

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ФЕРМИ ЭЛЕКТРОНОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В.М.Свистунов, В.Ю.Таренков

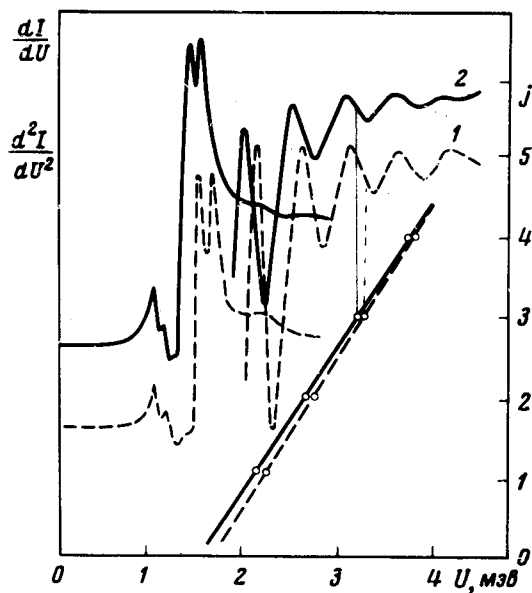
Осуществлены эксперименты по наблюдению туннельного эффекта Томаша под давлением до 9 кбар, позволившие непосредственно обнаружить увеличение скорости Ферми в свинце и открывающие новые возможности в детализации характеристик электронного спектра при изменении объема.

Изучение осцилляционных явлений де-Гааза – ван Альфена и Шубникова – де Гааза в условиях сильного сжатия является пока основным источником информации об энергетическом спектре электронов проводимости при изменении параметров решетки [1]. В последнее время наметились перспективы в исследованиях под давлением зонной структуры металлов и сплавов с помощью электронного туннелирования [2]. В этой статье мы покажем новую возможность туннельного эффекта в получении информации об изменении при гидростатическом сжатии такой важной характеристики электронного спектра как скорость нормальных электронов. Такая возможность возникает из изучения геометрических туннельных резонансов Томаша в толстых $t > 2 \text{ мкм}$ сверхпроводящих пленках [3]. Максимумы в осцилляциях туннельной проводимости определяются согласно [3]

$$\epsilon_j = j \frac{h}{4t} V_F, \quad (1)$$

где $j = 1, 2, \dots$ номер особенности, h – постоянная Планка, V_F – скорость электронов на поверхности Ферми, $\epsilon_j = [(eU - \Delta_1)^2 - \Delta_2^2]^{1/2}$, e – заряд электронов, U – напряжение на барьере, Δ_1 и Δ_2 – энергетические щели сверхпроводящих инжектора и объекта исследований соответственно. Таким образом, суть эксперимента по нахождению изменений скорости электронов сводится к измерению периода туннельных осцилляций Томаша при нулевом и конечном давлениях.

Эффект Томаша в туннельных контактах $Al-Al_2O_3-Pb-Ag$ изучался при гидростатических давлениях до 9 кбар¹⁾. Образцы изготавливались методом конденсации металлов в вакууме $P = 10^{-6}$ тор на стеклянную подложку. Толщины пленок алюминия 100 – 300 Å, свинца – 2,5 – 3,2 мкм. Барьерный слой образовывался окислением алюминиевой пленки. Температурный режим создания пленки свинца выбирался из условия получения ярко выраженной текстуры в направлении [111], качество которой контролировалось рентгеноструктурным анализом. Сопротивления туннельных переходов в области исследуемых энергий (2 – 4 мэв) 100 – 300 ом/мм². Для исключения краевых эффектов пленки осаждались через маски, удерживаемые магнитом. Измерения проводились при температуре 1,4К с помощью известной модуляционной техники. Давление в "бомбе" с керосино-масляной смесью контролировалось по изменению температуры сверхпроводящего перехода индия. Данные, обсуждаемые ниже, получены на образцах, четко проявляющих анизотропию щели свинца, томашевские осцилляции и имеющие отношение проводимости $\sigma_N/\sigma_S (U=0) = 10^{-3}$ во всем указанном диапазоне давлений. Последнее обстоятельство гарантирует надежное получение количественных результатов, т. к. исключает присутствие токов утечки нетуннельной природы через барьер.



Характеристики $\frac{dI}{dU}(U); \frac{d^2I}{dU^2}(U)$ и зависимости $\epsilon(j)$ для туннельного контакта $Al-Al_2O_3-Pb-Ag$ при $P = 0$ (пунктир) и $P = 8,8$ кбар (сплошная линия)

Приложение давлений приводит к изменению туннельных характеристик $\frac{dI}{dU}(U); \frac{d^2I}{dU^2}(U)$, обусловленному уменьшением энергетических щелей обкладок контакта и увеличением периода осцилляций (рисунок). Эк-

¹⁾ Тонкий слой серебра $\sim 1000 \text{ \AA}$ в таких системах способствует усилению амплитуды осцилляций.

