Физика низких температур, 1996, т. 22, № 1, с. 46–51 УДК 532.132

Вырывание зарядов из-под поверхности жидкого водорода

А. А. Левченко, Л. П. Межов-Деглин

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

Статья поступила в редакцию 17 июля 1995 г.

Показано, что под поверхностью жидкого водорода можно создать слой положительных или отрицательных зарядов плотностью до 10^8 см$^{-2}$. Время жизни зарядов в слое под поверхностью при температурах 14–20 К составляет более одного часа. При напряженностях электрического поля выше критических $\approx 10^3$ В/см наблюдаются квазипериодические осцилляции заряженной поверхности жидкости, сопровождаемые выходом из-под поверхности около 10^8 зарядов в одном импульсе.

Показано, що під поверхнею рідкого водню можливо утворити шар позитивних або негативних зарядів густиною до 10^8 см$^{-2}$. Час життя зарядів у шарі під поверхнею при температурах 14–20 К складає більше однієї години. При напруженостях електричного поля вище критичних $\approx 10^3$ В/см спостерігаються квазіперіодичні осциляції зарядженої поверхні рідини, супроводжувані вихідом з-під поверхні близько 10^8 зарядів в одному імпульсі.

Введение

В работе [1] мы сообщали о наблюдении прохождения отрицательных зарядов через поверхность жидкого водорода при напряженностях прижимающего электрического поля порядка 10^2 В/см. Этими измерениями доказано существование отрицательно заряженных пузырьков в жидком водороде. С их помощью удалось оценить высоту энергетического барьера на границе жидкость — пар ($\Delta = 350 \pm 70$ К) и отсюда характерный размер пузырька ($r \approx 10$Å), в котором локализован электрон в жидком водороде. Для объяснения особенностей поведения вольт-амперных характеристик на границе жидкость — пар мы предположили, что, кроме отрицательно заряженных пузырьков, в жидком водороде под действием ионизирующего излучения образуются отрицательные заряды другого строения, по-видимому заряженные кластеры (снежные шарики), состоящие из отрицательно заряженного иона и нескольких молекул.

В настоящем сообщении мы приводим результаты экспериментов с заряженной поверхностью жидкого водорода, выполненных в электрических полях порядка 10^3 В/см. Измерения показали, что, наряду с отрицательными зарядами, проходящими через поверхность жидкости, в объеме жидкости действительно существуют отрицательные заряды другого строения, которые, как и положительные заряды, практически не проходят через поверхность жидкость — пар при температурах 14–25 К. В постоянном электрическом поле выше некоторого критического наблюдаются квазипериодические осцилляции заряженной поверхности.

Экспериментальная методика

Источником зарядов во всех наших работах служит титано-тритиевая мишень, которая излучает β-частицы со средней энергией $\approx$ 5 КэВ и максимальной 18 КэВ. Под действием излучения в слое жидкости толщиной около 10 мкм у поверхности источника образуется плазма из положительно и отрицательно заряженных частиц. Знак зарядов, извлекаемых из плазмы в объем исследуемой жидкости, определяется полярностью приложенного электрического напряжения.

В экспериментах использовались оптические ячейки двух типов конструкций. В первой ячейке были установлены два плоских диода, во второй — триод. Расстояние источник — коллектор в диодах составляло 4 мм, диаметр источника 7 мм, диаметр коллектора 6 мм. Вокруг каждого из диодов располагались охранные кольца диаметром 7,4 мм и высотой 2,7 мм. В одном из диодов мишень была закрыта сверху металлической фольгой, чтобы препятствовать выходу зарядов в объем жидкости. В триоде расстояние источник — коллектор было 6 мм, диаметр коллектора 19,5 мм. На расстоянии 2 мм от источника была натянута металлическая сетка. Над сеткой было установлено металлическое охранное кольцо высотой 2 мм и диаметром 20 мм. Жидкий водород конденсировали в ячейку таким образом, чтобы граница раздела жидкость

© А. А. Левченко, Л. П. Межов-Деглин, 1996

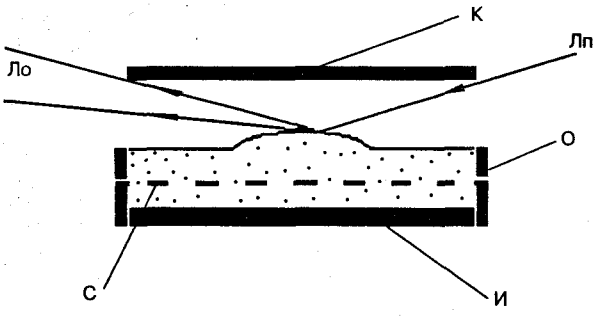

Рис. 1. Схема наблюдений за движением заряженной поверхности жидкого водорода в триоде: *И* — радиоактивный источник; *К* — коллектор; *С* — металлическая сетка; *О* — охранное кольцо; *Лп* — лазерный луч, падающий на поверхность жидкости; *Ло* — лазерный луч, отраженный от поверхности.

