

## О СОСТОЯНИИ ПЕРЕСЫЩЕНИЯ 2D ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

В.Б.Шикин

Институт физики твердого тела РАН  
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 9 июня 1999 г.

Обсуждаются причины возникновения пересыщенных состояний для 2D электронной системы на поверхности жидкого гелия и возможность их стационарного существования. Посчитаны основные характеристики 2D электронной системы над гелием в условиях стационарного пересыщения. Показано, что известное состояние насыщения для электронов над гелием является одним из континуума пересыщенных состояний. Отмечены экспериментальные возможности обнаружения и идентификации пересыщенных состояний для электронов на поверхности гелия.

PACS: 73.20.Dx

Традиционное приготовление 2D электронной системы на поверхности жидкого гелия осуществляется с использованием плоского конденсатора, между пластинами которого находится заряженная жидкая граница (см., например, [1]). Разность потенциалов  $V$  на обкладках конденсатора ведет к возникновению электрических полей  $E_+$ ,  $E_-$  над и под этой границей:

$$E_+ = -\frac{4\pi en_s d + V}{d + h}, \quad E_- = \frac{4\pi en_s h - V}{d + h}, \quad d + h \ll W, \quad (1)$$

удерживающих 2D электронную систему конечной плотности  $n_s$  вблизи поверхности пар – жидкость. Здесь  $d$ ,  $h$  – толщина пленки гелия и вакуумный зазор между гелием и верхним электродом,  $2W$  – размеры конденсатора в горизонтальном направлении.

В условиях  $E_+ = 0$ , или

$$V_s = -4\pi en_s d \quad (2)$$

электроны перестают удерживаться внешним полем на жидкой подложке и "уходят" в объем газовой фазы гелия. При этом по отношению к (2) говорят о состоянии насыщения в 2D электронной системе.

Формула (2) позволяет достаточно просто определять плотность  $n_s$ , и потому изучение свойств 2D электронной системы над гелием именно в состоянии насыщения является весьма распространенным явлением. Тем не менее, существенные детали состояния с насыщением нуждаются в уточнениях, предлагаемых в данной работе. Речь идет об описании насыщения как одного из континуума пересыщенных состояний в системе электронов над гелием, когда заряды находятся не только на основной жидкой поверхности гелия, но имеют возможность локализоваться и на других, покрытых тонкой пленкой гелия, частях ячейки, в частности на верхней пластине конденсатора. Свойства возникающей двухслойной электронной структуры до сих пор систематически не обсуждались.

1.Заметим прежде всего, что для реализации формул (1), (2) необходим свободный доступ электронов к верхней обкладке конденсатора. В действительности же при работе со сверхтекучим гелием все внутренние детали ячейки, включая

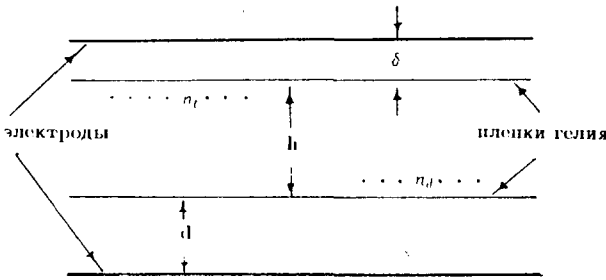


Рис.1. Схема расположения электродов над пленками гелия в двухкомпонентном приближении

верхнюю пластину конденсатора, покрыты тонкой (порядка естественной толщины  $\delta \sim 10^{-6}$  см) пленкой гелия. В этих условиях общая картина заполнения электронами вакуумного промежутка над гелием меняется, ибо в процессе зарядки электроны оседают с плотностью  $n_d$  не только на нижней пленке  $d$ , но и с плотностью  $n_t$  на верхней пленке  $\delta$ :

$$n_d + n_t = n_s. \quad (3)$$

Состояние с двумя 2D электронными слоями ниже именуется пересыщенным. Схематически состояние пересыщения изображено на рис. 1. Для его описания в электростатическом приближении необходимо (наряду с набором определений, ведущих к формулам (1)) обращение в нуль электрического поля между двумя 2D электронными слоями. При этом

$$4\pi en_d = \frac{4\pi en_s \delta - V}{d + \delta}, \quad n_t = n_s - n_d. \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что в рамках двухслойной модели конечность электронной плотности над гелием возможна без участия  $V \neq 0$ , ибо и в его отсутствии

$$4\pi en_d^0 = \frac{4\pi en_s \delta}{d + \delta}, \quad 4\pi en_t^0 = \frac{4\pi en_s d}{d + \delta}. \quad (5)$$

Удержание электронов в локальных состояниях на верхней и нижней пленках гелия обеспечивается здесь внутренними кулоновскими полями. А полное число электронов  $N$  лимитируется лишь устойчивостью заряженной поверхности гелия.

