

ШИРИНА ЛИНИИ ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В ВИСМУТЕ

В.С.Эдельман, С.М.Черемисин

Исследование циклотронного резонанса (ЦР) в металлах позволяет по ширине резонансной линии определить время релаксации носителей тока [1]. В данной работе проведено экспериментальное изучение ЦР в висмуте в диапазоне частот $f = 10 - 76$ Гц и обнаружена зависимость τ от f .

Образец – монокристалл Вi с нормалью, параллельной тригональной оси C_2 , выращен из расплава в разборной кварцевой форме [2]. Образец служил стенкой резонатора. На частотах 10,22; 18,74; 26,4; 37,1 Гц использовался полосковый резонатор [2], на частоте 76,1 Гц – объемный резонатор с круговыми токами. Измерялась переменная составляющая мощности сигнала, прошедшего через резонатор, возникающая при модуляции магнитного поля с частотой 12 Гц. Отражения от элементов СВЧ тракта, имевшего длину $\sim 10^2 \lambda$, делали схему чувствительной не только к изменениям добротности Q резонатора ($Q \approx 10^3$), но и его собственной частоты. В результате регистрировался сигнал

$$U \propto a \frac{\partial X}{\partial H} + b \frac{\partial X}{\partial \omega} \quad (1)$$

Магнитное поле H создавалось системой катушек Гельмгольца. Однородность поля в объеме образца не хуже 0,1%. Магнитное поле Земли компенсировалось тремя парами катушек с точностью $\sim 0,01$ э.

Измерялось время релаксации электронов минимальной массы ($m^* = 0,0094 m_0$) при H параллельном бинарной оси C_2 . Если высокочастотный ток J составлял

с магнитным полем $\phi = 30^\circ$, то наблюдался ЦР только от электронов, принадлежащих одному эллипсоиду поверхности Ферми и небольшие ошибки ориентации не изменяли ширину линии ЦР. При измерениях на частоте $18,74 \text{ Гц}$ установлено, что при $\phi = H, C_2 \lesssim 10^\circ$; $\phi = H, J$ на положении, форме и ширине ЦР не сказывается. Сигнал ЦР не зависел от работающего участка образца, находящегося под полоской (площадью $6,7 \times 2 \text{ мм}^2$) и наклона магнитного поля на $\pm 30^\circ$ к плоскости образца. Не наблюдалось так же влияния на ширину линии ЦР многократного охлаждения и отогрева образца до комнатной температуры.

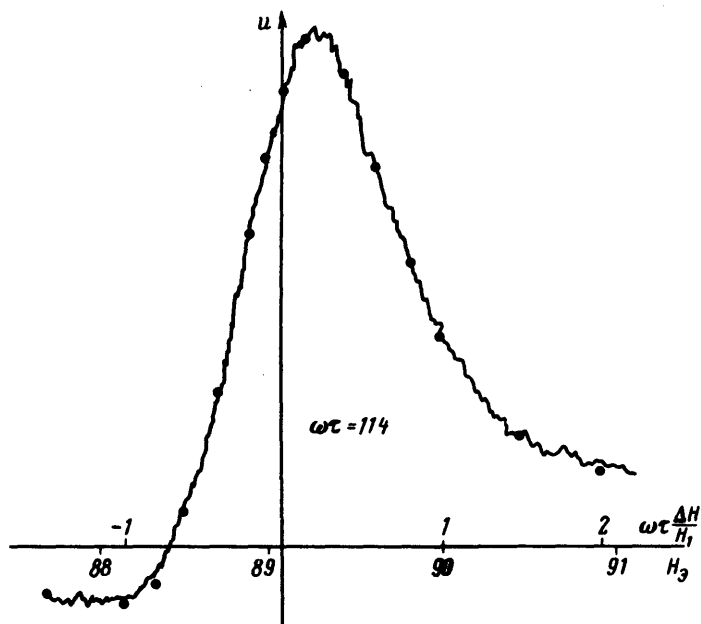


Рис. 1. Линия циклотронного резонанса первого порядка в висмуте: $H \parallel C_2, f = 26,4 \text{ Гц}, T = 0,35^\circ \text{К}$. Сплошная линия — экспериментальная запись; точки — расчет по формуле (3)