— пар находилась на уровне среза охранного кольца. В экспериментах изучали температурную и полевую зависимости тока, проходящего через поверхность, а также измеряли суммарный заряд, приходящий на коллектор при возникновении осцилляций заряженной поверхности в зависимости от времени. Изменение кривизны заряженной поверхности жидкости оценивали по уширению лазерного луча, отраженного от поверхности. Схема этих наблюдений показана на рис. 1.

Результаты и их обсуждение

Вольт-амперные характеристики

На рис. 2 показана зависимость тока от напряжения на охранном кольце V при постоянном напряжении на источнике $U = 600$ В (кривая *1*) и зависимость тока отрицательных зарядов через поверхность жидкости I от прижимающего напряжения на источнике U при постоянном напряжении на охранном кольце $V = 600$ В (кривая *2*). Температура измерений 14,6 К. Как и в случае малых прижимающих напряжений [1], на зависимостях $I(U, V)$ наблюдается резкое изменение тока при $V \approx U$. Отметим, что в случае $V > U$ уменьшение тока при ступенчатом включении напряжения V на охранном кольце происходит не мгновенно, а в течение длительного времени, во много раз превосходящего время пролета зарядами расстояния между источником и поверхностью. Это связано с постепенным накоплением под поверхностью жидкости отрицательно заряженных кластеров, которые удерживаются от стекания на стенки ячейки напряжением V, приложенным к охранному кольцу. Увеличение со временем кривизны заряженной поверхности также свидетельствует об увеличении плотности накапливающихся зарядов. В случае работы с положительными зарядами ток через поверхность при температурах 14–25 К был

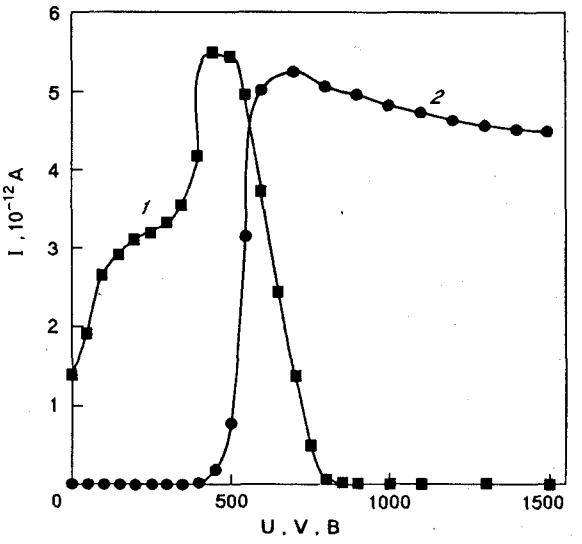

Рис. 2. Вольт-амперная характеристика наполовину заполненного диода при $T = 14{,}6$ К. Кривая *1* — зависимость тока отрицательных зарядов через поверхность от напряжения на охранном кольце V при постоянном прижимающем напряжении $U = 600$ В; кривая *2* — зависимость тока отрицательных зарядов через поверхность от прижимающего напряжения U при постоянном напряжении на охранном кольце $V = 600$ В.

менее 10^{-15} А, т.е. положительные заряды практически не проникали через границу жидкость — пар. Однако изменение кривизны поверхности при изменении величины прижимающего напряжения указывало на накапливание положительных зарядов под поверхностью жидкости.

