

Сверхпроводимость в примесных полупроводниках

А.И. Агафонов, Э.А. Маныкин
ИСФТТ РНЦ “Курчатовский Институт”

В докладе представлены результаты теории фазовых переходов изолятор - сверхпроводник - металл в легированных невырожденных полупроводниках, у которых при переходе от диэлектрической фазы к металлической возникает плотность одночастичных электронных состояний в области исходной запрещенной зоны. При этом химический потенциал находится в глубине энергетической щели и его положение слабо меняется при легировании.

Изначально, основанием для теоретических исследований сверхпроводимости в легированных полупроводниках [1] являлась возможность их вырождения при высоких уровнях легирования. Согласно выражению БКШ для температуры сверхпроводящего перехода, можно было бы ожидать относительно низких T_c . Это связано с тем, что для вырожденных полупроводников типичны низкие концентрации электронов и плотности электронных состояний при энергии Ферми по сравнению с металлами. Кроме того, при высоких уровнях легирования может быть сильным затухание квазичастиц вблизи поверхности Ферми.

В легированных невырожденных полупроводниках оба отмеченных выше недостатка, присущие вырожденным полупроводникам и приводящим к низким T_c , могут сниматься. При легировании в этих материалах образуются глубокие примесные зоны электронных состояний в исходной энергетической щели, в которых закреплен химический потенциал. Полное число состояний в этих зонах связано с уровнем легирования и может быть относительно низким. Однако, если щелевые зоны узкие, то плотность одночастичных состояний в них может быть высокой. Далее, поскольку физика фазовых переходов разыгрывается в щелевых состояниях, затухание квазичастиц вблизи поверхности Ферми может быть низким. Наконец, важным моментом является возможность нового канала спаривания квазичастиц, связанного с образованием локальных узельных бозонов на примесных узлах и их последующей делокализацией, обусловленной гибридизацией затравочных примесных локализованных состояний с исходными зонными состояниями полупроводника. Впервые подобный канал обсуждался в [2], где изучалась модель легированного металла.

Наиболее распространенное направление в построении теории сверхпроводимости в легированных оксидах переходных металлов имеет общий

фундамент с теорией сверхпроводимости в металлах и вырожденных полупроводниках. Это связано с часто используемым предположением, что носители заряда, вводимые примесью, не связаны с примесными ионами и могут свободно мигрировать в материале [3]. Тогда при легировании происходит металлизация одной из разрешенных зон исходного полупроводника, что, в конечном счете, приводит к сценарию фазовых переходов, контролируемых переменным заполнением элементарной ячейки исходного электронно-коррелированного полупроводника. Однако известные экспериментальные результаты для вольфрамных бронз Na_xWO_3 и купратов $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$ и $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}Y_xCu_2O_8$ указывают на то, что эти материалы, по-видимому, не являются вырожденными полупроводниками в областях легирования, соответствующих возникновению сверхпроводимости в этих соединениях. Подчеркнем, что для купратов это заключение эквивалентно тому, что при легировании химический потенциал не покидает область диэлектрической щели в исходном электронно-коррелированном материале.

Отказ от этого предположения приводит к необходимости исследования общей проблемы сверхпроводимости невырожденных легированных полупроводниках [4]. В докладе обосновывается использованный в теории подход к описанию легированного полупроводника, основанный на обобщенной модели Холстейна-Андерсена (Фрелиха-Андерсона), в которой учитывается ансамбль примесных узлов, случайным образом распределенных в исходной решетке, и учтены электронные корреляции на примесных орбиталях. Обсуждаются механизмы перехода изолятор - металл в щелевых состояниях и перехода в сверхпроводящее состояние.

В этой теории необычной сверхпроводимости в легированных полупроводниках не возникает уравнения типа БКШ на энергетическую щель, которая, тем не менее, открывается в спектре одночастичных состояний. Вместо него, ключевым уравнением для сверхпроводящего состояния является уравнение, описывающее образование локальных синглетных бозонов на примесных узлах. Последние можно рассматривать как предвестники возникновения сверхпроводимости в системе, поскольку вызванные гибридизацией двухквазичастичные переходы по примесному ансамблю j -узельный бозон

$\rightarrow (-\vec{k}\vec{k})$ пара связанных квазичастиц $\rightarrow j_1$ -узельный бозон $\rightarrow (-\vec{k}_1\vec{k}_1)$ пара связанных квазичастиц и т.д. приведут к появлению распространенных заряженных бозонов, необходимых для возникновения сверхпроводимости [5].

При температуре ниже T_c распространенные заряженные бозоны конденсируются на основной уровень, характеризующийся тем, что все связанные пары входят в волновую функцию основного состояния в одном и том же внутреннем состоянии с покоящимся центром инерции. Волновая функция относительного движения пары $f^{(+)}(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$ одна и та же для всех пар конденсата. Температура, при которой впервые возникает такая неустойчивость, связана с температурой возникновения узельных бозон-фермионных смешанных состояний в примесном полупроводнике.

В недодопированной области фазовой диаграммы теория предсказывает, что сверхпроводящее состояние является смешанным, то есть, в сверхпроводящем состоянии сосуществуют как синглетный канал, так и триплетный канал спаривания. Фактически, этот простой результат следует из того, что симметрия легированного кристалла не включает пространственную симметрию по отношению к инверсии. В передопированной области имеет место фононный механизм сверхпроводимости с синглетным каналом спаривания. Обсуждаются результаты численного исследования переходов изолятор -сверхпроводник - металл в представленной модели легированного невырожденного полупроводника. Результаты сравнения полученных теоретических данных с известными экспериментальными данными для ВТСП материалов являются обнадеживающими.

1. М. Козн, в кн. Сверхпроводимость полупроводников и переходных металлов, под ред. Л.П. Горькова, Мир, Москва, 1972, с. 11.
2. L.P. Gor'kov, A.V. Sokol, JETP Lett., **46**, 420 (1987).
3. E. Dagotto, Rev. Mod. Phys., **66**, 763 (1994).
4. А.И. Агафонов, Э.А. Маныкин. ЖЭТФ, **124**, 394 (2003).
5. M.R. Schafroth, J.M. Blatt, S.T. Butler, Helv. Phys. Acta, **30**, 93 (1952).