

НОВЫЙ ТИП ОСЦИЛЛЯЦИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В. П. Гайдукос, Н. П. Данилова

Исследуя зависимость электросопротивления ρ нитевидных кристаллов (вискерос) висмута от магнитного поля $H < 3$ кэ при $T = 4,2^\circ\text{К}$, мы обнаружили новый тип осциллирующего поведения $\rho(H)$.

Объекты исследования — вискеры висмута в форме нитей и ленточек толщиной порядка одного микрона и длиной до 0,5 мм, выращивались из газовой фазы [1]. Чистота исходного висмута характеризуется отношением $\rho_{300^\circ\text{К}} / \rho_{4,2^\circ\text{К}} = 500$, что соответствует длине свободного пробега $\lambda_{4,2^\circ\text{К}} = 1$ мкм.

Монтаж образцов проводился методом прижимного контакта [2]. Зависимости $\rho(H)$ и производные $d\rho/dH = f(H)$, получаемые с помощью модуляционной методики, регистрировались на двухкоординатном самописце.

Измерения проведены на 28 образцах, из них 17 в форме ленточек (ширина превосходит толщину в несколько раз). Об ориентации осей образцов можно было судить по анизотропии сопротивления в магнитном поле и периодам осцилляций Шубникова — де Гааза. Оси ленточных и некоторых нитевидных вискеросов лежат в базисной плоскости.

Новый тип осцилляций наблюдался на 14-и ленточных и не зарегистрирован на нитевидных вискерах.

На рис. 1 представлена одна из наиболее выразительных зависимостей $\rho(H)$ для образца с размерами $l = 155$ мкм, $\Delta \approx 8,5$ мкм, $d = 1,4$ мкм (где l — расстояние между потенциальными контактами, Δ — ширина, d — толщина); измерительный ток параллелен магнитному полю $\vec{I} \parallel \vec{H}$. Обычно амплитуда осцилляций была порядка нескольких процентов от величины монотонной части сопротивления, что затрудняло их обнаружение. Применение модуляционной методики существенно облегчило регистрацию осциллирующей части сопротивления. На рис. 2 приведен один из простейших видов зависимости $d\rho/dH = f(H)$ для ленточки с размерами $140 \times 2 \times 1$ мкм³; $\vec{I} \parallel \vec{H}$.

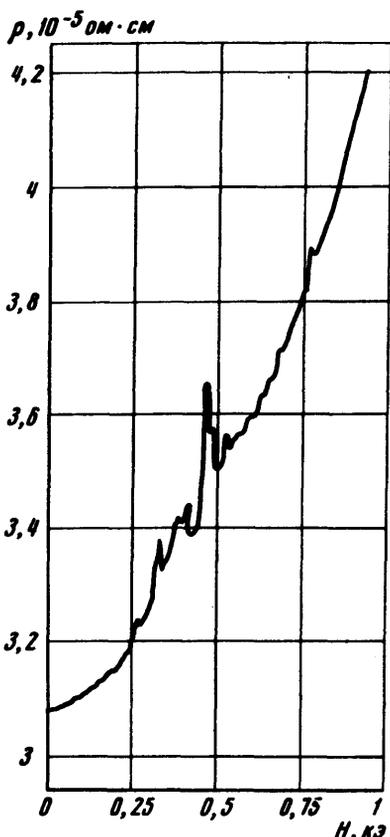


Рис. 1

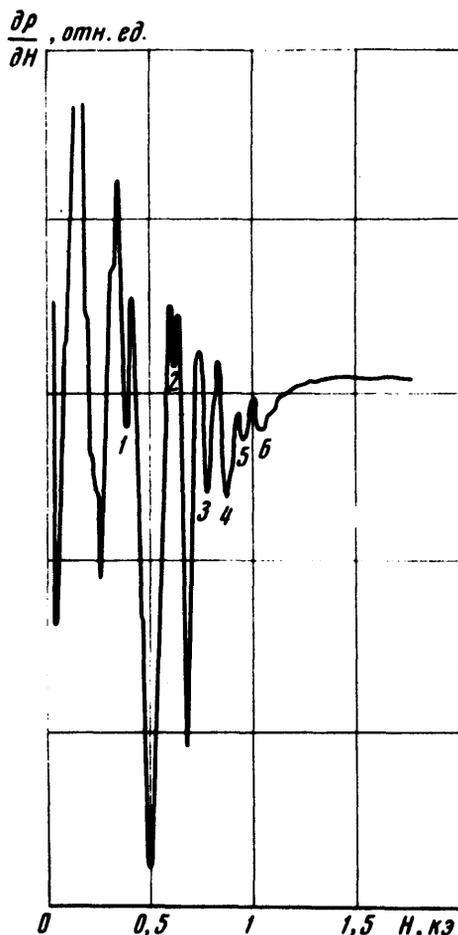


Рис. 2

В общем случае осциллирующая зависимость $\frac{d\rho}{dH} = f(H)$ носит более сложный характер, о чем можно судить по рис. 3, где приведены результаты для ленточки с размерами $133 \times 2 \times 0,5 \text{ мк}^3$; $\vec{T} \perp \vec{H}$; $\vec{H} \perp \vec{n}$ (где n — нормаль к плоскости ленточки).

