

## НЕЛИНЕЙНЫЙ ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС ЭЛЕКТРОНОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ.

В. С. Эдельман

При исследовании циклотронного резонанса электронов, локализованных над поверхностью жидкого гелия, при  $T \approx 0,4$  К наблюдался разогрев электронов излучением частоты  $\sim 17,8$  Гц мощностью  $\sim 10^{-10}$  Вт, приводящий к их переходу с основного состояния в квазинепрерывный спектр. При этом появлялась узкая резонансная линия с относительной шириной, достигавшей  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  при поле, соответствующем циклотронному резонансу свободных электронов и не зависящем от угла между магнитным полем и нормалью к поверхности жидкости.

В работе [1] предсказано появление в полях  $\geq 0,1$  мв/см нелинейности в проводимости двумерной системы электронов, локализованных над поверхностью жидкого гелия, в условиях, когда электроны рассеиваются, в основном, на поверхностных колебаниях — риплонах. При этом разогрев электронов и переход их в возбужденное состояние должен приводить к росту подвижности из-за увеличения среднего расстояния между электронами и поверхностью жидкости.

Электрон-риплонное взаимодействие становится доминирующим при  $T \lesssim 0,7$  К. При  $T = 0,4$  К частота столкновений с риплонами в  $10^3 \div 10^4$  раз выше, чем с атомами пара гелия [2]. Циклотронный резонанс при таких температурах, частоте  $\sim 17,8$  Гц и малых амплитудах СВЧ поля исследовался нами ранее в [3]. В этой работе описаны эксперименты по наблюдению нелинейных явлений, возникающих при увеличении мощности, подводимой к системе электронов. Постановка эксперимента полностью аналогична описанной в [3]. Измерялась зависимость от магнитного поля амплитуды СВЧ волны, отраженной от резонатора, частично заполненного жидким гелием. На поверхность гелия осаждались электроны при кратковременном включении разрядника, расположенного над жидкостью. Электроны удерживались над поверхностью постоянным электрическим полем  $E$ , приложенным между изолированным дном резонатора и его корпусом.

На рис. 1 представлены записи изменения отраженного от резонатора сигнала в зависимости от магнитного поля  $H$ , выраженного в относительных единицах  $\frac{H - H_e}{H_e} = \frac{m - m_e}{m_e}$  ( $H_e$  — резонансное поле при  $m$  равной мас-

се свободного электрона  $m_e$ ). Видно (кривая 1), что при малом уровне СВЧ мощности  $W$ , поступающей в резонатор, наблюдается, как и в [3], один пик с относительной шириной  $\sim 10^{-3}$ . При увеличении  $W$  на фоне этого пика появляется второй пик, на порядок более узкий. Амплитуда СВЧ поля, отвечающая появлению дополнительного пика, имеет величину  $\approx 1$  мв/см,

Характерной особенностью дополнительного пика является то, что соответствующее ему резонансное значение магнитного поля не изменяется, если поле наклонить относительно нормали  $N$  к поверхности жидкости.

При этом более широкий пик, обусловленный резонансом электронов, находящихся в основном состоянии<sup>1)</sup> и движущихся только параллельно поверхности, смещается в сторону сильных полей (сравни кривые 1, 2 и 3), как это и наблюдалось ранее в [3, 4.]. Таким образом, узкий пик обусловлен циклотронным резонансом на электронах, совершающих трехмерное движение и обладающих, следовательно, непрерывным или квазинепрерывным спектром с разностями энергии между квантовыми уровнями<sup>1)</sup> много меньшими расщепления Ландау. Ниже для краткости будем называть эти электроны свободными.

Ширина линии  $\Delta H$  циклотронного резонанса свободных электронов зависит от  $W$  по закону, близкому к  $\Delta H \sim W^{1/2}$  (рис. 2) и на два – три порядка величины больше, чем можно было бы ожидать при рассеянии на парах гелия. Из этого можно заключить, что свободные электроны имеют температуру  $T^* \gg T = 0,4$  К, при которой находится жидкий гелий. Оценка частоты столкновений по значениям  $\Delta H$  дает  $\nu_{\text{СТ}} \approx 3 \cdot 10^6 \div 3 \cdot 10^7 \text{сек}^{-1}$ .

Энергия, поглощаемая электронами при резонансе, пропорциональна  $W/\nu_{\text{СТ}}$ , а скорость потери энергии пропорциональна  $\epsilon(T^*)\nu_{\text{СТ}}$ , где  $\epsilon(T^*)$  – энергия, теряемая при каждом столкновении электронами. Из баланса энергии следует

$$\epsilon(T^*) \sim W/\nu_{\text{СТ}}^2. \quad (1)$$

Частоту столкновений можно, в принципе, определить из записей типа представленной на рис. 1. К сожалению, получить точное значение  $\nu_{\text{СТ}}$  трудно, так как, очевидно,  $T^*$  изменяется при расстройке относительно строгого резонанса, что приводит к искажению формы линии и ее уширению. Однако, учитывая, что во всем диапазоне изменения  $W$  форма линии, близкая к колоколообразной, практически не изменялась, можно считать, что ее полуширина пропорциональна  $\nu_{\text{СТ}}$ . Подставляя в (1)  $\nu_{\text{СТ}} \Delta H \sim W^{1/2}$  (рис. 2), получим

$$\epsilon(T^*) = \text{const}. \quad (2)$$

Постоянство  $\epsilon(T^*)$  означает, что доминирующий вклад в рассеяние дают процессы, связанные с возбуждением либо плазменных колебаний с волновым вектором  $k \approx \pi\sqrt{n}$  ( $n$  – поверхностная плотность электронов) [5], либо поверхностных или объемных колебаний жидкого гелия (например, ротон) с волновым вектором  $k \approx \pi/a \approx 1 \text{Å}^{-1}$ , где  $a$  – межатомное расстояние. Определить, какой из этих процессов является доминирующим по-видимому, станет возможным после проведения экспериментов, в которых  $n$  и прижимающее поле  $E$  будут варьироваться в широких пределах.

