

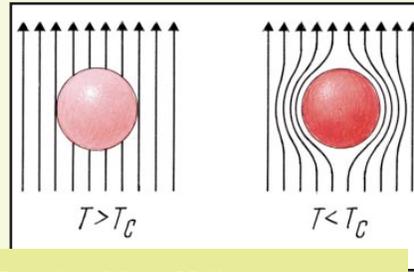
аметром порядка  $10^{-7}$  см), состоящими из нормальной фазы металла и ориентированными по полю  $H$ . Через каждую такую нить (“абрикосовский вихрь”) в металл проникает ровно один квант потока магнитного поля  $\Phi_c$ . Таким образом, внешнее магнитное поле присутствует в образце, хотя в пространстве между вихрями сверхпроводимость сохраняется и, следовательно, сопротивление образца остается равным нулю. С увеличением  $H$  число вихрей растет, а расстояние между ними уменьшается, т. е. внешнее поле как бы сжимает решетку вихрей до тех пор, пока они не сольются и не произойдет полное разрушение сверхпроводимости при  $H=H_{c2}$  (второе критическое поле). Величина  $H_{c2}$  составляет десятки Тл. Только после открытия сверхпроводников 2-го рода, преодолев огромные трудности, инженеры и технологи создали мощные магниты, которые позволяют получить постоянные поля напряженностью до 20 Тл.

Важными свойствами сверхпроводимости являются квантование магнитного потока, а также то, что сверхпроводимость наступает, когда электроны объединяются попарно.

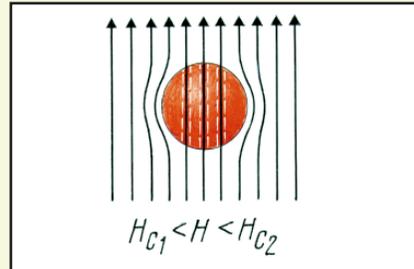
Остановимся еще на одном удивительном эффекте, который послужил основой для применения сверхпроводников в системах связи, в электронике, информатике, приборостроении. В 1962 г. Брайан Джозефсон, тогда еще студент-дипломник Кембриджского университета, буквально “на кончике пера” предсказал замечательное явление в сверхпроводниках. Опираясь на чисто теоретический анализ, он пришел к выводу, что сверхпроводящий ток, определяемый парами электронов, может протекать, или “туннелировать”, через пленку изолятора, разделяющую два сверхпроводника, если толщина ее незначительна. Он предсказал два явления, которые вскоре были подтверждены экспериментально и называются теперь “эффектами Джозефсона”, а область контакта двух сверхпроводников называют “джозефсоновским переходом”. С течением времени устройства на основе джозефсоновских переходов нашли широчайшее применение в сверхпроводниковой электронике, а сам Б. Джозефсон был удостоен Нобелевской премии.

Такой эффект наблюдается, если между двумя сверхпроводниками создать достаточно тонкую прослойку из изолятора, полупроводника или металла в нормальном состоянии либо соединить их очень узким и коротким перешейком (пленочный мостик или точечный контакт), либо нанести поперек тонкой сверхпроводящей пленки узкую полоску “нормального металла”, словом, создать структуру из слабосвязанных сверхпроводников (рис. 4,а). Эффект, называемый “стационарным эффектом Джозефсона”, заключается в том, что ток, пропускаемый через переход, течет, не создавая падения напряжения на переходе, т. е. он содержит сверхпроводящую компоненту.

