

Письма редактору

Линейные электронные цепочки на поверхности сверхтекучего гелия

Ю. З. Ковдря, В. А. Николаенко, С. П. Гладченко, С. С. Соколов

*Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины,
Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47
E-mail: kovdrya@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 24 июня 1998 г.

Впервые экспериментально реализована уникальная одномерная система, состоящая из линейных электронных цепочек на поверхности жидкого гелия. Для создания системы использован эффект искривления поверхности жидкого гелия, покрывающего профилированную диэлектрическую подложку в прижимающем электрическом поле, удерживающем электроны в линейных электронных цепочках в области температур 0,5–1,8 К в прижимающих электрических полях до 1 кВ/см. Показано, что подвижность электронов зависит от чистоты и степени заряженности подложки. Для подложек с малым количеством локализованных зарядов подвижность во всей области исследованных температур увеличивается с понижением температуры. Результаты находятся в хорошем согласии с существующей теорией.

Уперше експериментально реалізовано унікальну одновимірну систему, яка складається з лінійних електронних ланцюжків на поверхні рідкого гелію. Для реалізації системи використано скривлення поверхні рідкого гелію, що покривав профільовану діелектричну підлогу, і притискує електричне поле, яке затримувало електрони на дні утворених рідких каналів. Виміряно рухливість носіїв в лінійних електронних ланцюжках в області температур 0,5–1,8 К в притискуючих електричних полях до 1 кВ/см. Показано, що рухливість електронів залежить від чистоти та ступені зарядженості підкладки. Для підкладок з малою кількістю локалізованих зарядів рухливість в усій області використаних температур збільшується із зменшенням температури. Результати знаходяться в добрій згоді з існуючою теорією.

PACS: 67.40.Jg, 73.20.Dx, 73.20.Fz, **68.65.+g**

Исследование одномерных (1D) систем является одной из самых интересных проблем в физике конденсированного состояния. Однако до настоящего времени удавалось реализовать только квазиодномерные системы. В большинстве случаев такие системы с пониженной размерностью создавались с использованием тонких металлических проволочек или полупроводниковых структур с узким полевым затвором (такие системы содержат несколько электронов поперек канала). Используя высокую гомогенность системы электронов на поверхности предельно чистого гелия, можно построить принципиально новую одномерную электронную систему.

В работе [1] был предложен способ реализации одномерной электронной системы на поверхности жидкого гелия с использованием

гофрированной поверхности жидкого гелия на диэлектрической подложке, на которой нанесены параллельные канавки заданных поперечных размеров. Прижимающее электрическое поле перемещает электроны в ложбины поверхности жидкого гелия, образующиеся в таких канавках. При этом движение электронов является свободным вдоль каналов и квантовано в перпендикулярном направлении. В работе [1] было показано, что расстояние между уровнями энергии, соответствующей движению частиц перпендикулярно каналам, при разумных значениях параметров каналов и прижимающего электрического поля может достигать значений 0,1–0,3 К.

Такие системы были получены в работах [2–6] с использованием в качестве подложек стеклянных оптических решеток; были изучены

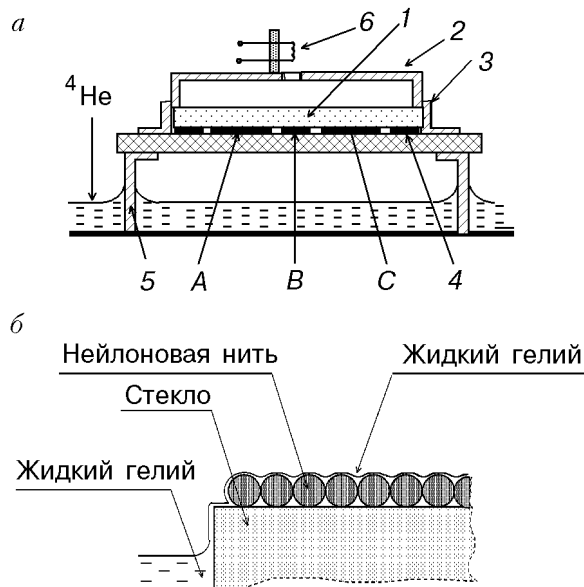


Рис. 1. *a* – Схема измерительной ячейки: 1 – подложка; 2, 3 – удерживающие электроды; 4 – охранный электрод; 5 – медные подставки; 6 – нить накаливания; А, В, С – измерительные электроды. *б* – Подложка.

подвижность и проводимость носителей. Однако создать одномерные системы с хорошей проводимостью не удавалось: в хорошо проводящих каналах, реализованных в работах [2–6], находилось несколько электронов в направлении, перпендикулярном каналу.

В настоящей работе были впервые реализованы проводящие каналы на поверхности жидкого гелия с очень малым количеством электронов, формирующие одномерную систему – линейные электронные цепочки.