Пример записи линии ЦР приведен на рис. 1. Для определения $\omega\tau$ использовалась формула [1]:

$$Z = (R_0 + i X_0) \left(1 + \frac{a}{1 - i \mu} \right), \quad (2)$$

где R_0 и X_0 описывают поверхностное сопротивление вне резонанса, $a \ll 1$, а $\mu = \omega\tau \Delta H / H_0$. При выводе (2) считалось, что масса слабо зависит от импульса p_z и что изменение R и X в резонансе мало. В наших опытах оно не превышает $\sim 10\%$ от полного поверхностного сопротивления.

Для формы линии (1) получаем

$$U \sim A \frac{\mu}{(1 + \mu^2)^2} + B \frac{1 - \mu^2}{(1 + \mu^2)^2} \quad (3)$$

В случае аномального скин-эффекта для записи $\partial R/\partial H$ имеем $A/B = 2/\sqrt{3}$ [1]. Однако, учитывая (1) и тот факт, что скин-эффект перестает быть аномальным (так как на частоте ~ 50 Гц для дырок $V_F/\omega < \delta$) и соотношение между R_0 и X_0 изменяется [3], необходимо подбирать A/B таким, чтобы выражение (3) описывало наблюдаемую форму линии. Например, для записи рис. 1 считалось $A/B = 1,4$. Получаемое значение ωr мало чувствительно к величине этого отношения: при изменении его вдвое (при этом вычисленная форма линии значительно отличается от наблюдаемой), ωr изменяется на $\sim 5\%$.

В опытах на частоте 10,22 и 18,74 Гц узкие резонансные пики (по ширине которых определялось ωr) видны на фоне осцилляций меньшей (в 3 + 5 раз) амплитуды и большей (в 3 + 5 раз) ширины. Природа этих осцилляций не ясна, возможно они связаны с циклотронными волнами [4]. На более высоких частотах они не наблюдались. При обработке записей считалось, что друг на друга наложены две линии разной амплитуды и ширины, и соотношения этих величин подбирались так, чтобы удовлетворить наблюдаемой картине. Если не учитывать этого обстоятельства, то получается заниженное (на $\sim 30\%$, при $f = 10,22$ и на $\sim 10\%$, при $f = 18,74$ Гц) значение ωr .

Ширина линии на каждой частоте измерялась для различных порядков ЦР ($n = 1 + 4$); значение ωr в пределах погрешности измерений не зависело от n .

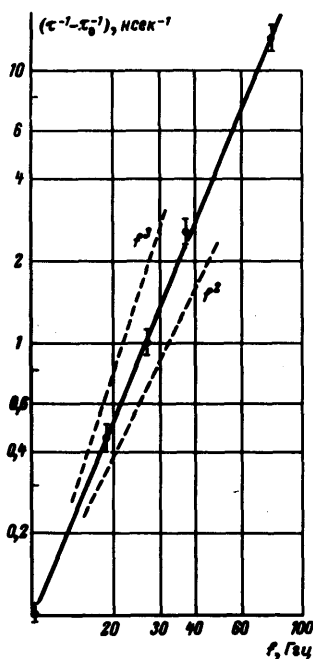


Рис. 2. Зависимость $\tau^{-1} - \tau_0^{-1}$ от частоты. Точка, соответствующая $f = 76,1$ Гц, получена при $T = 1,5^\circ\text{K}$, остальные — при $T = 0,35^\circ\text{K}$. Штрихи около точек показывают ошибку измерений

Обратное время релаксации может быть представлено в виде $\tau^{-1} = \tau_0^{-1} + \tau^{-1}(f, T)$, где $\tau_0 = 2 \pm 0,2$ нсек — остаточное время релаксации, определяемое примесями и дефектами кристалла. Согласно рис. 2, $\tau^{-1}(f, T = 0,35^\circ\text{K}) = (f, \text{ГГц}/26,4)^{2,5 \pm 0,2} \text{нсек}^{-1}$

При изменении температуры получены зависимости (рис. 3) $\tau^{-1}(18,74 \text{ ГГц}, T) = (0,44 \pm 0,04) \cdot T^2 \text{нсек}^{-1}$ и $\tau^{-1}(37,1 \text{ ГГц}, T) = (0,9 \pm 0,2) \cdot T^2 \text{нсек}^{-1}$, т. е. коэффициент при T^2 пропорционален частоте. Отметим, что в [5] на частоте ~ 10 МГц получено $\tau^{-1}(T) = 0,07 T^2 \text{нсек}^{-1}$.

