсона уже находят применение в приборостроении. Джозефсоновские переходы смогут служить основой для создания сверхбыстродействующих ЭВМ нового поколения и других электронных устройств. Можно назвать целый ряд областей техники, где применение сверхпроводников дало бы огромный эффект. Однако практическое использование сверхпроводников до сих пор сдерживается из-за трех основных факторов. Этими факторами являются: низкие температуры сверхпроводящего перехода, существование критического магнитного поля и критического тока.

Ограничения по критическому магнитному полю и критическому току важны при создании сильноточных устройств. В приборах, использующих такие эффекты, как эффект Джозефсона, эти ограничения не столь существенны. До недавних пор