Колебания заряженной поверхности

Визуальные наблюдения показали, что по мере повышения напряжения на охранном кольце и на источнике в условиях, когда ток через границу раздела фаз пренебрежимо мал ($I < 10^{-15}$ А), поверхность жидкости в диоде (или триоде) сильно искривляется: в центре диода образуется участок поверхности — холм, по форме близкий к полусфере. В диоде при постоянном напряжении выше некоторого критического, составляющего ≈ 500 В для положительных зарядов и ≈ 800 В для отрицательных зарядов, при температуре 14,6 К можно наблюдать близкие к периодическим осцилляции поверхности жидкости. Высота холма в центре диода со временем возрастает, достигает максимума, а затем поверхность резко релаксирует к исходному плоскому состоянию. На рис. 3 зафиксирован момент, когда при температуре около 15 К поверхность жидкости в левом диоде достигла максимальной высоты $h \approx 0{,}5$ мм. Линейный размер холма равен приблизительно половине диаметра коллектора (около 3 мм). В триоде при увеличении диаметра охранного кольца от 7,4 до 20 мм и диаметра коллектора до 19,5 мм критические напряжения, выше которых наблюдались подобные ос-

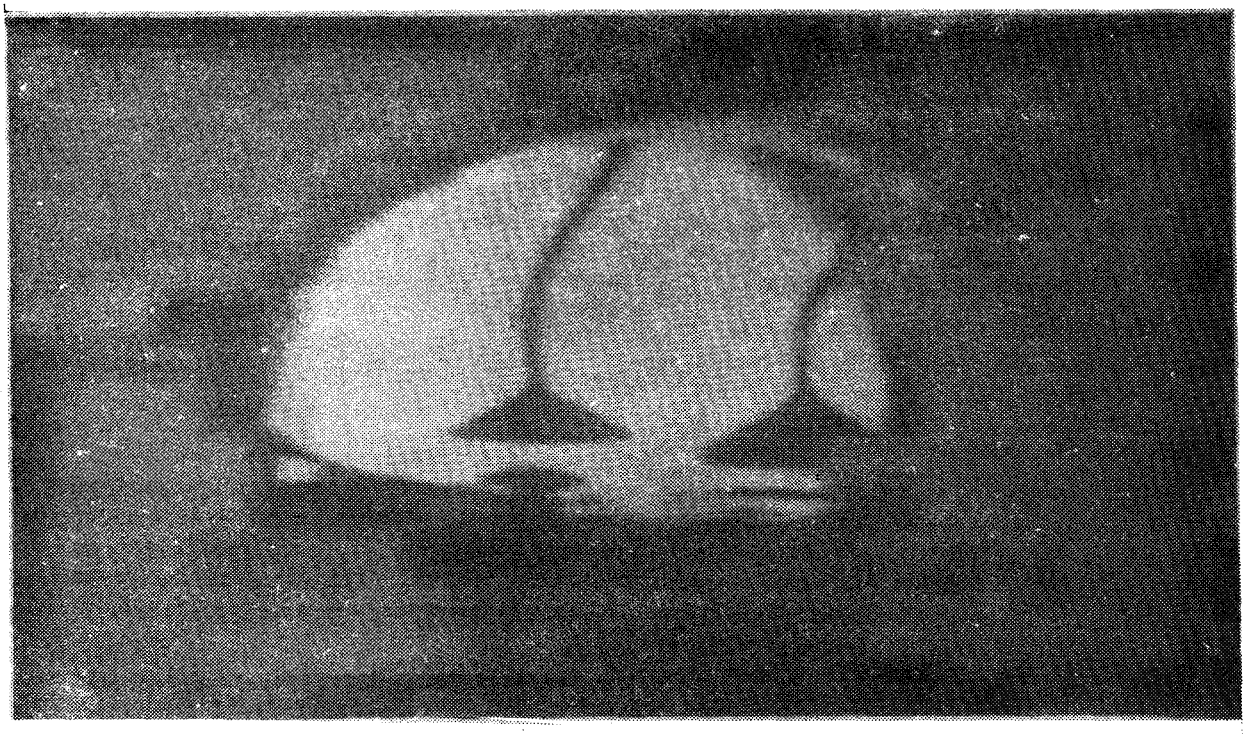

Рис. 3. **Фотография заряженной поверхности жидкого водорода в ячейке с двумя диодами. Под коллектором левого диода виден** выпуклый участок поверхности.

цилляции, составляли ≈ 1000 В для зарядов обоих знаков. Важно отметить, что видимые характерные размеры возмущенного участка поверхности при этом практически не изменились. Критическое напряжение уменьшалось с повышением температуры жидкости.