Если величина пропускаемого тока превышает некую критическую величину, переход обретает активное сопротивление и индуктивность и, следовательно, на нем возникает разность потенциалов. Для этого случая



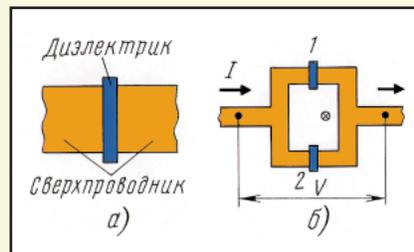
**Рис. 2. Эффект Мейснера в шаре из сверхпроводника: три  $T > T_c$  (шар в “нормальном” состоянии) силовые линии магнитного поля проникают в сверхпроводник; при  $T < T_c$  (шар в сверхпроводящем состоянии) магнитное поле полностью выталкивается из шара**



**Рис. 3. Смешанное состояние шара — сверхпроводника 2-го рода при величине магнитного поля  $H_{c1} < H < H_{c2}$ ;  $T < T_c$**

Джозефсон предсказал еще более удивительный эффект: при появлении постоянного напряжения  $U$  через переход должен протекать высокочастотный переменный ток, излучающий электромагнитные волны с частотой в десятки и сотни гигагерц. Этот эффект зарегистрирован несколько позднее и получил название “нестационарного эффекта Джозефсона”.

Обнаружение высокочастотного излучения радиоволн при нестационарном эффекте Джозефсона открыло широкие возможности его использования в радиоэлектронике. Здесь и создание генераторов монохроматического и когерентного электромагнитного излучения в интервале длин волн от нескольких миллиметров до долей миллиметра, и систем усиления мощности на высоких частотах. Но на практике реализовать такие устройства оказалось сложно, так как сверхвысокочастотное излу-



**Рис. 4. Джозефсоновский эффект: а — джозефсоновский переход; б — СКВИД из двух джозефсоновских переходов, соединенных параллельно в сверхпроводящей петле**

чение трудно вывести наружу из перехода, находящегося в жидком гелии, да и мощность излучения для этого слишком мала — триллионные доли ватта. Однако в настоящее время джозефсоновские переходы успешно используются в качестве чувствительных приемников электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. С помощью таких приемников, установленных на радиотелескопах, исследуются удаленные источники радиоизлучения Вселенной. Они нашли применение, в частности, на радиотелескопах в России и позволили на порядок повысить чувствительность приемных систем.

Уже созданы приемные устройства различного назначения. Так, радиоприемники для радиоастрономических и экологических наблюдений прямого детектирования используются для регистрации широкополосного излучения, их чувствительность достигает одной сотой К. Они предназначены в основном для поиска и регистрации объектов слабого радиоизлучения, таких, например, как газопылевые облака, связанные с процессом формирования звезд и планетных систем.

Когерентные радиоприемники, в состав которых входят гетеродинные смесители и параметрические предусилители, служат в радиоастрономии для приема узкополосного излучения и предназначены, например, для определения молекулярных линий. Наиболее широкое распространение получили гетеродинные приемники со смесителями на основе туннельных переходов СИС (СИС — сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник). Сверхмаломощные СИС-смесители, работающие при температуре жидкого гелия, являются наилучшими входными устройствами в диапазоне 100...1000 ГГц. Их шумовая температура ограничивается только фундаментальным квантовым пределом.

В настоящее время такие приемники работают на радиотелескопах и интерферометрах миллиметрового диапазона по меньшей мере в шести обсерваториях мира и служат для получения ценных астрономических данных.

Тонкопленочные туннельные СИС-переходы совместимы с другими сверхпроводниковыми компонентами приемника, изготавливаемыми с помощью литографии. В Институте радиотехники и электроники РАН (ИРЭ) создан и проходит испытания полностью сверхпроводниковый интегральный приемник субмиллиметровых волн (400...500 ГГц). В этом приемнике совместно работают согласующие устройства, СИС-смеситель, генератор гетеродина на джозефсоновских переходах и другие сверхпроводящие элементы. Совместно с Институтом космических исследований Голландии в ИРЭ ведутся работы по конструированию матрицы таких приемников размерами  $3 \times 3$  элемента, которую предполагается установить на европейском космическом радиотелескопе, планируемом к запуску в 2005 г.

(Окончание следует)