

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ НАД ГЕЛИЕВОЙ ПЛЕНКОЙ

А.П.Володин, М.С.Хайкин, В.С.Эдельман

Описаны опыты по обнаружению поверхностных электронных состояний над гелиевой сверхтекучей пленкой, смачивающей диэлектрик и металл. Измерены подвижность $\sim 10^{-1}$ см²/в.сек и поверхностная плотность $\sim 10^{10}$ электрон/см² для случая металлической подложки.

Известно, что над поверхностью жидкого гелия существуют электронные состояния, обусловленные барьером ~ 1 эв, препятствующим проникновению электрона в гелий, и действием сил электростатического притяжения [1,2]. В работах [2,3] предсказано существование аналогичных состояний с энергией связи $\sim 4 \cdot 10^{-2}$ эв над гелиевой пленкой, смачивающей поверхность диэлектрика или металла. Потенциал сил электростатического притяжения в этом случае обусловлен, в основном подложкой, и эффективное прижимающее поле E_{\perp} достигает величины $\sim 3 \cdot 10^4$ в/см.

Ранее в работе [4] упоминалось о наблюдении циклотронного резонанса на электронах над пленкой гелия. В [5] сообщалось о появлении заряда на свободной поверхности гелия, которое авторы объясняли дрейфом электронов вдоль пленки. Оценки подвижности в обоих случаях ($\mu \sim 10^6$ см²/в.сек и $\mu \sim 10^{-6}$ см²/в.сек соответственно) отличаются на ~ 6 порядков от измеренной нами величины (см. ниже). Таким образом, нет уверенности, что наблюдавшиеся в обоих работах явления, связаны с электронами над пленкой.

В статье описаны опыты, установившие существование поверхностных состояний электронов над пленкой гелия. Измерения проведены в приборе, схематически показанном на рис. 1. Источником электронов служил электрический разряд в газе вблизи острого разрядника 1. Постоянное электрическое поле E_{\perp} , прижимающее электроны к поверхности гелия, прикладывалось между медным цилиндрическим стаканом 2 и плоской спиральной катушкой радиочастотного измерительного контура 5. Контур накрыт стеклянным цилиндрическим стаканом с плоским дном 4, на внешнюю поверхность которого (за исключением центральной части дна ϕ 18 мм) напылена пленка из алюминия. Измерительное устройство помещалось в стеклянном сосуде 6, располагавшемся в криостате выше уровня жидкого гелия. Гелий подавался в сосуд при помощи термомеханического эффекта, возникавшего при включении нагревателя 3, помещенного в капилляре. Положение уровня гелия измерялось катетометром и регулировалось изменением мощности, подводимой к нагревателю 3.

Ход опыта. После кратковременного ($\sim 0,1$ сек) разряда, создаваемого разрядником 1, добротность измерительного контура (собственная частота контура 3,29 мГц, добротность $Q \sim 300$) падает из-за пог-

лощения энергии электронами, локализовавшимися вблизи поверхности жидкости (рис. 2, А). Уменьшение добротности при неизменной температуре пропорционально поверхностной плотности электронов, определяемой величиной прижимающего поля (рис. 2 получен при $E_{\perp} \sim 80$ в/см), и, таким образом, может служить мерой поверхностной плотности заряда. †

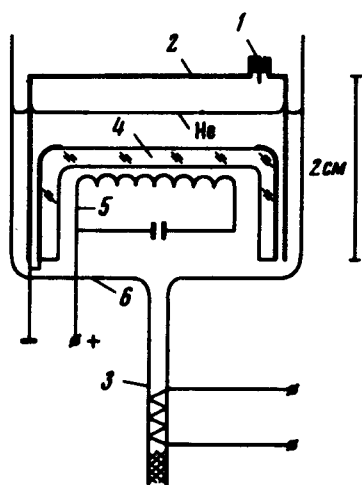


Рис. 1

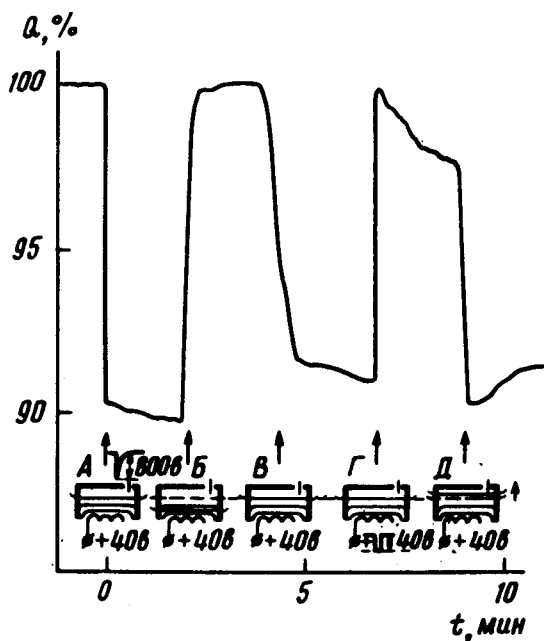


Рис. 2

Пленка над диэлектриком. † При опускании уровня жидкости ниже поверхности стекла стакана 4 добротность контура восстанавливалась до значения предшествующего включению разрядника (рис. 2, Б). †

Подъем уровня жидкости в камере до прежней высоты вновь приводил к падению добротности контура, что свидетельствовало о том, что вблизи поверхности гелия есть электроны (рис. 2, В). (Различие в величинах Q после опытов А и В на рис. 2 связано с небольшой, ~ 50 мкм

разницей в положениях уровня гелия). Выключение прижимающего поля на время ≤ 10 мин при уровне гелия ниже стекла не приводило к существенному изменению добротности после восстановления уровня.