спериментальная зависимость $\epsilon(j)$ представляет собой прямую линию (на рисунке $\epsilon(j) P = 0$ и $\epsilon(j) P = 8,8$ кбар), угол наклона которой заметно меняется с давлением, отражая увеличение скорости Ферми. Путем усреднения данных экспериментов с шестью туннельными образцами и с различными толщинами пленок свинца при давлениях 1,5; 2,8; 4,7; 6,9; 7,2; 8,8 кбар найдено значение $\frac{d \ln V_F}{dP} \approx \frac{d \ln \epsilon}{dP} = + (7,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-6} \text{ бар}^{-1}$

Это увеличение периода, а следовательно, и скорости электронов в первую очередь обязано уменьшению электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ). Действительно, хорошо известно [4], что в металлах ЭФВ приводит к перенормировке спектра электронов, проявляющейся в уменьшении скорости электронов вблизи поверхности Ферми $V_F = V_0 / Z_n$, здесь

V_0 — скорость в отсутствие электрон-фононного взаимодействия, Z_n коэффициент перенормировки. Тогда для изменения периода осцилляций Томаша под давлением получаем

$$\frac{d \ln \epsilon}{dP} = - \frac{d \ln Z_n}{dP} + \frac{d \ln \frac{V_0}{t}}{dP} \quad (2)$$

Вклад последней величины невелик, что легко оценить из модели

свободных электронов: $\frac{d \ln \frac{V_0}{t}}{dP} = \frac{2}{3} \kappa$, где κ — сжимаемость свинца.

С другой стороны, имеется и экспериментальная возможность получения данных о зависимости $V_0/t(P)$, возникающая при детальном изучении под давлением другого типа туннельных осцилляций, рассмотренных нами ранее в [2].

Период такой структуры $\Delta E = \frac{\pi \hbar}{2} \frac{V_0}{t}$ не содержит перенормировку за счет ЭФВ (напомним, структура наблюдается вдали от уровня Ферми). Обработка большого количества экспериментальных зависимостей $d^2 I / dU^2(U)$ при различных давлениях (до 10 кбар) для разных образцов выявила

$$\frac{d \ln \frac{V_0}{t}}{dP} = (1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-6} \text{ бар}^{-1}$$

Это значение согласуется с результатами расчетов Андерсона¹⁾ зонной структуры свинца под давлением, из которых также следует

¹⁾ Пользуемся случаем, чтобы выразить признательность Дж.Р.Андерсону за предоставленные расчеты до их опубликования и полезные обсуждения затронутых здесь вопросов во время его пребывания в СССР.

очень слабая зависимость $\frac{d \ln \frac{V_0}{t}}{dP}$ от зонной энергии, что позволяет

для величины $\frac{d \ln \frac{V_0}{t}}{dP}$ в (2) использовать результаты эксперимента [2], в котором эта величина определялась при энергии $E = E_F + 0,8 \text{ эв}$.

С учетом вышеизложенного из эксперимента по эффекту Томаша под давлением для коэффициента перенормировки $Z_n(P)$ получаем

$$\frac{d \ln Z_n}{dP} = -6,1 \cdot 10^{-6} \text{ бар}^{-1}.$$

Это значение хорошо согласуется с данными по изменению плотности состояний [5] и полностью соответствует выполненным туннельным экспериментам и расчетам по влиянию давлений на функцию электрон-фононного взаимодействия [6]. Насколько нам известно, это первые эксперименты по прямому измерению скорости электронов и параметра перенормировки электронного спектра под давлением. Полученные результаты могут служить подтверждением предсказанного Х.Брандтом и Н.Б.Брандтом [7] эффекта уменьшения циклотронной эффективной массы электронов под давлением, который также определяется изменением ЭФВ: $m^* = m_0 Z_n$.

Выражаем искреннюю благодарность А.А.Галкину за постоянное внимание и поддержку, Н.Б.Брандту и Н.В.Заварицкому за полезные обсуждения и ценные советы.

Донецкий
Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
30 мая 1977 г.

Литература

- [1] Н.Б.Брандт, Е.С.Ицкевич, Н.Я.Минина. УФН, 104, 459, 1971.
- [2] А.А.Галкин, В.М.Свистунов, А.И.Дьяченко, В.Ю.Таренков. Письма в ЖЭТФ, 21, 5, 259, 1975.
- [3] W. J. Tomasch, Phys. Rev. Lett., 15, 672, 1965; 16, 16, 1966.
- [4] Н.В.Заварицкий. УФН, 102, 241, 1972.
- [5] Н.Б.Брандт, И.В.Берман, Ю.П.Куркин. ЖЭТФ, 69, 1710, 1975.
- [6] А.А.Галкин, В.М.Свистунов, О.И.Черняк, А.И.Дьяченко. Тезисы докладов НТ-19, с. 296, Минск, 1976.
- [7] Х.Брандт, Н.Б.Брандт. ЖЭТФ, 60, 1141, 1971.