Наблюдаемая зависимость τ от частоты связана, по-видимому с электрон-электронным взаимодействием; затухание возбуждений имеет порядок $(\hbar\omega)^2/E_F$ [6]. Подставляя $E_F = 27,6$ мэв [7] $f \cong 5 \cdot 10^{10}$ иц, получим для относительного затухания квазичастиц $\hbar\omega/E_F \approx 10^{-2}$, что соответствует экспериментальным значениям $\omega\tau \approx 10^2$. Степень 2,5 вместо 2 при ω , возможно, связана с электрон-фононным взаимодействием, дающим затухание возбуждений $\propto (\hbar\omega)^3/\omega_D^2$ [6].

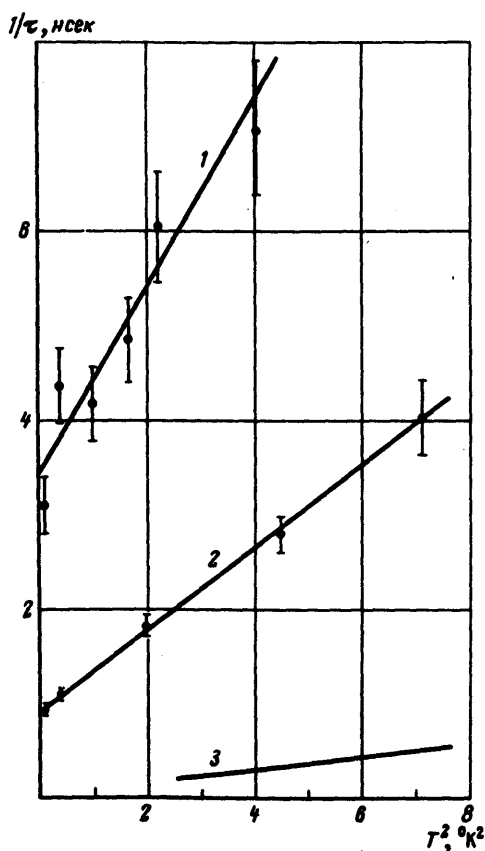


Рис. 3. Зависимость $\tau^{-1}(T^2)$:
 1 - $f = 37,1$ ГГц, 2 - $f = 18,74$ ГГц,
 3 - $\tau^{-1}(T^2) = \tau_0^{-1}$, построено
 по данным [5], $f \sim 10$ МГц

Температурную зависимость ωT^2 следует ожидать для электрон-электронного взаимодействия [6]. Однако зависимость множителя перед T^2 от частоты, остается пока непонятной.

М.С.Хайкину, А.А.Абрикосову, Л.А.Фальковскому, Дж.Ф.Коху, И.Я.Краснополю, В.М.Пудалову авторы благодарны за обсуждение работы, Г.С.Чернышову - за техническую помощь.

Институт физических проблем
 Академии наук СССР

Поступила в редакцию
 11 марта 1970 г.

Литература

- [1] R.G.Chambers. Proc. Phys. Soc., 86, 305, 1965.
- [2] М.С.Хайкин. УФН, 96, 408, 1968.
- [3] R.V.Dingle. Physica, 19, 311, 1953.
- [4] В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, 9, 302, 1969.

[5] В.Ф.Гантмахер, Ю.С.Леонов. Письма в ЖЭТФ, 8, 264, 1968.

[6] А.А.Абрикосов, Л.П.Горьков, И.Е.Дзялошинский. Методы квантовой теории поля в статистической физике, Физматгиз, 1962.

[7] G.E.Smith, G.A.Barraff, J.M.Rowell. IBM J. Res. Dev., 8, 228, 1964.