Так как механизм рассеяния электронов однозначно не установлен, то по наблюдаемой ширине резонанса пока невозможно установить  $T^*$ . Можно только утверждать, что  $T^* < 10^4$  К, так как электроны с энергией  $\sim 10^4$  К  $\approx 13\text{эВ}$  могли бы преодолеть энергетический барьер на границе жидкость – пар и уйти на нижний электрод. В результате не осталось бы электронов над поверхностью гелия.

<sup>1)</sup> Имеется в виду квантование движения электронов в направлении, перпендикулярном поверхности жидкого гелия.

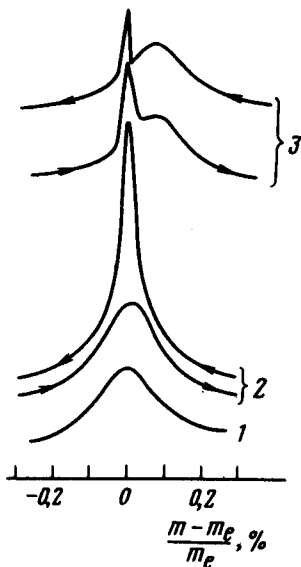


Рис. 1. Зависимость от магнитного поля амплитуды волны частотой  $17,80 \text{ Гц}$ , отраженной от резонатора: 1, 2 –  $H \parallel N$ , 3 –  $\perp H, N = 2,5^\circ$ . Мощность СВЧ, поступающая в резонатор, при записи кривых 2, 3 была на  $\sim 1 \text{ дБ}$  больше, чем для кривой 1. Поверхностная плотность электронов  $n = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , прижимающее поле  $E = 20 \text{ в/см}$ . Нулю шкалы абсцисс соответствует  $H = 6359 \text{ э}$

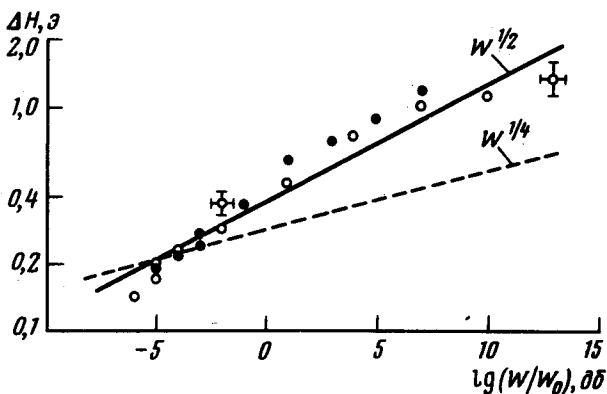


Рис. 2. Зависимость полуширины на полувывоте линии циклотронного резонанса свободных электронов от СВЧ мощности  $W$ , рассеиваемой в резонаторе:  $W_0 \approx 10^{-10} \text{ вт}$ .  $\bullet$  –  $n = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ,  $E = 18 \text{ в/см}$ ;  $\circ$  –  $n = 1,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ,  $E = 17 \text{ в/см}$

Из (2) можно также заключить, что рассеяние на атомах гелия для свободных электронов не играет заметной роли, так как в этом случае должно быть  $\epsilon(T^*) \propto T^*$ . Так как при столкновении с атомами  $\nu_{CT} \propto \sqrt{T^*}$ , то при рассеянии на парах должна была бы выполняться зависимость  $\Delta H \propto W^{1/4}$ , которая расходится с экспериментом (рис. 2). Численные оценки показывают, что даже при  $T \approx 10^4 \text{ К}$  частота столкновений с атомами при  $T = 0,4 \text{ К}$  должна быть  $\nu_{CT} \lesssim 5 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$ , что меньше экспериментальной оцененной величины.

В заключение отметим, что при мощностях СВЧ сигнала, близких к пороговой, при которой появляются свободные электроны, наблюдается "жесткое" возбуждение циклотронного резонанса на свободных электронах (рис. 1). Так, на кривой 3, соответствующей уменьшению поля, появление дополнительного резонанса задерживается, а на кривой 2 при

росте поля дополнительный резонанс полностью отсутствует. Обсуждать механизм этого явления нам представляется преждевременным.

П.Л.Капице автор благодарен за интерес к работе, М.С.Хайкину, А.Ф.Андрееву, В.П.Шикину, А.П.Володину – за обсуждение, Г.С.Чернышеву за техническую помощь.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
23 марта 1977 г.

### Литература

- [1] В.Б.Шикин, Ю.П.Монарха. ФНТ, 1, 957, 1975.
  - [2] С.С.Grimes, G.Adams. Phys. Rev. Lett., 36, 145, 1976.
  - [3] В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, 24, 510, 1976.
  - [4] Т.Р.Brown, С.С.Grimes. Phys. Rev. Lett., 29, 1233, 1972.
  - [5] Н.Fukuyama. Sol. St. Comm. 17, 1323, 1975.
-