

Письма в ЖЭТФ, том 21, вып. 5, стр. 259 – 263

5 марта 1975 г.

**НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА
В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ**

*А.А.Галкин, В.М.Свиридов, А.И.Дьяченко,
В.Ю.Таренков*

Электронные стоячие волны в тонкой пленке свинца наблюдались при давлениях до 10 кбар, что указывает на применимость туннельного эффекта в исследованиях характеристик электронного спектра металла в условиях сильного сжатия.

Основное внимание при исследовании энергетических спектров электронов под давлением уделяется изменению экстремальных соче-

ний поверхности Ферми. Это определяется широким применением методов, использующих эффекты квантования энергии электрона в постоянном магнитном поле [1]. Цель настоящей работы показать новые возможности в изучении влияния давлений на зонную структуру металлов, возникающие из исследований туннельных эффектов. Предпосылкой для рассмотрения таких вопросов послужили успешные туннельные эксперименты на сверхпроводящих пленочных системах в условиях сильного сжатия [2].

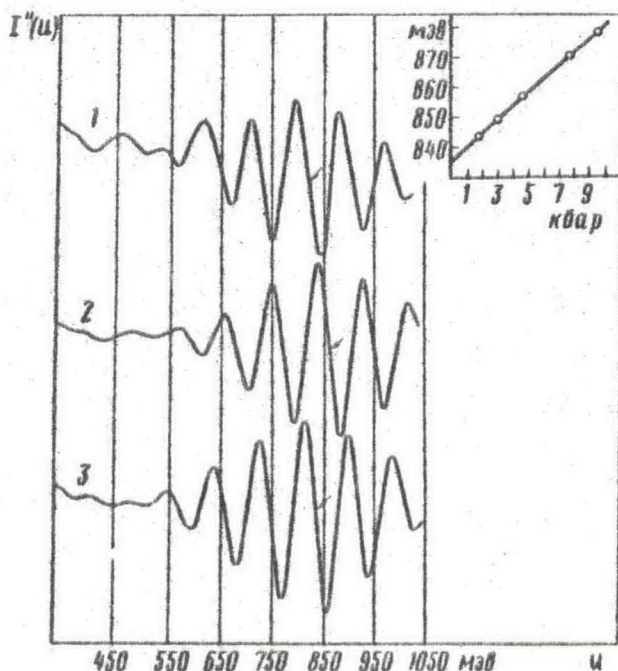


Рис 1 Копия записей $I''(u)$ при различных давлениях: 1 — 1,5 кбар; 2 — 10,1 кбар; (после сброса давления). Стрелками указано положение точки u_0 . На вставке показана зависимость величины u_0 от давления

Особый интерес представляют осцилляции в туннельной проводимости, обусловленные существованием электронных стоячих волн в металлах [3]. Реализация этого эффекта связана с определенными трудностями, так как длина волны электрона в металле сравнима с параметрами решетки и необходимы чистые монокристаллические пластины малых размеров. Тем не менее, нам также удалось наблюдать это явление на многих образцах, что позволило провести систематическое изучение его в условиях гидростатического сжатия до 10 кбар, создаваемого методикой [4]. Кроме того, исходя из качественной модели [3] развита теория эффекта. Здесь мы приведем только аналитическое выражение для осциллирующей части производной туннельной проводимости

$$d^2 I(u) / du^2 = I''(u).$$

Эксперименты проводились при 4,2 К на туннельных контактах Al—I—Pb, приготовленных осаждением металлов на охлажденную (до 80 К) стеклянную подложку. В отличие от [3] изготовление образцов производилось в рабочем вакууме $\sim 10^{-6}$ тор, достигаемом обычной диффузионной масляной откачкой. Толщина t пленки свинца контролировалась

кварцевым измерителем и составляла $\sim 250 \text{ \AA}$. Сопротивления контактов составляли $0,5 + 0,5 \text{ ком}$. Яркие осцилляции (рис. 1) проявляли образцы, которые отжигались в течение нескольких суток при $T = 330 \text{ K}$. Для них рентгеноструктурный анализ показал четко выраженную текстуру пленок РЬ в направлении $[111]$.

Непротиворечивое объяснение наблюдаемой амплитуды осцилляций удастся получить, предполагая торцы блоков, образующих пленку и обладающих совершенной кристаллической решеткой, атомарно гладкими. Разброс блоков по толщине опишем законом Пуассона с дисперсией ξ . Обозначим через d межплоскостное расстояние в направлении туннелирования (ось Z), k_z — величина квазиимпульса k в этом направлении. В случае, когда осцилляции наиболее заметны при $k_z = \frac{1}{2} \pi/d = k_q$ [3] и закон дисперсии электрона $E = E(k)$ близок к "свободному" получаем

