

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНЖЕКТИРОВАННЫХ ЗАРЯДОВ С КВАНТОВЫМИ ВИХРЯМИ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ

М.Р. Султанова, И.А. Ремизов, А.А. Левченко

АННОТАЦИЯ

Экспериментально исследовано движение инжектированных отрицательных зарядов под свободной поверхностью жидкости, а также в объеме сверхтекучего He-II при температурах $T \approx 1.5$ К в статических электрических полях различной конфигурации. Обнаружено, что в случае конфигурации электрического поля, которая прижимает заряды к свободной поверхности He-II наблюдается заметное отклонение распределения плотности тока от той которая задается электрическим полем, а при конфигурации, когда заряды двигаются в объеме He-II плотность тока совпадает с силовыми линиями электрического поля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СВЕРХТЕКУЧИЙ ГЕЛИЙ, ЗАРЯДЫ ПОД ПОВЕРХНОСТЬЮ, ЗАРЯЖЕННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКО-СТИ, КВАНТОВЫЕ ВИХРИ

INTERACTION OF INJECTED CHARGES WITH QUANTUM VORTICES IN SUPERFLUID HELIUM NEAR THE SURFACE

M.R. Sultanova, I. A. Remizov, A.A. Levchenko

ABSTRACT

The motion of injected negative charges under the free surface of a liquid, as well as in the volume of superfluid He-II at temperatures $T \approx 1.5$ K in static electric fields of various configurations, has been experimentally studied. It was found that in the case of an electric field configuration that presses the charges to the free surface of He-II, there is a noticeable deviation of the current density distribution from that specified by the electric field, and in the case of a configuration when the charges move in the volume of He-II, the current density coincides with the electric field lines.

KEYWORDS

SUPERFLUID HELIUM, SUBSURFACE CHARGES, CHARGED LIQUID SURFACE, QUANTUM VORTICES

ВВЕДЕНИЕ

В объеме жидкого гелия могут формироваться различные ионные комплексы наиболее распространенными являются положительные и отрицательные ионы, а также заряженные вихревые кольца [1]. Положительные ионы (катионы) в жидком гелии представляют собой атом гелия без одного электрона окруженного слоем затвердевшего гелия в следствии поляризационных эффектов. Радиус R^+ катиона около 6 \AA , а эффективная масса M^+ складывается из массы атома гелия, сферы из твердого гелия, и присоединенной массы. Таким образом масса M^+ положительного иона составляет примерно $60-80 m_{\text{He}}^4$. Другую структуру имеют отрицательные ионы (анионы), которые образуются при введении в жидкий гелий электрона, который создает пузырек, локализуясь внутри сферической полости.

Образование электронных пузырьков связано с рядом причин. Во-первых, атом гелия является устойчивой квантовой системой, которая не может присоединить к себе лишний электрон, поэтому свободный электрон вынужден двигаться в межатомном пространстве вблизи отталкивающих его отдельных атомов, имея при этом большую энергию нулевых колебаний [1]. Во-вторых, гелий характеризуется малой величиной поверхностного натяжения на границе жидкость-пар. Таким образом электрону выгодно образовать пузырек и тем самым уменьшить свою энергию. Теоретические расчеты показывают, что радиус электронного пузырька R - составляет примерно 17 Å, а эффективная масса аниона практически совпадает с его присоединенной массой и составляет примерно $243 m_{He^4}$.

Дрейфовая скорость V_D положительных и отрицательных ионов в ведущем электрическом поле напряженностью E описывается следующей зависимостью

$$V_D = \mu * E,$$

где μ – подвижность иона в жидком гелии, которая зависит от температуры [2]. Механизм температурной зависимости подвижности иона в жидком гелии, а также ее зависимости от вида иона подробно описан в [1]. Стоит отметить, что при движении заряда в объеме жидкого гелия под действием ведущего электрического поля направление скорости иона в точке совпадает с вектором напряженности электрического поля, т. е. подвижность иона μ является скаляром. Таким образом имеет место локальное взаимодействие иона с тянущим электрическим полем.

Известно [3], что на ионы в жидком гелии вблизи поверхности со стороны жидкой фазы действует сила F поляризационного происхождения (сила изображения), которая отталкивает ионы от границы в объем. При наложении прижимающего ионы к поверхности электрического поля E_{\perp} , из-за конкуренции с силой изображения возникает потенциальная яма ее минимум соответствует координате z_0

$$z_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{e(\epsilon-1)}{E_{\perp}\epsilon(\epsilon+1)} \right].$$

Поэтому ионы, введенные в гелий, локализуются на поверхности $z=z_0$, и превращая ионную систему в двумерную [3]. Заряженная поверхность может перевести к существенному рассеиванию зарядов, которые движутся вблизи неё.

