

ЭФФЕКТИВНАЯ МАССА ЭЛЕКТРОНОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

В.С.Эдельман

Методом циклотронного резонанса при температуре $\sim 0,4\text{К}$ измерена эффективная масса m и время релаксации электронов, локализованных над поверхностью жидкого ${}^4\text{He}$. При значениях прижимающего поля $\leq 15 \text{ в/см}$ $m = (1,0005 \pm 0,0004) m_0$ и при увеличении поля линейно уменьшается с быстротой $\sim 2 \cdot 10^{-5} \text{ в}^{-1} \cdot \text{см}$ при плотности электронов $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Подвижность в слабых полях равна $(1,15 \pm 0,15) \cdot 10^7 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ и падает при росте прижимающего поля.

При исследовании электронов, локализованных над поверхностью жидкого гелия, большой интерес представляет изучение их свойств при температуре ниже 1К, когда благодаря малой плотности пара столкновения с газом перестают играть какую-либо роль. Проявляющемуся в этих условиях взаимодействию электронов между собой и с колебаниями поверхности жидкости (электрон-риплонному взаимодействию) посвящен целый ряд теоретических работ (см. обзоры [1, 2]). Перспективным является исследование при $T < 1\text{К}$ циклотронного резонанса (ЦР) в системе поверхностных электронов наблюдавшегося ранее Граймсом и Брауном [3]. Это прямой и наиболее точный метод измерения эффективной массы m . Исследование влияния внешних воздействий, например, прижимающего электрического поля E , поверхностной плотности носителей n и т. п. существенно в связи с проблемой образования электрон-риплонных состояний [4] и вигнеровской кристаллизации электронов [5, 6]. По ширине резонансной линии возможно также определить время релаксации $\tau = H_p / \omega \delta H = mc / e \delta H$ ($H_p \omega$ — резонансное поле и угловая частота, δH — полуширина линии ЦР на полувысоте) и вычислить подвижность зарядов

$$\mu = e\tau/m = c/\delta H. \quad (1)$$

Нами проведено измерение ЦР электронов, локализованных над поверхностью жидкого ${}^4\text{He}$ на частоте $\sim 17 \text{ ГГц}$ при температуре $\sim 0,4\text{К}$. Измерялся коэффициент отражения СВЧ волны от цилиндрического TM_{011} -резонатора (ϕ 19, высота $h = 12 \text{ мм}$). Внутри резонатора конденсировался ${}^4\text{He}$. Дно резонатора электрически изолировано от корпуса, и между ними прикладывалось постоянное напряжение $V = 10 \div 300 \text{ в}$, создававшее удерживающее поле.

На поверхность гелия при $T \approx 1\text{К}$ осаждались электроны, появившиеся при включении разрядника, расположенного над жидкостью. При меньших температурах создать поверхностный заряд таким способом не удавалось. По-видимому, при уменьшении плотности пара электроны с энергиями $\sim 100 \text{ эв}$ не успевают затормозиться и проникают в жидкость.

После осаждения электронов на поверхность ${}^4\text{He}$ прибор охлаждался до $\sim 0,4\text{К}$ и измерялась зависимость от магнитного поля коэффици-

ента отражения резонатором СВЧ волны. Мощность, рассеиваемая в резонаторе, была $10^{-10} \div 10^{-11}$ вт. Заметное уширение резонансной линии и нелинейные эффекты наблюдались при мощности в ~ 10 раз больше.

Магнитное поле ~ 6 кэ, создаваемое сверхпроводящим соленоидом, прикладывалось параллельно нормали N к свободной поверхности ${}^4\text{He}$ с точностью $\sim 5^\circ$. Направление $H \parallel N$ определялось по минимальному значению поля ЦР. Как и в работе [3], при изменении направления H (в пределах $\pm 4^\circ$) наблюдался рост m , близкий к зависимости $1/\cos(\alpha H, N)$ что подтверждает двумерный характер движения электронов, участвующих в резонансе. Напряженность магнитного поля измерялась с точностью $\sim 0,03 \div 0,04\%$ датчиком Холла, расположенным внутри соленоида.

