

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

А.П.Володин, В.С.Эдельман

Предложен способ повышения критической плотности локализованных над поверхностью жидкого гелия электронов путем использования мелкоструктурной диэлектрической подложки, смачиваемой сверхтекучим гелием. Экспериментально достигнута плотность электронного заряда $\sim 8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, в $\sim 3,5$ раза превосходящая критическую плотность электронов, локализованных над свободной поверхностью гелия.

Возможности экспериментального исследования электронов, локализованных над жидким гелием (или другими криогенными диэлектриками) значительно ограничиваются тем обстоятельством, что заряженная поверхность жидкости теряет устойчивость при весьма умеренных значениях критической плотности электронов $n_{\text{кр}} \approx 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ и напряженности прижимающего электрического поля $E_{\perp \text{кр}} \approx 2 \text{ кВ/см}^1$. В гидродинамическом приближении при максимальной плотности электронов n , соответствующей полной экранировке поля над заряженной поверхностью, критерий устойчивости имеет вид 2 .

$$\left(\frac{3\alpha}{\rho h^4} + g \right) q + \frac{\sigma}{\rho} q^3 - \frac{4\pi e^2 n^2}{\rho} q^2 \frac{1 + \epsilon - (1 - \epsilon) \exp(-2qh)}{1 + \epsilon + (1 - \epsilon) \exp(-2qh)} > 0, \quad (1)$$

где α — постоянная Ван-дер-Ваальса, характеризующая силу, действующую со стороны подложки на гелий; h — толщина слоя гелия над диэлектрической подложкой с относительной проницаемостью ϵ ; q — волновое число для колебаний поверхности гелия; ρ и σ — соответственно плотность и поверхностное натяжение жидкого гелия. Согласно (1), критическая плотность может быть увеличена на один — два порядка при локализации электронов над ван-дер-ваальсовой пленкой¹⁻³. Однако, при этом на электроны кроме внешнего прижимающего поля действуют силы изображения со стороны подложки, создающие эффективное электростатическое поле

$$E_{\text{эфф}} \approx \frac{(\epsilon - 1)e}{4(\epsilon + 1)h^2} \quad (2)$$

$E_{\text{эфф}} \approx 10$ кВ/см при характерных значениях $h \approx 10^6$ см. Толщина пленки плохо контролируется, и для реальных поверхностей может испытывать значительные локальные вариации. Поэтому трудно получить воспроизводимые и однозначные результаты при исследовании электронов над пленкой жидкости.

Получить высокую критическую плотность зарядов и одновременно избавиться от влияния подложки можно, если ее поверхности придать например, структуру типа „дифракционной решетки“, показанную на рис.1. Равновесное состояние незаряженной поверхности жидкости таково: выступы покрыты ван-дер-ваальсовой пленкой с характерной толщиной $\sim 10^6$ см. В промежутках между ними поверхность слегка прогнута. Радиус кривизны на этом участке $R \approx \sigma/\rho g L$, и стрелка прогиба имеет величину $\sim d^2/8R$. При $d \approx 10^4$ см, $L \approx 0,1$ см прогиб составляет $\sim 10^7$ см, т.е. с хорошей точностью поверхность жидкости на подложке является плоской. Влияние силы изображения со стороны подложки на электроны, расположенные в области „глубокого“ слоя, при внешних полях $\gg 1$ кВ/см, как видно из (2), пренебрежимо малы уже при $h' \gtrsim 10^5$ см.

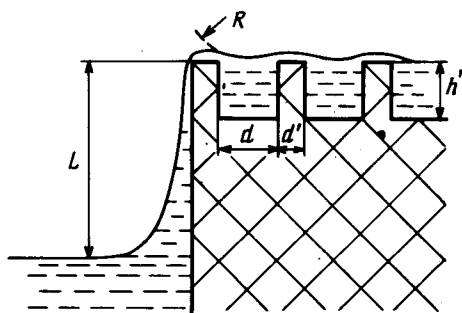


Рис.1

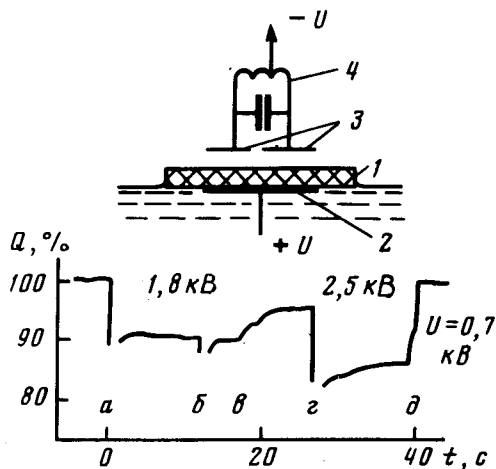


Рис.2

Рис. 2. а — Схема прибора; б — зависимость добротности контура Q от времени. В момент а включен эмиттер электронов. Напряжение U при этом было равно 1,8 кВ; б — повторное включение эмиттера; в — г — U постепенно доведено до 2,5 кВ; г — включен эмиттер; д — U выключено. Отрезком справа показана величина калибровочного сигнала, когда заряд наносился на свободную поверхность жидкого гелия при $U = 0,7$ кВ, лишь немного меньшем напряжении, при котором наблюдалась потеря устойчивости при заряде

