

А. М. Савченко, М. А. Савченко

КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРАХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФРЕЛИХА

Определена продольная спиновая мода колебаний в металлической фазе высокотемпературных сверхпроводников. Доказана возможность возбуждения данной ветви параметрическим полем продольной накачки.

В работах [1, 2] были найдены поперечные спиновые колебания в квантовых компьютерах. Данные моды являются низкочастотными в области малых волновых векторов и поэтому не возбуждаются в линейном режиме переменным магнитным полем резонансным способом. Наблюдение таких ветвей колебаний при нерезонансном возбуждении высокочастотным электромагнитным полем является косвенным подтверждением существования продольной ветви спиновых колебаний.

В настоящей работе определена продольная спиновая мода колебаний в металлической фазе высокотемпературных сверхпроводников. Доказана возможность возбуждения данной ветви параметрическим полем продольной накачки. При этом величина порогового поля определяется расстройкой по волновому вектору при возбуждении на удвоенной частоте и составляет приблизительно 0,01 Э при размере образца приблизительно 1 см³.

Используя уравнения движения для намагниченности и упругости, можно получить уравнение движения для случая взаимодействия спиновой моды с продольным звуком:

$$\begin{aligned} \ddot{m}_z^z &= -\omega_0^2 m_z^z - \frac{g}{M_i} \nabla_z (\dot{p}_z m_z^z + p_z \dot{m}_z^z), \\ \ddot{p}_z &= \frac{\lambda}{M_i} \Delta_z p_z, \end{aligned} \tag{1}$$

где ω_0 — собственная частота колебаний; $\omega'_0 = \omega_0 - \Delta\omega$, $\Delta\omega$ — величина дисперсии; $\omega_z = s_{\parallel} k_z$, k_z — волновой вектор спиновых колебаний по оси z ; s_{\parallel} — продольная скорость звука, p_z — импульс фонона, $\omega_z = 2\omega'_0$, $s_{\parallel} = (\lambda/M_i)^{1/2}$, λ — модуль упругости, M_i — масса иона, m_z^z — парамагнитный момент неравновесной компоненты намагниченности, $g = U_{e-i}/J_0$, U_{e-i} — потенциал ионизации, J_0 — обменный интеграл электронной системы.

Решение находим в виде

$$\begin{aligned} p_z &= p_{\omega_z} \exp(i(\omega_z t - k_z z)) + p_{-\omega_z} \exp(-i(\omega_z t - k_z z)), \\ m_z^z &= m_{z0}^z \exp(i\omega_0' t) + m_{z-0}^z \exp(-i\omega_0' t). \end{aligned} \quad (2)$$

При параметрическом возбуждении продольной антиферромагнитной моды имеем

$$\begin{aligned} 2\omega_{\text{ph}}(\vec{k}) &= \omega_{\parallel AF_0} = \omega_{\parallel AF}(0), \\ 2s_{\parallel} k &= \frac{J_0 s}{\hbar} \tau_s, \quad \tau_s = \left(\frac{k_s^2}{k_c^2} - 1 \right)^{1/2}, \quad \frac{k_s^2}{k_c^2} - 1 > 0, \quad k_s > k_c, \\ K_{\text{ph}} &= \frac{J_0 s}{2s_{\parallel} \hbar} \tau_s \approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}, \\ 2s_{\parallel} K_{\text{ph}} &= 2 \cdot 10^5 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \approx 5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}, \quad \hbar = h/2\pi, \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_{ph} — частота фононной моды, \hbar — постоянная Планка, K_{ph} — волновой вектор фонона, k_s — волновой вектор спиновых колебаний, k_c — обратная корреляционная длина в системе электронных спинов.

Используя систему (1), получаем следующее дисперсионное уравнение:

$$(\omega_0'^2 - \omega_0^2)^2 - \left(\frac{g}{M_i} k_z (\omega_z - \omega_0') \right)^2 |p_{\omega_z}|^2 = 0, \quad (4)$$

где $p_{\omega_z} = p_{-\omega_z}^*$.

Пороговая величина звуковой накачки при этом составляет

$$|p_{\omega_z}| = \frac{2\Delta\omega}{g\omega_z} M_i s_{\parallel}. \quad (5)$$

Мощность продольной звуковой волны накачки, необходимая для создания неравновесности в системе фононов, составляет

$$\begin{aligned} W &= 2 \cdot 10^7 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{\parallel z}} \right)^2 \text{ Вт}, \quad \frac{\Delta\omega}{\omega_{\parallel z}} \leq 10^{-3}, \\ \omega_{\parallel z} &\approx 10^{11} \text{ с}^{-1}, \quad \Delta\omega \leq 10^7 \dots 10^8 \text{ с}^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

При этом параметр порядка под действием звуковой волны увеличивается, а адиабатическая поправка к модулю упругости вызывает изменение скорости звука, которое меньше изменения, вызванного эффектами “размягчение решетки”.

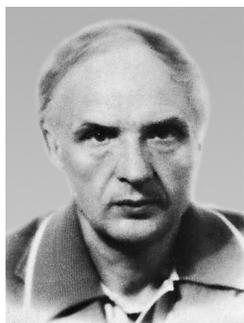
Однако данное изменение скорости звука составляет приблизительно $10^{-3} \dots 10^{-4}$ и не приводит к изменению резонансного соотношения (3). Это справедливо только при наличии в данной области флуктуаций сверхпроводящего параметра порядка.

Проведенный расчет показывает, что продольная антиферромагнитная мода, усиливающая эффективное электрон-фононное взаимодействие в высокотемпературной сверхпроводящей фазе ($\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$), может быть экспериментально наблюдаема, что служит очередным подтверждением существования связанных высокочастотных спин-фононных колебаний в высокотемпературных сверхпроводящих системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

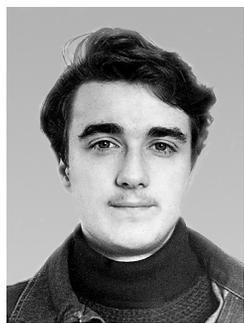
1. Савченко А. М., Савченко М. А., Стефанович А. В. Низкочастотные спиновые колебания в металлической фазе высокотемпературных сверхпроводников в квантовых компьютерах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". – 2003. – Т. 50. – № 1. – С. 78–83.
2. S a d o v n i k o v a M. B., S a v c h e n k o A. M., S c a r p e t t a G. Spin dynamics of collective electron interactions // Physics Letters. – 2000. – № A274. – P. 236–238.

Статья поступила в редакцию 8.12.2003



Максим Александрович Савченко родился в 1934 г., окончил в 1956 г. Харьковский государственный университет. Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры "Лазерные и оптико-электронные системы" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 356 научных работ, в том числе 4 монографий в области квантовой теории твердых тел.

M.A. Savchenko (b. 1934) graduated from the Kharkov State University in 1956. D. Sc. (Phys.-Math.), professor of "Laser and Optical-and-Electronic Systems" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 356 publications, including 4 monographs, in the field of quantum theory of solid bodies.



Александр Максимович Савченко родился в 1973 г., окончил в 1996 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой статистики и теории поля МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор 32 научной работы в области квантовой статистики и теории поля.

A.M. Savchenko (b. 1973) graduated from the Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov in 1996. Ph. D. (Phys.-Math.), senior researcher of the quantum statistics and field theory department of the Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov. Author of 32 publications in the field of quantum statistics and field theory.