В данной работе исследовано движение инжектированных отрицательных зарядов (электронных пузырьков) под свободной поверхностью жидкости, а также в объеме сверхтекучего He-II при температурах $T \approx 1.5$ К в статических электрических полях различной конфигурации. Обнаружено, что в случае конфигурации электрического поля, которая прижимает заряды к свободной поверхности He-II наблюдается заметное отклонение плотности тока от той которая задается электрическим полем, а при конфигурациях, когда заряды двигаются в объеме He-II, плотность тока совпадает с силовыми линиями электрического поля.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты были проведены в рабочей ячейке, которая представляла собой прямоугольный параллелепипед с шестью электрически изолированными гранями внутренними размерами 50x50x3 мм. Верхняя грань ячейки была изготовлена из кварцевого стекла, на нижнюю поверхность которого напылили полупрозрачную металлическую пленку.

Расстояние поверхность жидкости – кварцевое стекло составляло 3 мм. Титано-третиевый радиоактивный источник зарядов диаметром 3 мм был установлен на одной из вертикальных граней ячейки, (1 на рис. 1). На противоположной стороне был размещен 5-сегментный коллектор (3 на рис. 1). Ширина сегмента составляла 9 мм, а высота 30 мм. Каждый сегмент был подключен к независимому усилителю тока, а выходные сигналы отцифровывались аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и записывались в память компьютера. В экспериментах измерялась зависимость от времени тока коллекторов при включении и выключении возбуждения волн плунжерами. Для оценки постоянной составляющей тока коллекторов $I_i(t)$ полученные экспериментальные зависимости подвергались Фурье-фильтрации на низких частотах.

Постоянное электрическое напряжение прикладывали к граням параллелепипеда от независимых источников относительно общей земли, так чтобы инжектированные отрицательные заряды перемещались от источника зарядов к коллектору.

Возбуждение волн производилось с помощью двух плоских плунжеров (2 на рис.1), установленных параллельно двум смежным граням ячейки на расстоянии 3 мм. Каждый плунжер приводился в движение своим электромагнитным приводом, переменное напряжение на который подавалось от двухканального функционального генератора. Плунжеры совершали поступательно-возвратное движение в горизонтальной плоскости.

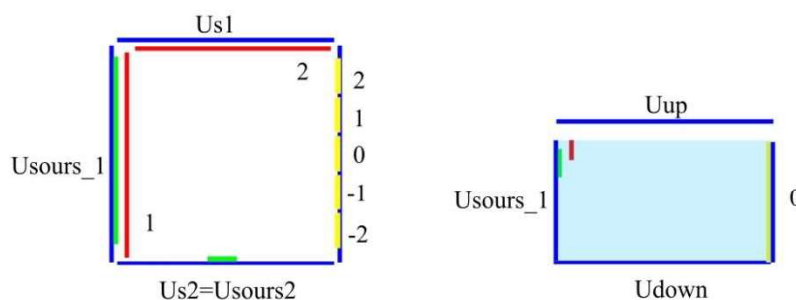


Рис. 1. Схема ячейки: 1 – источник зарядов, 2 – плунжеры, 3 – принимающий секционный коллектор

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. (2-4) показаны экспериментальные зависимости тока от времени на сегментах приемного коллектора $I_i(t)$ до включения возбуждения волн на поверхности сверхтекучего гелия, во время работы плунжеров и после выключения накачки. Представленные зависимости были получены при следующих напряжениях на гранях ячейки: напряжение на источниках $U_{sours1,2} = -100$ В, на боковой грани $U_{side1} = 0$ В, напряжение на верхней грани и нижней грани менялось входе эксперимента. В представленных экспериментах гармоническая накачка волн на поверхности жидкости осуществлялась двумя плунжерами на частоте 49.8 Гц. Разность фаз электрических сигналов, подаваемых на приводы, составляла 90° . Крутизна генерируемых на поверхности волн составляла $kH = 0.05$.

