

В. В. Шмидт. Критические токи в сверхпроводниках.

1. Если ток в сверхпроводнике превысит некоторое (критическое) значение, то сверхпроводящее состояние окажется разрушенным. Необходимо сразу подчеркнуть, что в случае пленок и сверхпроводников II рода разрушение сверхпроводимости происходит не за счет магнитного поля критического тока, а по другим причинам. Только в случае массивных сверхпроводников I рода их переход в промежуточное состояние происходит, когда магнитное поле, созданное током на их поверхности, достигает критического значения (правило Силсби).

Когда ток в сверхпроводнике достигает критического значения, сверхпроводящее состояние теряет устойчивость и возникает резистивное состояние.

2. Критический ток в пленке, когда ее толщина $d \ll \xi(T)$ ($\xi(T)$ — размер куперовской пары или длина когерентности), определяется согласно теории Гинзбурга — Ландау¹, и критическая плотность тока равна

$$i_c \approx (c/4\pi) H_{cm}/\delta_0,$$

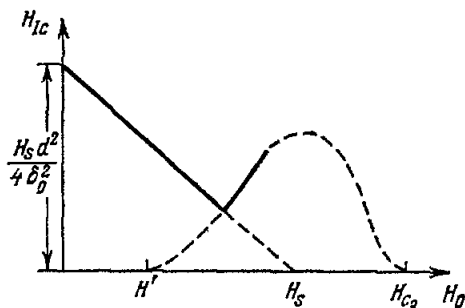
где H_{cm} — критическое термодинамическое поле, δ_0 — глубина проникновения слабого магнитного поля. Физическое объяснение неустойчивости сверхпроводящего состояния при таком токе сводится к следующему. Увеличение тока в сверхпроводнике означает увеличение скорости сверхтекучего течения бозе-эйнштейновского конденсата. Но с увеличением этой скорости усиливается распаривание электронов, т. е. понижается концентрация куперовских пар, или концентрация носителей сверхпроводящего тока. Поэтому существует некоторый максимальный ток, который еще может устойчиво протекать в сверхпроводнике. Это и есть критический ток.

3. Жесткие сверхпроводники представляют собой гетерогенные сверхпроводники II рода. Существует несколько моделей жесткого сверхпроводника.

Модель «губки»: жесткий сверхпроводник — это матрица из мягкого сверхпроводящего материала, пронизанная сетью тонких нитей, которые сохраняют сверхпроводимость, даже когда матрица перейдет в нормальное состояние. Сюда же относятся случаи, когда сверхпроводящие нити внедрены в нормальную матрицу. Модель применима в некоторых специальных случаях: эвтектические сплавы; сплав типа $Zr + 4\% Nb^2$, когда в несверхпроводящей матрице существуют тонкие нити сверхпроводящей фазы $\beta-Nb$; синтетические сверхпроводники, полученные продавливанием сверхпроводника через пористое стекло.

Рассчитаны критический ток «губки», его распределение по сечению проводника и его зависимость от внешнего магнитного поля^{3, 4}. Оказалось, что существует характерная плотность нитей $n_0 = (3 \sqrt{3}/\pi) \delta_0^2/Lr_0^2$, где L — толщина «губчатой» пластинки, r_0 — радиус поперечного сечения одной нити. Увеличение плотности нитей выше n_0 не приводит к существенному увеличению критического тока через «губку».

4. *Модель «пиннинга»*⁵: матрица — сверхпроводник II рода. В матрице существуют несверхпроводящие выделения в виде макроскопических частиц другой фазы, пор, химических соединений и т. п. За эти выделения зацепляются сверхпроводящие вихри, которые возникают в сверхпроводнике, когда последний находится в смешанном состоянии, т. е. возникает «пиннинг» вихрей. Критический ток будет таким, при котором возникнет неустойчивость вихревой системы, т. е. при которой сила Лоренца, созданная током и действующая на вихри, превысит силу «пиннинга». Модель «пиннинга» в форме, предложенной в работе⁵, не описывает всю совокупность экспериментальных данных по критическим токам в жестких сверхпроводниках, в частности, пик-эффект в зависимости критического тока от внешнего поля. Эта модель требует уточнений.



5. Рассмотрена зависимость критического тока от внешнего магнитного поля в идеально однородных пленках из сверхпроводника II рода, когда магнитное поле направлено параллельно поверхности пленки и перпендикулярно транспортному току^{7, 8}. Толщина пленки d удовлетворяет неравенству $\delta_0 \gg d \gg \xi(T)$. В этом случае критический ток определяется началом развития вихревой неустойчивости в пленке, и его зависимость от магнитного поля H_0 представлена на рисунке. Поле H' — это минимальное поле переохладения смешанного состояния:

$$H' = (\pi^2 \delta_0^2 / \sqrt{2} \kappa d^2) H_{cm}, \quad \kappa = \delta_0 / \xi(T);$$

поле H_s — это максимальное поле перегрева мейснеровского состояния, $H_s \approx \sqrt{2} H_{cm} \delta_0 / d$; поле H_{Ic} — это магнитное поле, созданное критическим током на поверхности пленки. Полученные результаты означают существование «пиннинга» в идеально однородной пленке за счет взаимодействия сверхпроводящих вихрей с поверхностью сверхпроводника.

6. Современные материалы, обладающие большими токами, получают в результате сложной механико-термической обработки. При этом у них возникает слоисто-нитчатая микроструктура. Выделение частиц нормальной фазы обычно начинается на границах волокон. Поэтому рассмотренная в п. 5 пленка может рассматриваться как некоторая идеализация такого волокна. Это открывает возможность объединения моделей «губки» и «пиннинга». Возможно, что пик-эффект в пленке (см. рисунок) дает объяснение пик-эффекту, наблюдающемуся у многих жестких сверхпроводников.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург, Л. Д. Ландау, ЖЭТФ 20, 1064 (1950).
2. Н. Е. Алексеевский, И. Гласник, А. В. Дубровин, ЖЭТФ 54, 84 (1968).
3. В. В. Шмидт, ЖЭТФ 45, 1992 (1963); 47, 387 (1964).
4. В. В. Шмидт, сб. «Металловедение и металлофизика сверхпроводников», М., «Наука», 1965, стр. 17.
5. P. W. Anderson, Phys. Rev. Lett. 9, 309 (1962).
6. В. В. Шмидт, Письма ЖЭТФ 9, 494 (1969).
7. В. В. Шмидт, ЖЭТФ 57, 2095 (1969).