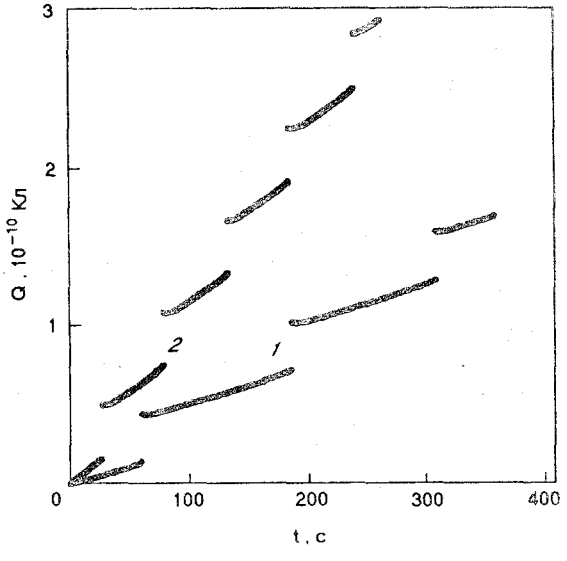

Рис. 4. Временная зависимость положительного заряда, приходящего на коллектор, при двух разных прижимающих напряжениях U, В: 550 (кривая *1*), 700 (кривая *2*). Напряжение на охранном кольце $V = 550$ В.

В момент релаксации поверхности электрометр регистрирует приход заряда на коллектор, т.е. поверхность разряжается. Важно заметить, что мы не наблюдали случаев отрыва отдельных макроскопических капель от поверхности жидкости. Поверхность скачком релаксирует к исходному плоскому состоянию, и далее процесс повторяется.

На рис. 4 показана зависимость от времени величины положительного заряда Q, приходящего на коллектор при двух разных прижимающих напряжениях $U = 550$ В (кривая *1*) и $U \approx 700$ В (кривая *2*) при постоянном напряжении на охранном кольце $V = 550$ В. На рис. 5 представлены аналогичные зависимости $Q(t)$ для отрицательных зарядов: при $U = 1\,050$ В и $V = 1\,200$ В (кривая *1*), температура измерений 18 К; при $U = 900$ В, $V = 950$ В (кривая *2*), температура измерений 16 К. Видно, что с повышением прижимающего напряжения U или температуры жидкости период осцилляций заряженной поверхности уменьшается.

Высота ступени на рис. 4 и 5 составляет в среднем $3{,}4 \cdot 10^{-11}$ Кл для положительных зарядов и $1{,}5 \cdot 10^{-11}$ Кл для отрицательных зарядов при температуре 16 К. Плотность зарядов под поверхностью возмущенного участка, оцененная по высоте ступени на кривой $Q(t)$, составляет $\approx 10^8$ см$^{-2}$. Эта величина близка к оценке плотности зарядов n_s в слое, полностью компенсирующем внешнее поле, оцененной по формуле $E = 2\pi e n_s$. Здесь E —

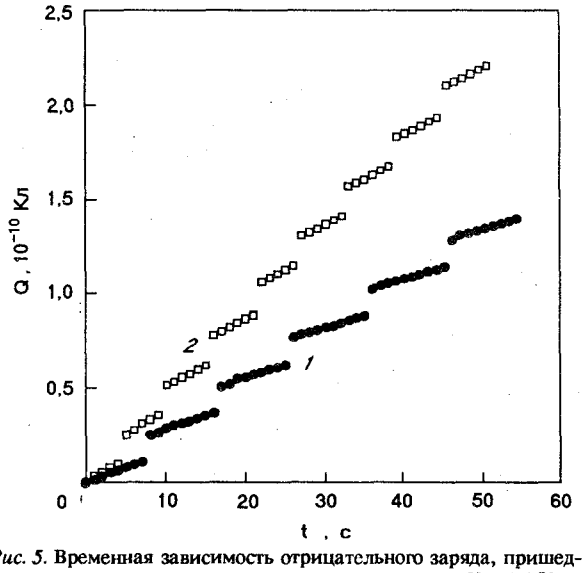

Рис. 5. Временная зависимость отрицательного заряда, пришедшего на коллектор: прижимающее напряжение $U = 1\,050$ В, удерживающее напряжение на охранном кольце $V = 1200$ В, $T = 16$ К (кривая *1*); $U = 900$ К, $V = 950$ В, $T = 18{,}2$ К (кривая *2*).

напряженность критического электрического поля, e — заряд электрона; n_s — плотность зарядов под поверхностью.