Естественно, что при критическом значении  $V_s$  (2) в электростатическом приближении все электроны находятся на  $d$  пленке, то есть  $n_d = n_s$ .

Таким образом, в задаче с пленками  $\delta$  и  $d$  расширяется область существования 2D равновесных электронных состояний над гелием. Их наличие становится возможным и в условиях пересыщения

$$0 \leq V \leq V_s, \quad (6)$$

а насыщение (2) можно трактовать в качестве одного из пересыщенных состояний.

Отметим также, что согласно (4) в пересыщенном состоянии пропадает возможность контролировать с помощью  $V$  уровень заряженности основной части 2D электронной системы, локализованной на жидкой подложке  $d$ . Поэтому стандартная процедура оценки  $n_s$ , в которой задается  $V$  и затем производится зарядка ячейки вплоть до ее насыщения (то есть до плотности  $n_s$  (2)), в действительности оставляет

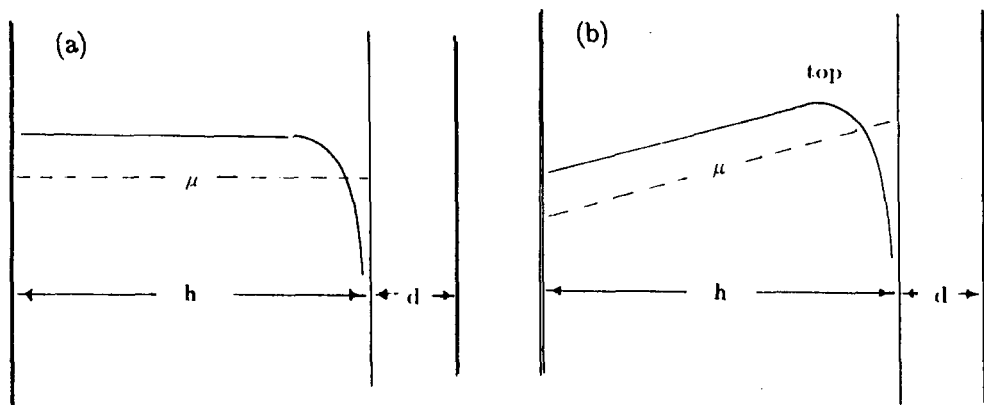


Рис.2. Энергетические схемы для однокомпонентной модели: а – насыщенное состояние, являющееся границей устойчивости для однокомпонентной модели заполнения; в этом состоянии еще можно говорить о равновесии, поэтому электрохимический потенциал  $\mu$  изображен константой вдоль ячейки; б – пересыщение в однокомпонентном приближении; небольшой (по сравнению с ситуацией а) наклон  $\mu$  ведет к возникновению неравновесного пересыщенного состояния с расположенной вблизи пленки  $d$  вершиной барьера *top*, возникающего при конкуренции электростатической энергии и потенциала сил изображения

величину  $n_s$  произвольной. Для оценки фракций  $n_d$  и  $n_t$  нужны дополнительные сведения о поведении 2D электронной системы в пересыщенном состоянии.

2. Одним из стандартных каналов получения информации о плотности  $n_s$  является измерение емкости ячейки с 2D электронами. В обсуждаемой модели 2D системы бесконечных размеров речь идет о поведении производной  $dE_-/dV$ , определяющей изменение заряда на нижней пластине при варьировании  $V$  и фиксированном значении  $n_s$ . Эта производная терпит скачок при переходе от ситуации (1) к пересыщенному состоянию (4)

$$\frac{dE_-/dV|_{V>V_s}}{dE_-/dV|_{V<V_s}} = \frac{d + \delta}{d + h} \quad (7)$$

Таким образом, в точке  $V_s$  емкость ячейки скачкообразно меняется (в данном случае возрастает), и это обстоятельство можно использовать для диагностики 2D системы над гелием.