На рис. 1 приведен пример записи ЦР при различных значениях прижимающего поля и поверхностной плотности электронов. Считалось, что при горении разряда на поверхность жидкости осаждалось $n = \frac{V}{2\pi e d}$ (2) зарядов (d — толщина слоя жидкого гелия), соответствующее экранировке прижимающего поля над жидкостью. При уменьшении плотности соответственно уменьшалась, что приводило к пропорциональному уменьшению площади под резонансной кривой. При последующем увеличении V , как и в работе [7], концентрация электронов опять возрастала, однако, как правило, не достигала максимально возможного значения (2).

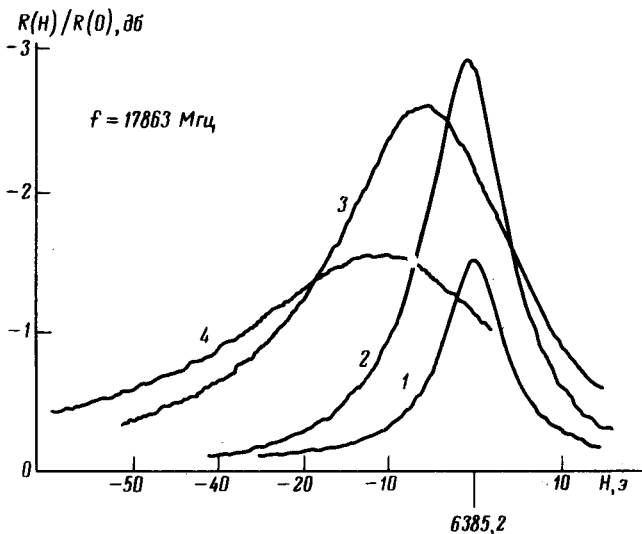


Рис. 1. Зависимость от магнитного поля коэффициента отражения от резонатора: 1 — $E = 15$ в/см, $n = 7 \cdot 10^7$ см $^{-2}$; 2 — $E = 30$ в/см, $n = 1,4 \cdot 10^8$ см $^{-2}$; 3 — $E = 120$ в/см, $n = 3 \cdot 10^8$ см $^{-2}$; 4 — $E = 230$ в/см, $n = 3 \cdot 10^8$ см $^{-2}$

Изменения n (или его постоянство) можно было определить по площади под резонансной кривой. Необходимый уход электронов, по-видимому, вызван их собиранием на изолятор разрядника, заряжавшийся при горении разряда.

Результаты измерения $\delta H(E, n)$ и $m(E, n)$ представлены на рис. 2. Наиболее интересным результатом является пропорциональное полю изменение эффективной массы, которая при $n = 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ в поле 230 в/см уменьшается на $\sim 0,4\%$ от измеренного при $E = 14 \text{ в/см}$ значения $m = (1,00005 \pm 0,0004) m_0$, где m_0 — масса свободного электрона. Приведенное значение m — среднее по четырем измерениям. Погрешность соответствует разбросу измеренных значений и совпадает с погрешностью измерения напряженности магнитного поля.

Как видно из рис. 2, быстрая изменения m зависит от концентрации электронов. При $n = 7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ смещение резонанса практически не наблюдалось. Правда, надо отметить, что из-за сильного уширения линии ЦР и связанного с этим падения амплитуды сигнала до уровня шумов, измерения при малых n были возможны в более узком диапазоне изменений E , а их точность была существенно ниже.

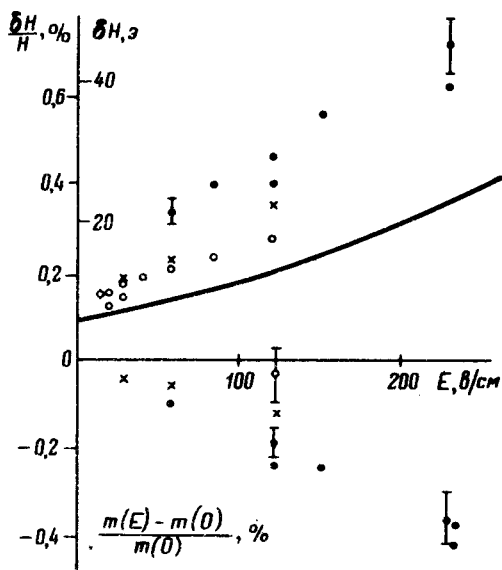


Рис. 2. Зависимость от прижимающего поля E ширины резонансной кривой δH (вверху) и эффективной массы m (внизу): \bullet — $n = 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$; \times — $1,4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$; \circ — $7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$