На рис. 2. представлена зависимость, полученная при следующих напряжениях на верхней $U_{up} = -50$ В, и нижней $U_{Down} = -100$ В, гранях ячейки. Видно, что до включения накачки ток распределен между первыми тремя сегментами -1, 0, 1, и заметно меняется с

включением накачки. Ток на сегменте -1 увеличивается при включении накачки, а на сегментах 1, 0 уменьшается, при этом суммарный ток заметно увеличивается.

На рис. 3. представлена зависимость, полученная при следующих напряжениях на верхней $U_{up} = -100$ В, и нижней $U_{Down} = -50$ В, гранях ячейки. Видно, что до включения накачки ток в основном приходит на -1 сегмент приемного коллектора, и примерно равен суммарному току. С включением накачки распределение токов и суммарный ток существенно не меняются. Ток на 0,1 сегментах в течении всего времени измерения остаётся примерно равным нулю.

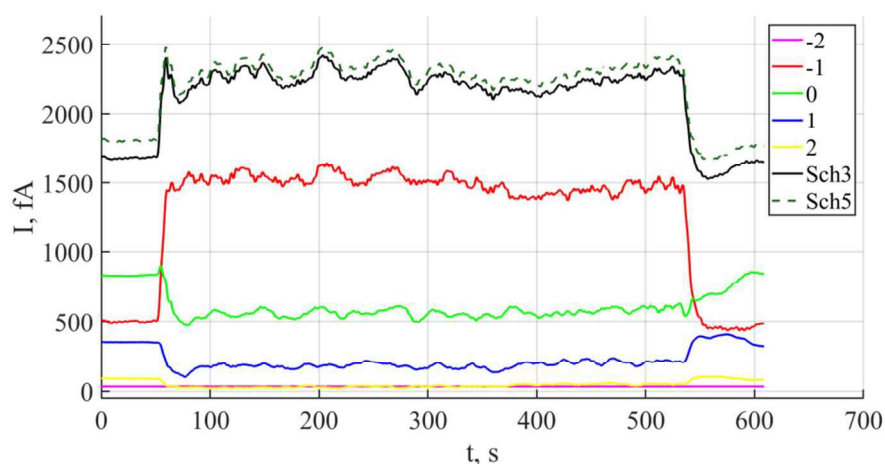


Рис. 2. Зависимости от времени тока на принимающих коллекторах в сверхтекучем гелии He-II

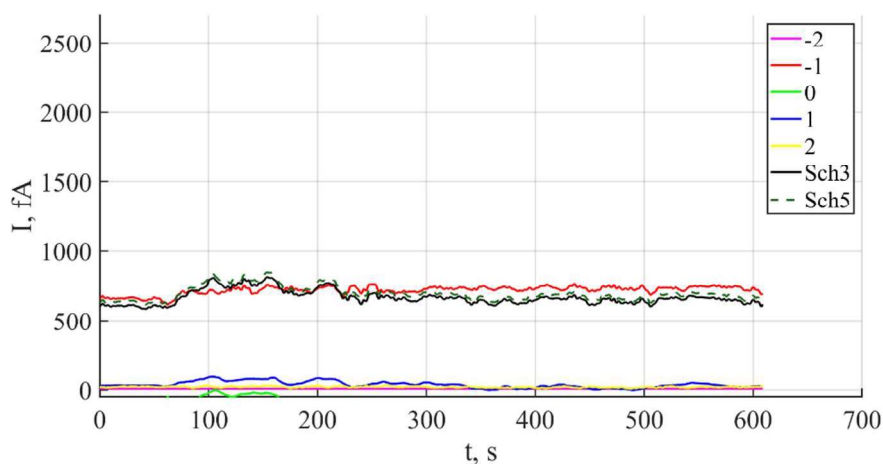


Рис. 3. Зависимости от времени тока на принимающих коллекторах в сверхтекучем гелии He-II

На рис. 4. представлена зависимость, полученная при следующих напряжениях на верхней $U_{up} = -50$ В, и нижней $U_{Down} = -100$ В, гранях ячейки, и при полностью заполненной ячейке без свободной поверхности. В этом случае полученные зависимости тока от времени выглядят более зашумленными чем в предыдущих случаях, также при включении накачки наблюдается всплеск тока на -1 сегменте приемного коллектора, и суммарного тока. Однако в целом картина распределения тока выглядит аналогично представленной на рис. 3.

Зависимости, представленные на рис 2,3 получены в экспериментах с различной конфигурацией электрического поля, поэтому заряды двигались на разном расстоянии от

свободной поверхности, а в экспериментах, результаты которых представлены на рис. 4, свободная поверхность отсутствует.