3. Несколько слов о роли сил изображения в задаче о пересыщении. Дело в том, что для значений  $\delta$  порядка  $10^{-6}$  см величина энергии изображения

$$U_t = -e^2/4\delta \quad (8)$$

имеет масштаб 500 К (вместе с возможными корреляционными поправками). В этих условиях чисто электростатическое равновесие между фракциями  $n_d$  и  $n_t$ , обсуждавшееся выше, нуждается в корректировке. Взамен эквипотенциальности промежутка между двумя электронными слоями, использованного выше, естественно потребовать равенства электрохимических потенциалов этих фракций или, что то же,

$$U_t + e\varphi_t + T \ln n_t = U_d + e\varphi_d + T \ln n_d, \quad (9)$$

где соответствующие электроденциалы  $\varphi_t$ ,  $\varphi_d$  берутся из решения электростатической задачи для слоистой системы с двумя плотностями:  $n_t$ ,  $n_d$  на пленках  $\delta$ ,  $d$  и внешней разностью потенциалов  $V$  между пластинами конденсатора.

Учитывая масштаб энергий  $U_t$ ,  $U_d$  и типичные значения гелиевой температуры  $T \leq 1$  К, можно в большинстве случаев пренебрегать в (9) энтропийными вкладками, так что

$$e\varphi_t - e\varphi_d \simeq U_d - U_t. \quad (10)$$

Это соотношение иллюстрирует уровень внешнего воздействия на систему электронов для поддержания фракции  $n_d$  в хотя бы частично заполненном состоянии.

Но в общем именно (9) дает полное представление о равновесии между электронными подсистемами в состоянии пересыщения. В частности, становится ясно, что двухкомпонентность является преобладающим свойством для электронов, локализованных над гелием.