Если в промежутке времени между опытами Б и В повышением температуры уничтожить пленку сверхтекучего гелия, то после восстановления уровня гелия в приборе добротность контура остается высокой. При этом диэлектрик оказывается заряженным, о чем свидетельствует тот факт, что воссоздать прежний заряд над поверхностью возможно только включением разрядника 1 в 2 раза удерживающем потенциале.

Таким образом, изложенные опыты свидетельствуют о существовании поверхностных электронных состояний с малой подвижностью над пленкой гелия, смачивающей поверхность стекла. По предельной чувствительности схемы можно оценить, что подвижность таких электронов $\mu < 10^{-3} \mu_0$, где $\mu_0 = 0,5 \cdot 10^6$ см²/в·сек — подвижность электронов над поверхностью жидкого гелия [4].

Пленка гелия на металлической подложке. Следующий опыт (рис.2,Г) указывает на существование связанных электронных состояний над пленкой сверхтекучего гелия, смачивающей поверхность металла. Выключение E_{\perp} на короткое время ($\sim 0,5$ сек) приводило к быстрому уходу электронов с поверхности гелия в течение $\sim 10^{-4}$ сек [1] и последующему медленному заряду поверхности с постоянной времени $\tau \sim 2$ мин. Подъем уровня гелия на небольшую величину $l \sim 0,01$ см быстро восстанавливает поверхностный заряд (рис. 2 Д).

Заряд поверхности в опытах Г, Д можно объяснить перетеканием на поверхность жидкости электронов, находившихся над пленкой гелия, смачивающей внутреннюю поверхность металлического стакана 2. Перетекание происходит под действием компоненты электрического поля E_{\parallel} вдоль пленки, и их быстрым "смыванием" при подъеме уровня. Никаких других источников электронов при выключенном разряде в измерительном устройстве нет. Это подтверждается опытом с полным и необратимым уходом электронов из прибора при устранении в нем свободной поверхности гелия, например, подъемом уровня выше дна медного стакана 2.

По площади боковой поверхности стакана и величине "смытого" заряда в опытах, подобных Д, получена оценка плотности зарядов над поверхностью металла $N \sim (1+2) \cdot 10^{10}$ электрон/см², что в 100 + 200 раз больше плотности на поверхности жидкости при использовавшихся полях $E_{\perp} \sim 100$ в/см. Наличие заряда большой плотности на боковых поверхностях стакана 2 подтверждается также наблюдавшимся увеличением в два — три раза заряда на свободной поверхности гелия при соответствующем повышении прижимающего потенциала и (для ускорения процесса) ее подъеме на высоту $l \sim 10$ мм.

Скорость натекания заряда (участок Г — Д) при неподвижном уровне сильно зависит от предыстории. Если непосредственно перед выключением прижимающего поля уровень опустить на величину l , то скорость натекания заряда падает пропорционально l вследствие образования вдоль металла зоны, свободной от электронов. Если наоборот, уровень, поднять заведомо выше уровня, при котором включался разрядник, то скорость восстановления заряда значительно (\approx на порядок) возрастает.

По известным времени натекания заряда τ через незаряженную область шириной l и составляющей напряженности электрического поля вдоль пленки гелия ($E_{\parallel} \approx E_{\perp}(d/\tau)$), где $d = 4 \cdot 10^{-6}$ см — толщина пленки гелия; $\tau \approx 1$ см — характерное расстояние до положительного электрода, можно оценить подвижность электронов над гелиевой пленкой $\mu = l/\tau E_{\parallel} \sim 10^{-1}$ см²/в.сек. Эта оценка согласуется с предположением теории об образовании связанных состояний электронов с присоединенной массой $\sim 10^3$ масс атомов гелия [2].

Плотность $N \sim (1+2) \cdot 10^{10}$ электрон/см² над поверхностью пленки, смачивающей металл в пределах точности эксперимента не зависит от E_{\perp} и от времени горения разряда, в течение которого возникало $\sim 10^{14} - 10^{15}$ электронно-ионных пар. Это позволяет предположить, что она соответствует критическому значению, начиная с которого однородная система неустойчива [6]. Формально заменив в выражении для закона дисперсии поверхностных колебаний [6] потенциал сил тяготения силами Ван-дер-Ваальса, численно определяемыми из экспериментальных данных по скорости третьего звука v [7], получаем для критической плотности оценку $N_c \approx 8\rho v^2 d^2 / 3e^2 \sim 10^{11}$ (ρ — плотность гелия). С учетом возможного изменения параметров пленки из-за отсутствия термодинамического равновесия, для поддержания которого мы не принимали особых мер, эту оценку можно считать удовлетворительно совпадающей с экспериментом.

Авторы благодарны П.Л.Капице за интерес к работе Л.П.Горькову, А.Ф.Андрееву, В.Б.Шикину, Ю.Д.Ануфриеву, В.М.Пудалову за обсуждение результатов, Г.С.Чернышеву за техническую помощь.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
26 марта 1976 г.

Литература

- [1] M.W.Cole. Red. Mod. Phys., 46, 451, 1974.
- [2] В.Б.Шикин, Ю.П.Монарха. ФНТ, 1, 957, 1975.
- [3] M.W.Cole. Phys. Rev. B3, 4418, 1971.
- [4] T.R.Brown, C.C.Grimes. Phys. Rev. Lett., 29, 1233, 1972.
- [5] А.С.Рыбалко, Ю.З.Ковдря. ФНТ, 1, 1037, 1975.
- [6] Л.П.Горьков, Д.М.Черникова. Письма в ЖЭТФ, 18, 119, 1973.
- [7] C.W.F.Everitt, K.R.Atkins, A.Denentein. Phys. Rev. 136, A1494, 1964.