При исследовании влияния ряда факторов на необычное поведение сопротивления в магнитном поле установлены следующие особенности: 1) аппаратура регистрировала появление осцилляций, начиная с полей в несколько десятков эрстед. Амплитуда осцилляций резко нарастает в магнитном поле, а затем столь же резко уменьшается до полного исчезновения осцилляций при некотором значении H_d , соответствующем условию $r \approx d$, где r — радиус орбиты электронов. 2) Эффект Шубникова — де Гааза наблюдается в полях значительно больших граничного значения H_d , начинаясь примерно с полей 10 кэ. 3) Осцилляции наблюдаются при любой взаимной ориентации магнитного поля, измерительного тока I и нормали к плоскости ленточек n . 4) Анализ формы кривых $\rho(H)$ и $\frac{d\rho}{dH} = f(H)$ в простейших случаях позволяет заключить, что форма осциллирующей части сопротивления $\Delta\rho_{\text{осц}}(H)$ напоминает меандр — прямоугольные выступы. 5) Положение осцилля-

ционных пиков и граница существования эффекта H_d зависят от величины измерительного тока. При увеличении тока H_d смещается в область меньших полей. Уменьшение тока приводит к стабилизации положения пиков.

$\frac{\partial \rho}{\partial H}$, отн. ед.

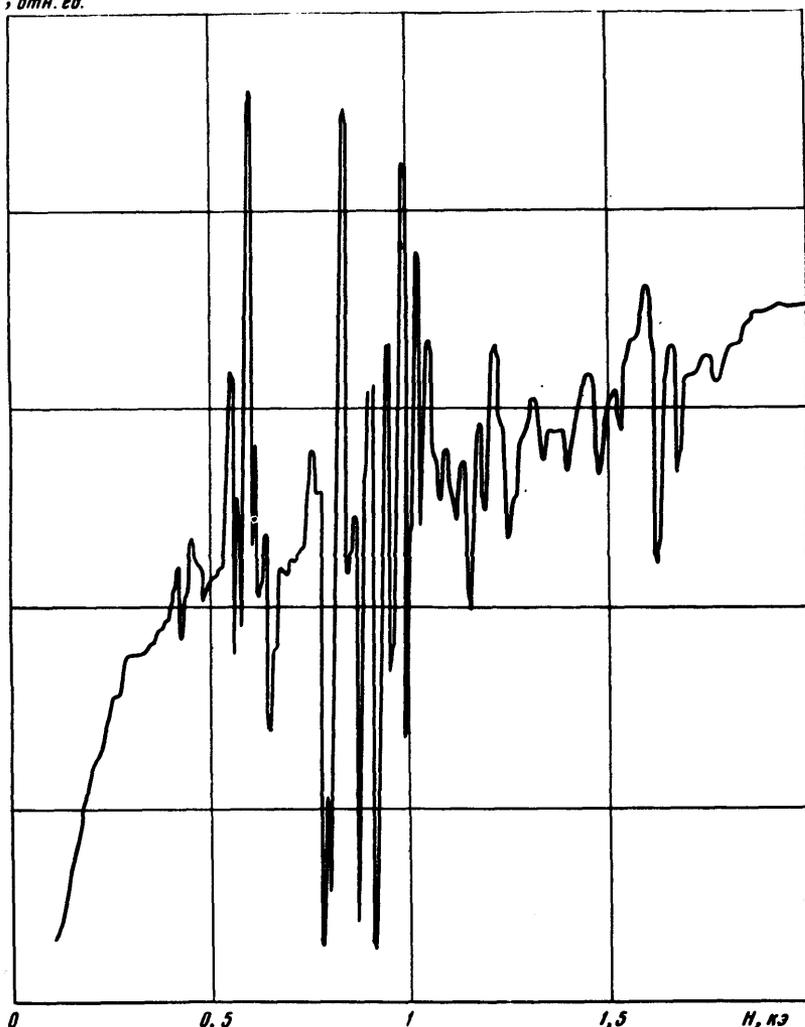


Рис. 3

В настоящее время нам не удалось найти общую закономерность, которой подчиняются положения осцилляционных пиков в магнитном поле. В больших полях перед исчезновением эффекта можно заметить, что расстояние между пиками уменьшается с ростом H . Например, на рис. 2 номера пиков 1, ... 6 удовлетворяют условию $m \sim H^2$.

