

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НАД ПОВЕРХНОСТЯМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОДОРОДА И НЕОНА

А.М.Трояновский, А.П.Володин, М.С.Хайкин

Обнаружена локализация электронов на стационарных диэлектрических уровнях энергии близ поверхностей кристаллических водорода и неона. Измерена подвижность локализованных электронов в двумерном слое, зависящая от давления пара и качества поверхности диэлектрика. Плотность локализованных электронов остается неизменной десятки минут.

Локализация электронов близ поверхности диэлектрика в двумерных слоях на стационарных водородоподобных уровнях до сих пор наблюдалась для случая криогенных жидкостей: He^4 [1], He^3 [2], H_2 [3]. Однако, подобные диэлектрические уровни в принципе могут существовать и близ поверхности твердого диэлектрика [4]. Исследование этой возможности интересно прежде всего по двум причинам: 1) переходы электронов между диэлектрическими уровнями, возникающими близ частиц

космической пыли, могут быть причиной космического радиоизлучения в субмиллиметровом диапазоне [5]; 2) плотность электронов в двумерном слое над поверхностью твердого диэлектрика может быть значительно больше, чем над поверхностью жидкости, где она ограничивается неустойчивостью поверхности [6]. В описанных ниже опытах установлена возможность локализации электронов на диэлектрических уровнях близ кристаллических водорода и неона в условиях реального эксперимента и измерена подвижность этих электронов в образуемых ими двумерных слоях.

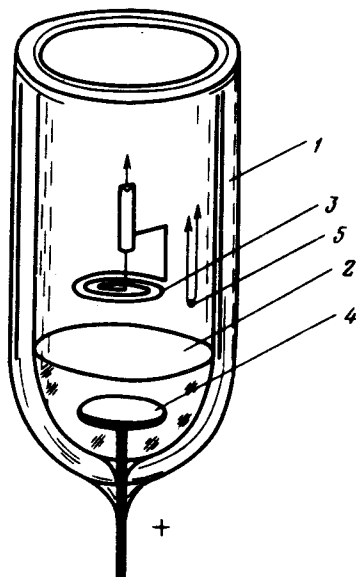


Рис. 1. Схема прибора

Устройство прибора, подобного использованному в работе [3], иллюстрирует рис. 1. Исследуемая жидкость (H_2 или Ne) конденсируется в дьюар 1, находящийся в гелиевом криостате, в таком количестве, чтобы ее уровень 2, измеряемый катетометром, оказался между плоскими электродами 3 и 4 конденсатора. Ввод пластины 4 служит холодильником; температура T дьюара регулируется его положением в криостате. Жидкость кристаллизуется путем медленного охлаждения в течение часа со скоростью $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ см/мин. Получающиеся кристаллы прозрачны и имеют зеркальную поверхность. Электроны эмиттируются вольфрамовым катодом 5, накаливаемым электрическим импульсом, и удерживаются на поверхности диэлектрика полем $E \sim 0,3 \div 1$ кВ/см конденсатора. Наличие электронов и их подвижность определяются по уменьшению на $\sim 5\%$ добротности $Q \sim 350$ измерительного контура (резонансная частота $\sim 5,5$ мГц), плоская катушка которого образует верхний электрод 3.

Эмиттированные электроны под действием поля конденсатора диффундируют в газе к поверхности диэлектрика, теряя свою энергию. Таким образом создается слой электронов близ поверхности твердого водорода при температуре $12 \div 14$ К и давлении паров $14 \div 50$ тор. В

измерениях подвижности при низких давлениях паров использовался слой электронов, полученный при достаточно большой плотности пара с последующим охлаждением прибора. При более низкой температуре 10 ± 11 К (давление 3 ± 10 тор) эмиттируемые электроны не успевают растерять свою энергию, преодолевают потенциальный барьер близ твердого водорода и заряжают поверхность; то же происходит и в опытах с He. Во избежание этого явления применялся "тормозящий газ" — He под давлением 40 тор, который напускался в дьюар перед эмиссией электронов и откачивался после образования двумерного слоя электронов. Включение на короткое время удерживающего поля E приводит к безвозвратному исчезновению локализованных электронов и восстановлению добротности измерительного контура.

Такими методами были получены стабильные слои электронов, локализованных на диэлектрических уровнях энергии близ поверхности кристаллического водорода при температурах 10 ± 14 К и кристаллического неона при температурах 16 ± 20 К.

Добротность измерительного контура зависит от подвижности локализованных электронов μ , их плотности n_e , и геометрии прибора; последнее обстоятельство приводит к необходимости калибровки прибора. Калибровка была произведена в специальных опытах с жидким гелием на основании измеренных в работе [7] значений подвижности электронов, локализованных близ поверхности He⁴. Плотность поверхностных электронов $n_e \sim 10^8$ электрон/см² рассчитывалась из условия полной экранировки электрического поля над ними.