Моделирование электрического поля показывает, что при напряжениях на верхней $U_{up} = -50$ В, и нижней $U_{Down} = -100$ В, гранях ячейки заряды двигаются вблизи двумерной заряженной поверхности, а при $U_{up} = -100$ В, $U_{Down} = -50$ В их траектории проходят в объеме жидкого гелия вдали от поверхности.

Следует отметить, что когда заряды двигаются вдали от поверхности, или в ситуации, когда ячейка полностью заполнена сверхтекучим гелием временные зависимости тока от времени выглядят одинаково, а суммарный ток в основном приходит на -1 сегмент приемного коллектора. Однако, когда заряды двигаются вблизи поверхности, то распределение тока до включения накачки суммарный ток распределяется следующим образом -1 сегмент приходит 33% на 0 сегмент 46%, и на 1 сегмент 21%. Включение накачки приводит к увеличению суммарного тока 35% и существенному изменению его распределения на -1 сегмент приходит 65% на 0 сегмент 22%, и на 1 сегмент 13% после выключения накачки распределение возвращается к исходному. Таким образом наличие свободной поверхности существенно влияет на транспорт заряда в сверхтекучем гелии, что можно связать с рассеиванием зарядов на заряженной двумерной поверхности жидкости.

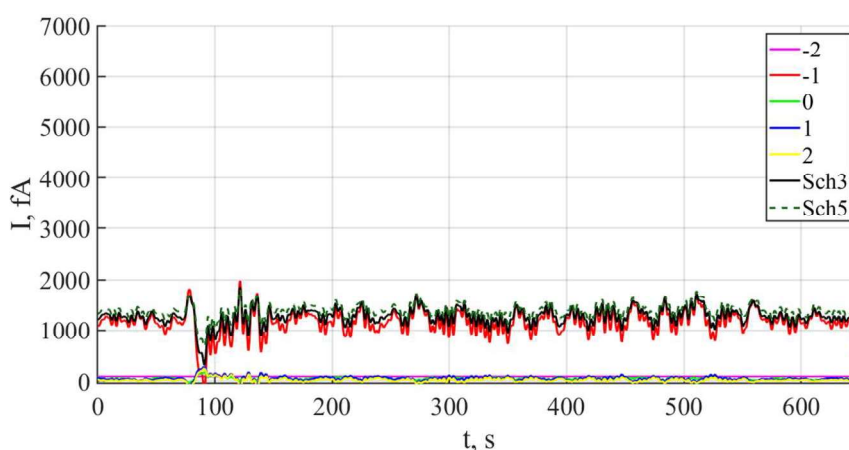


Рис. 4. Зависимости от времени тока на принимающих коллекторах в сверхтекучем гелии He-II

Рассеивание инжектированных в жидкий гелий зарядов при возбуждении волн на поверхности жидкого гелия ранее исследовалось в нашей работе [4], которое состоит в следующем волны на поверхности жидкости согласно [5] приводят к формированию эйлеровой завихренности, а при высоких амплитудах накачки отдельные вихри начинают перекрываться и образуя валы завихренности на которых рассеиваются инжектированные заряды.

ВЫВОДЫ

В работе было экспериментально установлено, что двумерная заряженная поверхность сверхтекучего гелия существенно влияет на транспорт инжектированных электронов.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ #075-15-2019-1893

ЛИТЕРАТУРА

1. Шикин В Б УФН 121 457–497 (1977)
2. Russell J. Donnelly and Carlo F. Barenghi *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 27, 1217 (1998); <https://doi.org/10.1063/1.556028>
3. Шикин В Б УФН 164 995–997 (1994)
4. I.A. Remizov, M.R. Sultanova, A.A. Levchenko, L.P. Mezhev-Deglin // *Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur.* – 2021. – Vol. 47, Iss. 5. – P. 378–382/409–413
5. S. V. Filatov, V. M. Parfenyev, S. S. Vergeles, M. Y. Brazhnikov, A. A. Levchenko, and V. V. Lebedev, *Phys. Rev. Lett.* 116, 054501 (2016).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

М.Р. Султанова – аспирант. Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН, г. Черноголовка Московской обл. e-mail: mabinkaifft@issp.ac.ru

И.А. Ремизов – научный сотрудник. Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН, г. Черноголовка Московской обл.

А.А. Левченко – доктор физико-математических наук, директор Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН, г. Черноголовка Московской обл.