При установлении физической природы описанного выше явления мы исходим из следующего: 1) явление чувствительно к размерам образца. Граница существования эффекта соответствует магнитному полю, при котором радиус кривизны носителей тока в висмуте r срав-

нивается с толщиной образца. 2) При условии $d < \lambda$, r основную роль в процессах рассеяния электронов играет поверхность. 3) Для таких совершенных образцов, как вискеры, и таких металлов, как висмут, взаимодействие электронов с поверхностью близко к зеркальному.

Имея это в виду, мы полагаем, что природа новых осцилляций сопротивления связана с существованием в металле квантовых поверхностных уровней, возникающих в магнитном поле при зеркальном взаимодействии электронов с одной поверхностью образца (движение по усеченным орбитам поверхности Ферми).

Квантовые поверхностные уровни этого типа были обнаружены Хайкиным при исследовании поверхностного импеданса металлов в слабых магнитных полях [3]. Физическая причина, приводящая здесь к осцилляциям, связана с переходами между квантовыми уровнями, возникающими при равенстве между энергией высокочастотного поля и разностью энергий между уровнями. Теоретическая интерпретация результатов работы [3] дана Ну и Пранги [4].

Спектр поверхностных уровней для электронов, взаимодействующих с двумя поверхностями образца, был рассмотрен ранее Лифшицем и Косевичем в связи с изучением осцилляций магнитного момента на образцах ограниченных размеров [5].

Следствием существования квантовых поверхностных уровней могут быть осцилляции различных термодинамических характеристик металла, например, магнитного момента, что может быть обнаружено в эффектах типа де Гааза – ван Альфена на экстремальных по площади усеченных орбитах поверхности Ферми. Осцилляции в этом случае связаны с периодическим изменением числа квантовых уровней с энергией, меньшей энергии Ферми. Согласно [5] амплитуда осцилляций должна возрастать с ростом отношения d/r , а при $d/2r > 1$ осцилляции превращаются в обычный эффект де Гааза – ван Альфена или Шубникова – де Гааза на замкнутых экстремальных орбитах. Подобное поведение не наблюдается в наших экспериментах – осцилляции исчезают задолго до того, как появляется эффект Шубникова – де Гааза.

Помимо этих двух принципов "отбора" квантовых поверхностных уровней (резонансный и прохождение уровня Ландау через уровень Ферми) может существовать "размерный" принцип: в реальном образце ограниченных размеров при заданном значении H может разместиться конечное число квантовых поверхностных уровней Хайкина. При изменении магнитного поля это число меняется, что приводит к перераспределению электронов по уровням и, как следствие, к скачкообразному изменению плотности состояния электронов вблизи поверхности Ферми.

"Размерный" принцип объясняет ограниченность области существования осцилляций. Действительно, зависимость числа поверхностных квантовых уровней m от магнитного поля определяется из условия $z_m = d$, где z_m высота дуги усеченной орбиты электрона. Так как z_m не может быть больше, чем диаметр орбиты, то условия $2r = z_m = d$ определяют одновременно максимальное значение числа m и границу существования осцилляций, связанных с перераспре-

делением электронов по уровням в пластине: $m = f(H, d)$. Конечно, для того чтобы эти осцилляции проявились, "размерный" принцип необходимо дополнить "экстремальным": среди усеченных орбит следует отобрать только те, которые ограничивают в импульсном пространстве экстремальную площадь.

Сложность наблюдаемой осцилляционной картины, по-видимому, связана с тем, что в висмуте имеется четыре эллипсоида поверхностей Ферми. Влияние измерительного тока можно объяснить "деформацией" поверхности Ферми под действием электрического поля (сопротивление образца порядка нескольких ом, измерительный ток, при котором заметно смещение пиков, — миллиамперметры, длина свободного пробега сравнима с расстояниями между токовыми вводами, что в случае висмута дает значение энергии электрического поля, сравнимое с энергией Ферми). Мы не исключаем также, что в области малых полей ($d \ll r$) наблюдаемые осцилляции содержат и квантовый эффект размеров в магнитном поле, предсказанный Недорезовым [6], так как все необходимые для этого условия выполняются.

В заключение выражаем искреннюю благодарность Л.А.Фальковскому за полезные дискуссии и Г.А.Орехановой за помощь в проведении эксперимента.

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
7 апреля 1972 г.

Литература

- [1] Ю.П.Гайдуков, Н.П.Данилова. ПТЭ, в печати.
 - [2] Ю.П.Гайдуков, Я.Кадлецова. ПТЭ, 4, 193, 1969.
 - [3] М.С.Хайкин. ЖЭТФ, 39, 212, 1960.
 - [4] R.E.Prange, T.W.Nee. Phys. Lett., 25A, 582, 1967.
 - [5] А.М.Косевич, И.М.Лифшиц. ЖЭТФ, 29, 743, 1955.
 - [6] С.С.Недорезов. ЖЭТФ, 56, 299, 1969.
-