На рис. 2 приведены результаты измерения подвижности μ электронов, локализованных близ поверхности твердого водорода; точки получены в нескольких независимых опытах. Линия с изломом — результат кинетического расчета подвижности двумерного газа электронов в водороде согласно работе [8] (эффективное сечение рассеяния принято равным $5,7 \cdot 10^{-16}$ см²). Излом разделяет области жидкой и твердой фазы и отвечает скачку диэлектрической проницаемости. Для сравнения пунктиром показана зависимость $\mu(n)$ для жидкого He⁴, построенная по данным [7] (n — число атомов в 1 см³, T — температура водорода). Резкое уменьшение подвижности при больших плотностях паров гелия ($n > 10^{20}$ см⁻³) связано с образованием отрицательных ионов — электронных пузырьков в плотном газе [9]. По-видимому, этот же механизм обуславливает отклонение зависимости $\mu(n)$ для водорода от расчетной линейной в области плотностей $n \sim 10^{20}$ см⁻³. При $T \gtrsim 12,5$ К полученная зависимость подвижности поверхностных электронов над жидким и кристаллическим водородом определяется столкновениями электронов с молекулами газа, плотность которого при указанных температурах достаточно высока. Это следует из подобия зависимостей $\mu(n)$ для He и H₂, показанных на рис. 2. При меньших плотностях газа при $T < 11$ К зависимость $\mu(n)$ в пределах погрешности опыта отсутствует и подвижность электронов определяется качеством поверхности кристалла. Это соображение подтверждается тем, что подвижность электронов, измеренная в опытах с кристаллами худшего качества, выращенными с увеличенной скоростью кристаллизации $> 10^{-2}$ см/мин, оказалось в два — три раза меньшей.

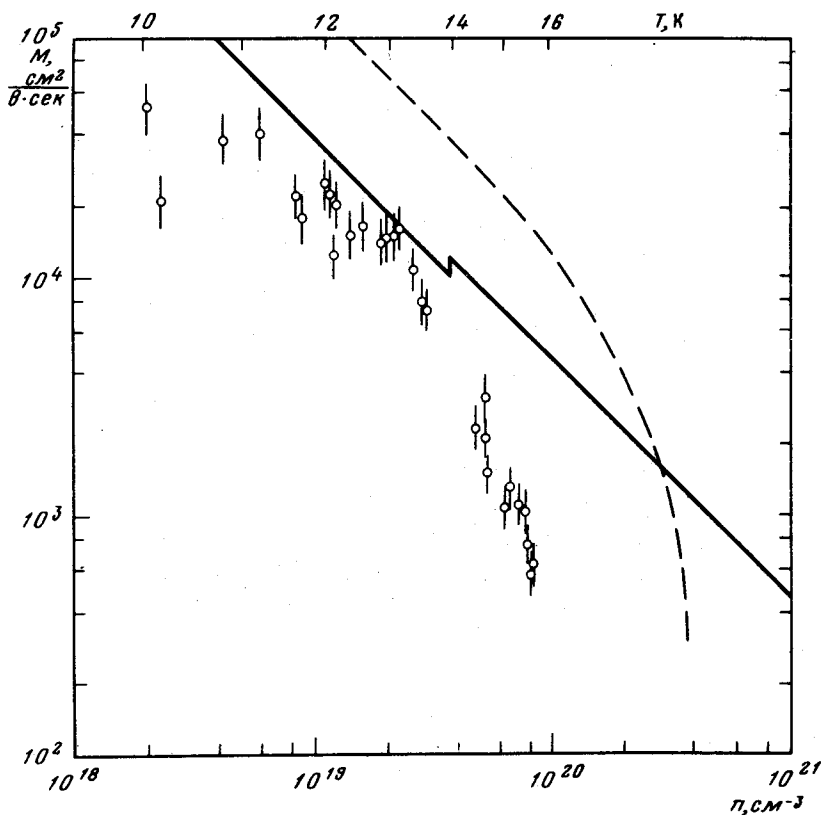


Рис.2. Зависимость подвижности $\mu(n)$ электронов в двумерном слое над конденсированным водородом от плотности насыщенных паров (T плавления = 13,9 К): линия с изломом — теоретический расчет, пунктирная линия — зависимость $\mu(n)$ для поверхностных электронов над гелием

Измеренные значения подвижности электронов, локализованных над кристаллическим Ne, следующие:

$\mu \left(\frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{сек}} \right)$	10^{-4}	2,2	2,4	0,85 ($\pm 15\%$)
$n \text{ (см}^{-3}\text{)} \cdot 10^{-18}$	1	4	12	

Влияние неидеальности поверхности кристаллического диэлектрика на подвижность μ , измеренную в наших опытах, может объясняться действием двух механизмов: 1) рассеянием электронов на дефектах поверхности, 2) захватом электронов поверхностными ловушками, что ведет к уменьшению плотности подвижных электронов. Для определения относительного вклада в подвижность каждого из этих процессов необходимы эксперименты по измерению μ иным способом, например резонансным или по времени пролета заданного пути.

Отметим, что плотность электронов, локализованных близ поверхности кристаллического водорода или неона, оставалась неизменной в течение всего гелиевого эксперимента.

Авторы благодарны П.Л.Капице за внимание к работе, В. С.Эдельману — за полезное обсуждение, Г.С.Чернышеву — за техническую помощь.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
20 февраля 1979 г.

Литература

- [1] R.Williams , R.S.Crandall, A.H.Willis. Phys. Rev. Lett., **26**, 7, 1971.
 - [2] В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, **26**, 647, 1977.
 - [3] А.М.Трояновский, А.П. Володин, М.С.Хайкин. Письма в ЖЭТФ, **29**, 65, 1979.
 - [4] M.W.Cole. Phys. Rev., **B2**, 4239, 1970.
 - [5] М.С.Хайкин. Письма в ЖЭТФ, **27**, 706, 1978.
 - [6] Д.М.Черникова. ФНТ, **2**, 1174, 1976; А.П. Володин, М.С.Хайкин, В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, **26**, 707, 1977.
 - [7] W.T.Sommer, D.J.Tanner. Phys. Rev. Lett., **27**, 1845, 1971.
 - [8] T.R.Brown, C.C.Grimes. Phys. Rev. Lett., **29**, 1233, 1972.
 - [9] J.L.Levine, T.M.Sanders. Phys. Rev., **154**, 138, 1967.
-