Как показали наблюдения, при дальнейшем увеличении напряжения ток отрицательных зарядов резко возрастает и одновременно исчезают осцилляции поверхности как целого, а поверхность при этом дрожит. Подчеркнем, что при напряжениях меньше критических выпуклый участок поверхности стабилен и ток зарядов обоих знаков через границу жидкость — пар менее 10^{-15} А.

Критическое электрическое поле, необходимое для вырывания зарядов, можно оценить как [2]

$$E_c = 1{,}27 \cdot 10^4 \, (\Delta\rho\sigma)^{1/4} \text{ В/см},$$

а критический радиус выпуклого участка поверхности

$$r_c = (3\sigma/\Delta\rho g)^{1/2} \text{ см},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкого водорода; $\Delta\rho$ — разность плотностей жидкости и пара; g — гравитационная постоянная. Расчетное значение E_c в водороде при температуре 15 К равно 8 500 В/см и превосходит экспериментальную величину, равную 5 000 В/см в триоде для положительных и отрицательных зарядов. В то же время расчетное значение критического радиуса выпуклого участка поверхности r_c составляет 3,5 мм, что почти вдвое превосходит наблюдаемую в эксперименте величину. Причиной расхождения экспериментальных и расчетных значений E_c и r_c может быть, например, нестабильность поверхности жидкости из-за вибраций криостата или сильная неоднородность электрического поля над выпуклым участком поверхности жидкости.

Периодические осцилляции поверхности как целого возникают из-за того, что при данных размерах ячейки в электрических полях, незначительно превосходящих критические, возможно образование только одного возмущенного участка (для образования нескольких возмущенных участков необходимо, чтобы расстояние между ними было много больше r_c). После выхода зарядов из-под границы раздела жидкость — пар время, необходимое для накопления новой критической при данной температуре порции зарядов (т.е. период осцилляций), определяется мощностью источника и скоростью движения зарядов в жидкости. Естественно поэтому, что при увеличении напряженности прижимающего поля или при повышении температуры период осцилляций уменьшается.

Влияние примеси трития на результаты наблюдений

При длительном хранении β-активного источника в атмосфере газообразного водорода при комнатных температурах тритий из мишени может диффундировать в окружающий газ. В этом случае в ячейке, частично заполненной жидкостью, можно наблюдать достаточно большой ток как отрицательных, так и положительных зарядов в полях значительно меньших критических при $V > U$. Чтобы убедиться, что заряды в «грязном» водороде образуются не только в жидкости, но и в газе, мы специально собрали ячейку с двумя диодами. В одном из диодов мишень была закрыта металлической пластиной. Выяснилось, что при длительном хранении ячейки с водородом при комнатной температуре в диоде с закрытой мишенью можно было наблюдать токи обоих знаков. Более того, замена мишени на пластину из нержавеющей стали не отразилась на абсолютных значениях тока.

На рис. 6 показана температурная зависимость положительного тока в диоде в условиях, когда источник был заменен на металлическую пластину и использовался водород, длительное время находившийся в контакте с тритиевой мишенью. С ростом температуры от тройной точки ток увеличивался в соответствии с ростом плотности пара, достигал максимума, а затем уменьшался. После замены водорода в ячейке ток уменьшался до нуля во всем интервале температур.

Выше сказано, что положительные заряды не проходят через поверхность жидкости при температурах ниже 25 К. Однако в «грязном» водороде наблюдается ток положительных зарядов. Поэтому разумно считать, что в «грязном» водороде мы регистрируем ток зарядов, образующихся в ре-

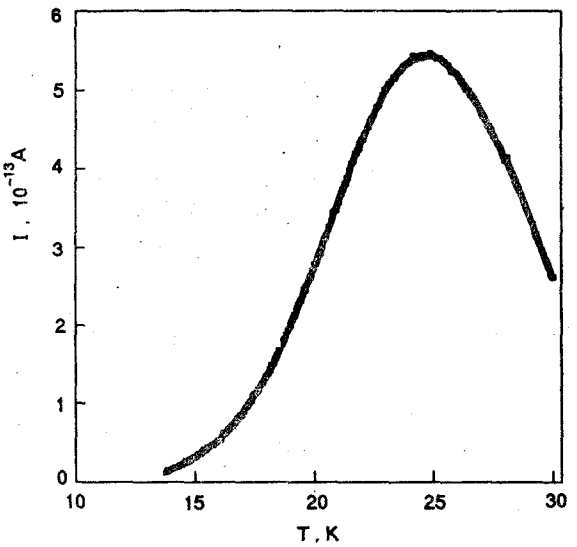

Рис. 6. Температурная зависимость положительного тока в триоде, наполовину заполненном жидким водородом с примесью трития, при прижимающем напряжении $U = 30$ В и напряжении на охранном кольце $V = 440$ В.