При увеличении плотности заряда на поверхности жидкости ее устойчивость может нарушаться двумя способами. Во-первых, может появиться неустойчивость по отношению к длинноволновым колебаниям с $qd \gg 1$. В этом случае критерий устойчивости тот же, что и для однородной пленки (1), с тем отличием, что соответствующую константу α , определяющую

взаимодействие Ван-дер-Ваальса, надо уменьшать в $\sim d' / (d + d')$ раз. При прочих равных условиях, в частности, при одинаковых L , это приведет к изменению $n_{кр}$ пропорционально-

$(d' / (d + d'))^{1/6}$. Заметим, что при нарушении устойчивости в этом случае будет потеря заряд только на тех участках, которые расположены над выступами, при этом сами выступы электризуются. Увеличивая внешнее поле выше критического значения, можно вновь зарядить поверхность жидкости до $\sim n_{кр}$ в области выступов, чему, очевидно, соответствует удвоение плотности зарядов в промежутках между выступами. Указанную процедуру можно повторять.

Поверхность жидкости в промежутках между выступами может потерять заряд только в том случае, если нарушится устойчивость по отношению к коротковолновым колебаниям с $q \geq \pi/d$. Из (1) при $h' \geq d$ получим для этого случая

$$n_{кр} = \frac{1}{2e} \sqrt{\sigma / \pi d}. \quad (3)$$

Так, при достижимых современной технологией $d \approx d' \approx 10^{-4} \div 10^{-5}$ см, критическая плотность возрастает в $\sim 10^2$ раз по сравнению с $n_{кр}$ для массивного гелия.

Увеличение критической плотности электронов для случая диэлектрической подложки, имеющей мелкоячеистую структуру, было проверено экспериментально в приборе, показанном схематично на рис. 2. Подложка 1 из пористого стеклянного фильтра, спеченного из зерен размера $\sim 30 \div 40$ мкм, имела форму прямоугольной пластины толщиной 3,5 мм и помещалась в измерительный конденсатор. Нижний электрод конденсатора 2 располагался непосредственно под подложкой. Верхний электрод 3 состоял из двух расположенных в одной плоскости с зазором 0,05 см пластин, подсоединенных к колебательному контуру с собственной частотой ~ 5 МГц. В ходе эксперимента регистрировались изменения добротности контура Q , обусловленные потерями, вносимыми в контур поверхностными электронами. Поверхность сверхтекучего гелия, параллельная пластинам конденсатора, с помощью термомеханического эффекта могла устанавливаться в любом сечении между электродами конденсатора. К пластинам конденсатора подводилось напряжение U , создающее прижимающее поле E_{\perp} .

Ход опыта иллюстрирует зарегистрированная диаграмма изменения добротности контура с течением времени (рис. 2). В момент времени (а) поверхность гелия над пористой подложкой была заряжена при $U = 1,8$ кВ. Повторное кратковременное включение эмиттера (б) при неизменном U не привело к изменению добротности, что свидетельствует о полной экранировке электронами поля между верхней пластиной конденсатора и поверхностью подложки. На участке (в) – (г) напряжение было увеличено до $U = 2,5$ кВ; эмиттер не включался. Небольшое возрастание добротности при этом вызвано, по-видимому, снижением подвижности электронов под действием E_{\perp} . Включение эмиттера (г) привело к дальнейшему увеличению плотности n без потери устойчивости заряженной поверхностью жидкости.

Сравнение с сигналом, наблюдавшимся в том случае, когда плотность заряда была известна благодаря тому, что он наносился на свободную поверхность гелия, расположенную выше пористой подложки, и только после этого уровень гелия опускался ниже верхней плоскости подложки, позволило оценить, что при $U = 2,5$ кВ достигается плотность $n \geq 5 \cdot 10^9$ см $^{-2}$. Это число занижено, так как не учитывает падения подвижности при увеличении прижимающего поля. Если считать, что над слоем электронов статическое поле экранировано, то получим для $n \approx 8 \cdot 10^9$ см $^{-2}$, что в $\sim 3,5$ раз превышает критическую плотность для свободной поверхности жидкого гелия. Отметим, что это значение не является предельным. Нам не удалось наблюдать потерю устойчивости, так как в приборе при дальнейшем увеличении напряжения зажигался холодный заряд.

Авторы благодарны М.С.Хайкину за обсуждение работы, Г.С.Чернышеву – за техническую помощь.

Литература

1. Эдельман В.С. УФН, 1980, 130, 675.
2. Ikezi H., Platzman P.M. Phys. Rev., 1982, В23, 1145.
3. Татарский В.В., Шикина Н.И., Шикин В.Б. ЖЭТФ, 1982, 82, 747.
4. Эдельман В.С. ЖЭТФ, 1979, 77, 673.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 октября 1982 г.
