

О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ПОЛЯ В СВЕРХПРОВОДНИК

Г.В.Климович, А.В.Рыляков, Г.М.Элиашберг

*Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау АН СССР
142432, Черноголовка*

Поступила в редакцию 14 марта 1991 г.

Показано, что наличие низкочастотных возбуждений в фононном спектре приводит к тому, что при $T \ll T_c$ зависимость глубины проникновения от температуры становится степенной.

В последнее время появились экспериментальные (см. ¹ и ссылки) и теоретические ² работы, которые дают основание полагать, что при низких ($T \ll T_c$) температурах зависимость глубины проникновения от температуры является степенной. Как будет показано, такое поведение является прямым следствием уравнений сильной связи ³ при наличии низкочастотных возбуждений.

Пренебрегая фононными поправками к электромагнитной вершине, получим для глубины проникновения выражение, которое с точностью до членов порядка $e^{-\Delta/T}$ (Δ -щель в спектре) может быть записано в следующем виде:

$$\delta_L^{-2} = \frac{4\pi N e^2}{mc^2} \int_0^{+\infty} d\varepsilon \frac{\Delta^R(i\varepsilon, T)}{Z^R(i\varepsilon, T)[\Delta^R(i\varepsilon, T) + \varepsilon^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

где интегрирование идет по верхней мнимой полуоси, а Δ^R и Z^R -аналитически продолженные в верхнюю полуплоскость решения уравнений сильной связи,

которые с той же точностью приобретают вид:

$$[1 - Z(i\varepsilon_n)]\varepsilon_n = - \int_{-\infty}^{+\infty} d\varepsilon' \frac{\varepsilon'}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \Delta^2(i\varepsilon')}} \int_0^{+\infty} d\omega \frac{\omega g(\omega)}{\omega^2 + (\varepsilon_n - \varepsilon')^2} -$$

$$- 2\pi \int_0^{+\infty} d\omega g(\omega) N(\omega) \operatorname{Re} \left\{ \frac{\varepsilon_n + i\omega}{\sqrt{(\varepsilon_n + i\omega)^2 + \Delta^2(i\varepsilon_n - \omega)}} \right\}, \quad (2)$$

$$\Delta(i\varepsilon_n)Z(i\varepsilon_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\varepsilon' \frac{\Delta(i\varepsilon')}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \Delta^2(i\varepsilon')}} \int_0^{+\infty} d\omega \frac{\omega g(\omega)}{\omega^2 + (\varepsilon_n - \varepsilon')^2} +$$

$$+ 2\pi \int_0^{+\infty} d\omega g(\omega) N(\omega) \operatorname{Re} \left\{ \frac{\Delta^R(i\varepsilon_n - \omega)}{\sqrt{(\varepsilon_n + i\omega)^2 + \Delta^2(i\varepsilon_n - \omega)}} \right\}. \quad (3)$$

Здесь $N(\omega) = [e^{\omega/T} - 1]^{-1}$, а $g(\omega) = \alpha^2(\omega)F(\omega)$ - эффективная плотность состояний фононов, $\varepsilon_n = (2n + 1)\pi T, n \geq 0$. Из уравнений (2) и (3) вытекает, что

$$Z(i\varepsilon, T) = Z(i\varepsilon, 0) + 2\pi \int_0^{+\infty} \frac{d\omega \omega^2 g(\omega) N(\omega)}{\sqrt{\varepsilon^2 + \Delta^2(i\varepsilon, 0)}} + O(T^3 g(T)), \quad (4)$$

а разложение $\Delta(i\varepsilon, T)$ начинается с членов вида $\int_0^{+\infty} d\omega \omega^2 g(\omega) N(\omega)$, т. е. содержит дополнительную малость T^2 . Отметим, что на мнимой оси частотная и температурная зависимости в поправке к Z разделяются, в то время как на вещественной оси (после аналитического продолжения (2)) степень T зависит от соотношения между ε и Δ (в соответствии с ³).

Взяв для оценки $\Delta(i\varepsilon, 0) \equiv \Delta$ и $Z(i\varepsilon, 0) \equiv 1$ получим для дебаевских фононов ($g(\omega) = \lambda(\omega/\omega_0)^2 \theta(\omega_0 - \omega)$):

$$\frac{\delta_L(T) - \delta_L(0)}{\delta_L(0)} = \frac{\pi^2}{2} \zeta(3) \lambda \frac{T}{\Delta} \left(\frac{T}{\omega_0} \right)^2 \quad (5)$$

Таким образом, измерение показателя степени в зависимости δ_L от T при низких температурах могло бы предоставить информацию о низкочастотном поведении эффективной спектральной плотности фононов ($g(\omega)$). В формировании сверхпроводимости кроме электрон-фононного может играть роль взаимодействие электронов с подсистемой типа двухуровневых центров, подобное рассмотренному в работе ⁴. Учет этого взаимодействия приводит к тому, что в $g(\omega)$ появляется вклад, зависящий от температуры: $g(\omega) \rightarrow g(\omega) + \tilde{g}(\omega) \operatorname{th}(\omega/2T)$, что при низких температурах дает в $\delta_L(T)$ вклад порядка $(T/\Delta)^2 \tilde{g}(T)$, который может стать лидирующим, если $\tilde{g}(\omega) = \text{const}$.

В рассматриваемом случае сильной связи фононные поправки к электромагнитной вершине не содержат малого параметра, что не изменит, однако, температурной зависимости глубины проникновения. Более общее рассмотрение связанных с этим эффектом будет произведено в ближайшее время.

Литература

1. Gantmakher V.F., Golovko N.I., Naumenko I.G. et al. *Physica C*, 1990, 171, 223
2. Dolgov O.V., Golubov A.A., Koshelev A.E. *Sol. State Comm.*, 1989, 72, 81.
3. Элиашберг Г.М. *ЖЭТФ*, 1960, 39, 1437.
4. Элиашберг Г.М. *Письма в ЖЭТФ*, 1987, 45, 28.