

Осцилляции критического тока в зависимости от обменного поля и толщины ферромагнитного металла (F) в джозефсоновском контакте S-F-S (Буздин А.И., Булаевский Л.Н., Панюков С.В. (1982))

Первые магнитные сверхпроводники с регулярной решеткой магнитных атомов были открыты в 1976 году, что сразу же вызвало всплеск интереса к проблеме сосуществования сверхпроводимости и магнетизма. В обычном синглетном сверхпроводнике куперовские пары состоят из электронов с противоположно ориентированными спинами, поэтому сильное внутреннее поле в ферромагнетике (так называемое обменное поле) ориентирует спины электронов по полю и, тем самым, разрушает пары. Этот механизм разрушения пар объясняет, почему практически все известные магнитные сверхпроводники являются антиферромагнетиками, в которых среднее (на масштабе размера куперовских пар) внутреннее поле равно нулю. Отметим, что лишь сравнительно недавно, после 2000 года, были открыты три ферромагнитных сверхпроводника. В них реализуется новый экзотический тип сверхпроводимости – триплетная сверхпроводимость с параллельной ориентацией спинов электронов, образующих пару.

После того, как стало ясным, что сосуществование синглетной сверхпроводимости (S) и ферромагнетизма (F) в одном и том же соединении невозможно, естественно было заняться вопросом, а что будет происходить около границы между сверхпроводником и ферромагнетиком, т. е. каков будет S/F эффект близости? Именно этой проблеме и была посвящена реферируемая статья [1]. Авторы были первыми, кто обнаружили необычный осцилляционный характер затухания сверхпроводящих корреляций вглубь ферромагнетика и предсказали возникновение “ π ” основного состояния в S/F/S джозефсоновском контакте. Сверхпроводящий параметр порядка в таком “ π ” контакте имеет противоположный знак на его берегах, т. е. его фаза отличается на π (откуда и название - “ π ” контакт).

S/F эффект близости в обсуждаемой работе анализировался в рамках чистого предела, когда можно пренебречь примесным рассеянием в ферромагнетике и реализуется баллистический режим электронного транспорта. Последующие работы показали, что осцилляционный характер затухания сверхпроводящих корреляций устойчив к примесному рассеянию и является общим явлением, характерным для всех ферромагнетиков, как в баллистическом, так и диффузионном режимах. В некотором смысле, осцилляции волновой функции куперовских пар можно рассматривать, как своеобразное проявление неоднородной сверхпроводящей фазы Ларкина-Овчинникова-Фулде-Феррелла (ЛОФФ) [2,3]. Состояние ЛОФФ было предсказано для синглетного сверхпроводящего ферромагнетика, находящегося в чистом пределе. Из-за несовместимости синглетной сверхпроводимости и ферромагнетизма, экспериментальная проверка этого эффекта затруднительна. В то же время в S/F системе куперовские пары, проникающие из сверхпроводника в ферромагнетик, оказываются в условиях, близких к тем, которые нужны для возникновения ЛОФФ фазы. Более того, осцилляции сверхпроводящих корреляций должны наблюдаться как в чистом, так и в грязном пределах.

Джозефсоновские S/F/S “ π ” контакты были впервые реализованы экспериментально в 2001 году [4]. Включение в сверхпроводящую цепь S/F/S “ π ” контакта приводит к появлению незатухающих сверхпроводящих токов даже в отсутствие внешнего магнитного поля. По сути дела “ π ” контакт является своеобразной фазовой батареей для сверхпроводящих устройств. Недавние эксперименты показали, что “ π ” контакты позволяют создать сверхпроводящий

кубит (базисный строительный блок квантового компьютера), не связанный с внешним магнитным полем и, тем самым, являющимся намного более устойчивым [5].

В настоящее время неослабевающий интерес к S/F/S структурам связан с теми перспективами, которые они открывают для развития новой области - сверхпроводящей спинтроники.

[1] Буздин А.И., Булаевский Л.Н., Панюков С.В. Письма ЖЭТФ, **35**, 147 (1982).

[2] Larkin A. I. and Y. N. Ovchinnikov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **47**, 1136 (1964) Sov. Phys. JETP **4**, (1965)

[3] Fulde P. and R. A. Ferrell, Phys. Rev. **135**,1550 (1964)

[4] Ryazanov V. V., V. A. Oboznov, A. Yu. Rusanov, A. V. Veretennikov, A. A. Golubov, and J. Aarts, Phys. Rev. Lett. **86**, 2427 (2001).

[5] A. K. Feofanov, V. A. Oboznov, V. V. Bol'ginov, J. Lisenfeld, S. Poletto, V. V. Ryazanov, A. N. Rossolenko, M. Khabipov, D. Balashov, A. B. Zorin, P. N. Dmitriev, V. P. Koshelets, and A. V. Ustinov, Nat. Phys. **6**, 593 (2010).