Подвижность электронов, рассчитанная по формуле (1) при $E \rightarrow 0$ составила $\mu(0) = (1,15 \pm 0,15) \cdot 10^7 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$, что в пределах погрешности совпадает со значением, полученным Граймсом и Адамсом [8]. Зависимость $\mu(E)$ близка к полученной в [8] только при малой концентрации электронов $n = 7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$. При больших концентрациях значения δH соответствуют заметно меньшей подвижности (см. рис. 2). Возможно, это связано с вариациями концентрации электронов вдоль поверхности, которые могут быть вызваны малым, $\sim 1 \div 2^\circ$, наклоном дна резонатора к горизонту. Так как m зависит от n , то это может дать уширение наблюдаемого резонанса.

В работе [9] результаты, полученные в [8] при $T = 0,5\text{К}$, были удовлетворительно объяснены электрон-риплонным взаимодействием. При $T = 0,72\text{К}$ нами измерено $\mu = (5,6 \pm 0,6) \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$, что в ~ 2 раза меньше, чем в [8]. Следует отметить, что Рыбалко и Ковдря в диапазоне температур $0,7 \div 0,4\text{К}$ также наблюдали двукратное увеличение под-

вижности, хотя численные значения μ были в ~ 3 раза меньшими [10]. В соответствии с расчетом [9], $\mu(0,7\text{К})/\mu(0,4\text{К}) = 1,7$. Учет столкновений с газом увеличивает это отношение до $\sim 2,1$.

Что касается зависимости $m(E, n)$, то, в принципе, она может вызываться ростом электрон-риплонного взаимодействия при увеличении поля E [4]. Однако, в этом случае уменьшение эффективной массы должно быть пропорционально E^4 , не зависит от n и в поле ~ 300 в/см не превосходит $\sim 10^{-4}\%$.

Другая возможность связана с электрон-электронным взаимодействием. Согласно проведенному в [6] расчету, собственная частота колебаний двумерной плазмы совпадает с циклотронной частотой Ω только при волновом числе $k = 0$. Так как резонатор имеет конечные размеры, то колебания происходят с конечным $k = 2\pi/\lambda$, $\lambda \approx 1$ см, и их частота несколько выше Ω . Подставляя численные значения n и k в формулы, полученные в [6], можно оценить $\frac{m(0) - m(n)}{m(0)} \lesssim 10^{-4}$, т. е. в $10 \div 100$ раз меньше наблюдаемых. Отметим также, что в этом случае нет зависимости $m(E)$.

Таким образом, обнаруженное изменение эффективной массы не может быть объяснено в настоящее время на базе существующих теоретических работ.

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

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
30 сентября 1976 г.

Литература

- [1] M.W.Cole. Rev. Mod. Phys., 46, 451, 1973.
- [2] В.Б.Шикин, Ю.П.Монарха. ФНТ, 1, 957, 1975.
- [3] T.R.Brown, C.C.Grimes. Phys. Rev. Lett., 29, 1233, 1972.
- [4] В.Б.Шикин. Письма в ЖЭТФ, 22, 328, 1975.
- [5] Л.П.Горьков, Д.М.Черникова. Письма в ЖЭТФ, 18, 199, 1973.
- [6] H.Fukuyama. Sol. St. Comm., 17, 1323, 1975.
- [7] А.П.Володин, М.С.Хайкин, В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, 23, 524, 1976.
- [8] C.C.Grimes, G.Adams. Phys. Rev. Lett., 36, 145, 1976.
- [9] P.M.Platzman, G.Beni. Phys. Rev. Lett., 36, 626, 1976.
- [10] А.С.Рыбалко, Ю.З.Ковдря. Письма в ЖЭТФ, 22, 569, 1975.