зультате β-активного распада трития в газовой фазе. По нашим оценкам, относительная концентрация трития в паре над «грязной» жидкостью в опытах достигала 10^{-9} %.

Время жизни зарядов под поверхностью

Эксперименты с триодом позволяют оценить время жизни зарядов под поверхностью жидкости. Как видно на рис. 3, накопление зарядов под поверхностью при постоянных U и V приводит к появлению выпуклого участка поверхности. Радиус кривизны этого участка зависит от величины приложенного прижимающего напряжения. Если затем источник заземлить, а напряжение между сеткой и коллектором поддерживать постоянным, то по скорости релаксации изогнутой поверхности можно оценить скорость стекания зарядов. Изменение кривизны поверхности в данных экспериментах регистрировалось по уширению лазерного луча, отраженного от поверхности жидкости. Оказалось, что в течение ~ 1 ч кривизна поверхности, а следовательно, и плотность как положительных, так и отрицательных зарядов не изменяется (с точностью до 2%). Ток через поверхность жидкости на коллектор при заземленном источнике был менее 10^{-15} А. Для этих измерений мы использовали водород без примеси трития. Таким образом, можно заключить, что время жизни положительных и отрицательных зарядов, которые накапливаются под поверхностью при температурах 14–20 K, составляет более 1 ч. С другой стороны, в [1] мы отмечали, что электроны, локализованные в отрицательно заряженных пузырьках, могут проходить через границу жидкого водорода. Время жизни пузырька под поверхностью, оцененное по изменению тока через поверхность в триоде при температуре около 14 K и при малых напряжениях $U < V$, оказалось менее 10 с. Поэтому можно заключить, что в жидкости существуют два типа отрицательных зарядов. Один из них — это пузырек с локализованным внутри него электроном — определяет величину тока, проходящего через границу жидкость — пар. Заряды второго типа — это кластеры, состоящие из отрицательно заряженного иона H^- [3] или иона примеси, которые окружены слоем молекул водорода. Эти кластеры накапливаются под поверхностью подобно положительным зарядам.

Отметим, что в работе [4] по измерению подвижности зарядов в жидкости мы высказывали предположение о существовании двух типов отрицательных зарядов. Из измерений подвижности следует, что при низких температурах (см. [4, рис. 2]) радиус отрицательных кластеров составляет около 4 Å, что близко к теоретической оценке радиуса отрицательно заряженного кластера, содержащего атомарный ион [3].

Заключение

В работе продемонстрировано, что под поверхностью жидкого водорода можно создать слой положительных или отрицательных зарядов и удерживать его в течение достаточно длительного времени. Плотность зарядов под поверхностью достигает 10^8 см$^{-2}$. Показано, что в жидком водороде под действием β-излучения образуются как отрицательно заряженные электронные пузырьки, так и кластеры, которые так же, как и положительные заряды, могут накапливаться под поверхностью. Наблюдены квазипериодические колебания заряженной поверхности в полях выше некоторых критических. Величины критического поля и критического радиуса колеблющегося участка поверхности жидкости оказались близкими к теоретическим оценкам.

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научного фонда, грант № REK-000.

1. А. А. Левченко, Л. П. Межов-Деглин, *Письма в ЖЭТФ* **60**, 452 (1994).
2. F. P. Boyle and A. J. Dahm, *J. Low Temp. Phys.* **23**, 477 (1976).
3. P. B. Lerner and I. M. Sokolov, *J. Low Temp. Phys.* **95**, 687 (1994).
4. A. A. Levchenko and L. P. Mezhov-Deglin, *J. Low Temp. Phys.* 457 (1992).

Extraction of charges from beneath surface of liquid hydrogen

A. A. Levchenko and L. P. Mezhov-Deglin

It is shown that a layer of positive or negative charges of density up to 10^8 cm^{-2} can be accumulated below the surface of liquid hydrogen. The charge life time in this layer at temperatures 14–20 K is more than one hour. Quasi-periodic oscillations of the charged surface and an extraction of $\sim 10^8$ charges per pulse from under the surface are observed at applied electric field higher than some critical value $\sim 10^3$ V/cm.