$$I''(u) = A \exp[-\kappa(u - u_q)^2] \sin[2\pi(u - u_q)/\Delta u], \quad (1)$$

где $\Delta u = \frac{1}{2} \pi V_F / t$ — период колебаний, ($\hbar = 1$), $V_F = \partial E / \partial k$ — фазовая скорость при $k = k_q = k(0, 0, k_q)$, $u_q = E(k_q) - E_F$, E_F — энергия Ферми, $\kappa = 2 \xi d (\pi/t \Delta u)^2$, $A = C \exp[-2\pi \gamma(E(k_q), k_q)/\Delta u]$, C — медленно меняющаяся на Δu функция, $\gamma(E, k)$ — затухание квазичастиц в состоянии стоячей волны¹⁾, $u_0 = u_q + \delta v$. Величина δv определяется отличием матричного элемента туннелирования от постоянной: несовершенством текстуры пленки, граничными условиями образования электронных стоячих волн и т. д. Вследствие этого осцилляционная картина должна сдвигаться при изменении внешнего потенциального барьера в пленке свинца, что можно достичь с помощью электростатического поля, напылением диэлектриков с разной шириной запрещенной зоны и т. д. Рассеяние на границах между зернами пленки, включающих большие структурные искажения, сохраняет только стоячие волны, квазиимпульсы которых почти перпендикулярны барьеру. Поэтому следует ожидать уменьшение амплитуды и рост периода осцилляций в сильных магнитных полях (по оценкам $\sim 100 \text{ кэ}$). Обнаружение вышеописанных эффектов послужит хорошим подтверждением правильности физического понимания рассматриваемого явления.

Согласно (1) значение зонной энергии в точке k_q можно определить по нулю $I''(u)$, заключенному между двумя наибольшими амплитудами. Ошибка δE в определении $E(k_q)$ невелика, например для РЬ $\delta E = 3 + 5 \text{ мРэ}$. Такая точность определения $E(k_q)$ достаточна для проведения численного сравнения с расчетами зонной структуры. Найдено, что $\delta E \leq \Delta u/2$ и уменьшается, если картина осцилляций ближе к симметричной, больше толщина пленки, слабее зависимость обычной проводимости контакта от смещения на барьере.

Связь $I''(u)$ с зонной структурой металла подтвердилась экспериментами по влиянию высокого и гидростатического давления (p) на поведение осцилляционной картины. Величина δE практически не зависит

¹⁾ Отмеченная в [3] невозможность наблюдения осцилляций типа $k_z = \frac{2}{3} \pi d^{-1}$ связана с возрастанием затухания квазичастиц ниже уровня Ферми.

от давления, поэтому эти эксперименты дают с хорошей точностью значение $\eta = \partial(E(k_q) - E_F)/\partial p$. Полученная величина $\eta = 4,0 \pm 0,2 \text{ мэв/кбар}$ находится в удовлетворительном согласии с выполненными нами расчетами зонной структуры свинца в нерелятивистском приближении. Изменение с давлением E_F бралось из работы [5].

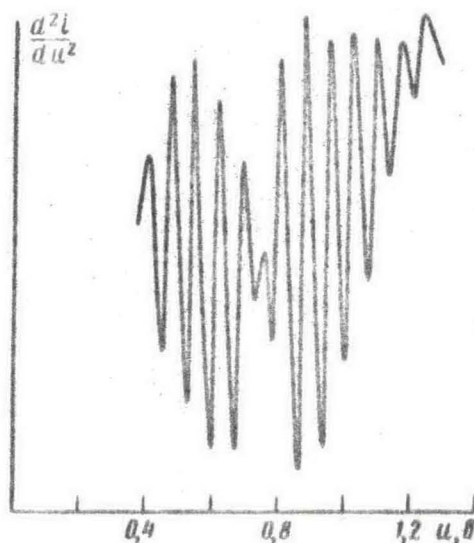


Рис 2 Интерференция осцилляций $I''(U)$ от участков пленки, текстурированных в направлениях $[111]$ и $[110]$

Хорошо известно, что для интерпретации поведения поверхности Ферми металлов с давлением, наибольшая трудность возникает в определении E_F при различном давлении. Любая теоретическая модель зонной структуры позволяет вычислить значение энергии электрона в одной точке k_q в симметричном направлении зоны Бриллюэна гораздо точнее и в несколько тысяч раз быстрее, чем E_F . Поэтому измерение с высокой точностью сдвига под давлением осцилляционной картины позволяет, в рамках теоретической модели, определить зависимость $E_F = E_F(p)$, что обеспечивает однозначную интерпретацию экспериментов по влиянию давления на поверхность Ферми металлов. Нелинейности в зависимости $\eta = \eta(p)$ могут служить указанием на наличие фазовых переходов.

На ряде образцов обнаружено явление интерференции осцилляций $I''(u)$ от участков пленки, текстурированных в направлениях $[111]$ и $[110]$ (рис. 2). Частотный анализ подобных кривых позволит получить из одного эксперимента характеристики зонной структуры для различных кристаллографических направлений и будет способствовать как уточнению, так и изучению зонной структуры металлов и сплавов¹⁾.

Авторы признательны Н.В.Заварицкому за обсуждение результатов работы.

Донецкий
физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
2 января 1975 г.

¹⁾ Осцилляции также наблюдались и на сплавах $\text{Pb}_{1-x}\text{Bi}_x$ ($x < 2 \text{ ат.}\%$).

Литература

- [1] Н.В.Брандт, Е.С.Ицкевич, Н.Я.Минина. УФН, 104, 459, 1971.
 - [2] А.А.Галкин, В.М.Свистунов. Phys. Stat. Sol., 26, K55, 1968;
Н.В.Заварицкий, Е.С.Ицкевич, А.Н.Вороновский. Письма в ЖЭТФ,
7, 271, 1968.
 - [3] R.C.Jaklevic, J.Lambe, M.Mikkor, W.C.Vassol. Phys. Rev. Lett., 26,
8, 1971.
 - [4] Е.С.Ицкевич. ПТЭ, №4, 148, 1963.
 - [5] J.P. Van Dyke. Phys. Rev. B, 7, 2368, 1973.
-