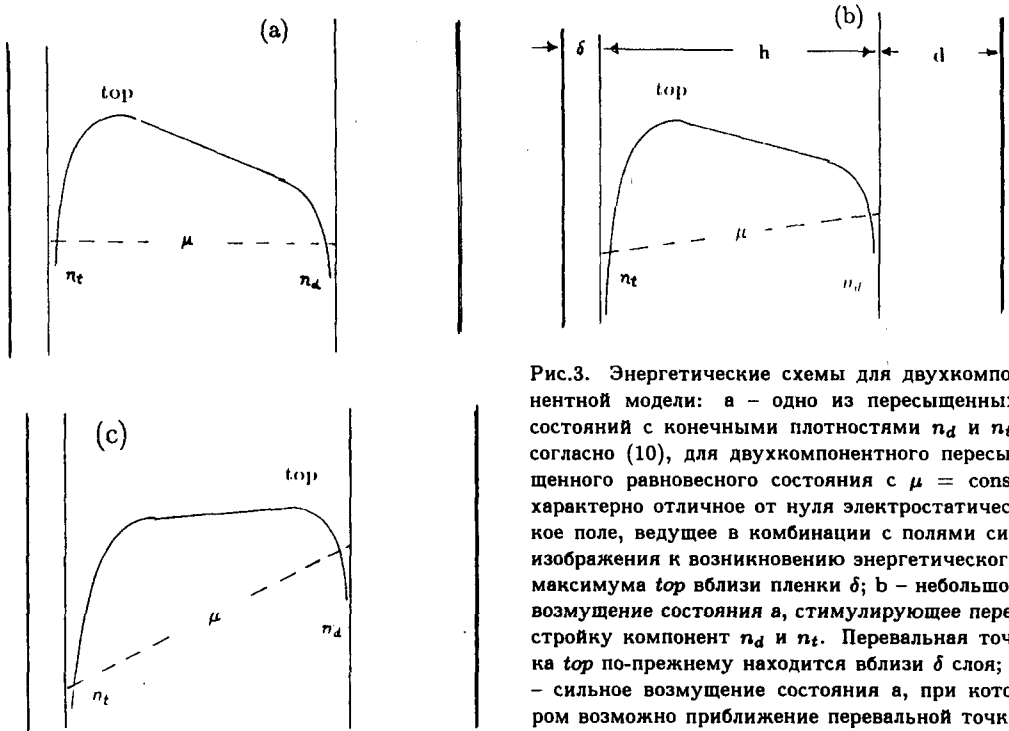


Рис.3. Энергетические схемы для двухкомпонентной модели: а – одно из пересыщенных состояний с конечными плотностями  $n_d$  и  $n_t$ ; согласно (10), для двухкомпонентного пересыщенного равновесного состояния с  $\mu = \text{const}$  характерно отличное от нуля электростатическое поле, ведущее в комбинации с полями сил изображения к возникновению энергетического максимума  $top$  вблизи пленки  $\delta$ ; б – небольшое возмущение состояния а, стимулирующее перестройку компонент  $n_d$  и  $n_t$ . Перевальная точка  $top$  по-прежнему находится вблизи  $\delta$  слоя; в – сильное возмущение состояния а, при котором возможно приближение перевальной точки к пленке  $d$

Распределение полей, заменяющее (1), выглядит так:

$$E_- = \Delta^{-1}[4\pi e(n_d h + n_t \delta) - V], \quad -d \leq x \leq 0, \quad (11)$$

$$E_+ = \Delta^{-1}[4\pi e(n_t \delta - n_d d) - V], \quad 0 \leq x \leq h, \quad (11a)$$

$$E_\delta = -\Delta^{-1}[4\pi e n_t (h + d) + 4\pi e n_d d - V], \quad h \leq x \leq h + \delta, \quad (11b)$$

$$\Delta = h + d + \delta.$$

Нетрудно видеть, что при  $\delta \rightarrow 0, n_d \rightarrow n_s$  формулы (11) переходят в (1). Электропотенциалы, отвечающие полям (11),

$$\varphi_d = E_- d + V, \quad \varphi_t = E_\delta h + (4\pi e n_s - E_-)(h + \delta) \quad (12)$$

вместе с требованием  $n_s = n_t + n_d$  содержат одну неопределенную константу (например,  $n_d$ ), величина которой находится из (9) или (11) с использованием (12).

С экспериментальной точки зрения наиболее интересное влияние сил изображения на структуру пересыщенных состояний должно проявляться в различных кинетических эффектах по разрушению  $n_d$  компоненты. Существующие схемы измерений [2–6] исходят из предположения о существовании насыщенного состояния (2), небольшое возмущение которого ведет к появлению электронного тока с поверхности гелия в вакуум. При этом вершина барьера, преодолеваемого 2D электронами находится вблизи основной границы пар – жидкость (см. рис.2). В задаче с двумя 2D системами максимум эффективного потенциала практически всегда находится вблизи  $\delta$ -слоя (см. рис.3). Следовательно, его характеристики в большой степени определяются равновесными параметрами соответствующего пересыщенного состояния – фактор, до сих пор не принимавшийся во внимание при обсуждении экспериментов по кинетике испарения электронов с поверхности гелия.

В заключение отметим, что учет сверхтекучести гелия и, в частности, его способности покрывать тонкой пленкой все внутренние поверхности ячеек для изучения свойств поверхностных электронов ведет к ряду своеобразных эффектов в заполнении электронами поверхностных состояний. Возникает необходимость введения двухкомпонентной 2D электронной системы. Одна из этих компонент на пленке  $d$  активна и служит предметом различных исследований. Другая, на пленке  $\delta$ , в основном пассивна, являясь сильно локализованной в вертикальном и почти неподвижной в горизонтальном направлениях. Тем не менее ее наличие заметно сказывается на равновесных характеристиках общей 2D системы.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, (грант #98-02-16640) и INTAS (grant Network 97-1643).

- 
1. В.Б.Шишкин, Ю.П.Монарха, *Двумерные заряженные системы в гелии*, М.: Наука, 1989.
  2. Y.Iye, K.Kono, K.Kajita, and W.Sasaki, *JLTP* **34**, 539 (1979).
  3. Y.Iye, K.Kono, K.Kajita, and W.Sasaki, *JLTP* **38**, 293 (1980).
  4. K.Kono, K.Kajita, K.Kobayashi, and W.Sasaki, *Surf. Sci.* **113**, 438 (1982).
  5. E.Andrei, S.Yegel, and L.Menna, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3704 (1991).
  6. L.Menna, S.Yucel, and E.Andrei, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2154 (1993).