В качестве диэлектрической подложки использовалась стеклянная пластинка, на которую виток к витку наматывалась нейлоновая нить диаметром 0,1 мм (рис. 1). Диэлектрическая постоянная нейлона при гелиевых температурах, определяемая экстраполяцией значения, измеренного нами при 80 К, составляет около 1,5. Экспериментальная ячейка (рис. 1, *a*) аналогична описанной в [6]. Подложка размещалась над измерительными электродами А, В, С, размеры которых составляли 15,6×9,2; 2×9,2; 15,6×9,2 мм соответственно. Электроды А, В и С поддерживались при нулевом потенциале. К электродам 2, 3 и охранный электроду 4 прикладывался отрицательный потенциал, удерживающий электроны на поверхности жидкого гелия. Напряжение от генератора подавалось на электрод А, сигнал, прошедший

через ячейку, снимался с электрода С. Ведущее электрическое поле было направлено вдоль жидких каналов.

Измерения 0°-й и 90°-й компонент сигнала, прошедшего через заряженную электронами ячейку, проводили на частоте 100 кГц. По измеренным значениям сигналов определялись действительная G_r и мнимая G_i части кондактанса ячейки, обусловленного электронами.

Эксперименты проводились следующим образом. Поверхность жидкого гелия заряжалась при небольшом прижимающем потенциале $V_{\perp} = 0,5$ В с помощью зажигаемой на короткое время миниатюрной нити накаливания. Зарядка поверхности гелия регистрировалась по появлению сигнала от электронов. Затем прижимающий потенциал уменьшали до нуля, чтобы удалить с поверхности жидкости основную часть электронов. Сигнал от электронов при этом исчезал. После этого, не включая нити накаливания, прикладывался большой прижимающий потенциал, при этом появлялся сигнал от электронов, меньший, чем первоначальный. Данная процедура позволяла подобрать необходимое наименьшее число электронов в проводящем канале. Электроны, находившиеся над тонкой пленкой при нулевом значении прижимающего потенциала, скапливались под действием большого прижимающего поля в ложбинах гофрированной поверхности жидкого гелия, на глубокой части жидкости. Их подвижность резко возрастала, в результате чего появлялся сигнал от электронов.

В настоящей работе были рассчитаны величины действительной G_r и мнимой G_i частей кондактанса использовавшейся в опытах ячейки, содержащей систему параллельных проводящих каналов (по аналогии с расчетом для двумерной системы в работе [5]). Как следует из проведенных расчетов, величины G_r и G_i для используемых частот возбуждающего сигнала определяются действительной частью сопротивления проводящих каналов ρ_r и частотой ω_p плазменных колебаний, распространяющихся вдоль каналов. Из полученных значений G_r и G_i можно найти проводимость электронов в проводящем канале $\sigma = n_j e \mu$ (μ – подвижность), а также значение ω_p .

Для определения подвижности электронов в одномерной системе необходимо знать линейную плотность электронов в каналах n_j . Методика подсчета этой величины в «насыщенном» случае, когда электрическое поле над слоем электронов компенсируется собственным полем электронного

слоя при заданном значении V_{\perp} , описана в [5]. При малом количестве электронов в «ненасыщенном» случае величина n_j определялась при относительно высокой температуре из отношения сопротивлений канала, измеренных при различных значениях n_j . Другой способ определения величины линейной плотности электронов в канале состоял в использовании теоретических значений подвижности электронов в одномерной системе, полученных в [7]. Зная сопротивление канала, можно определить n_j . Оба способа определения величины n_j приводили приблизительно к одному и тому же значению. Проведенные оценки показывают, что в настоящей работе реализовывались электронные цепочки со средним расстоянием между электронами $a \approx (4-5) \cdot 10^{-4}$ см.

При зарядке поверхности жидкого гелия подложка (нейлоновые нити), как правило, оставалась незаряженной. Однако в случае быстрого изменения температуры ячейки, вероятно, вследствие неконтролируемого изменения толщины пленки, часть электронов могла проникать внутрь жидкого гелия и заряжать подложку. Мы также могли контролируемым образом заряжать подложку, отогревая ячейку выше температуры сверхтекучего перехода. Характер поведения подвижности электронов в

случае незаряженной и заряженной подложек оказывается различным.

Типичные температурные зависимости подвижности электронов μ в одномерных каналах на поверхности жидкого гелия показаны на рис. 2. Экспериментальные точки на кривой 1, полученные для незаряженной подложки, хорошо согласуются с теоретическим расчетом [7] (сплошная кривая), проведенным для случая отсутствия локализации носителей. Как и в случае двумерной электронной системы над жидким гелием, при $T > 0,8$ К подвижность электронов определяется их взаимодействием с атомами гелия в паре, а при $T < 0,8$ К ограничивается взаимодействием с колебаниями поверхности жидкого гелия — риплонами. Для заряженной подложки (зависимость 2) картина иная: подвижность при $T < 1,2$ К меньше аналогичной величины для «чистой» (незаряженной) подложки, а характер температурной зависимости менялся. В частности, как видно на рисунке, при $T < 0,9$ К наблюдается тенденция к небольшому уменьшению μ .

Можно предполагать, что в последнем случае проявляются эффекты локализации носителей, наблюдавшиеся ранее в [2–6] для квазиодномерных электронных систем. Электроны, зарядившие подложку, создают случайный потенциал, в котором движутся заряды на поверхности жидкого гелия. Этот потенциал и является причиной локализации электронов в жидких каналах. Очень слабая температурная зависимость подвижности при $T < 0,9$ К (зависимость 2) может свидетельствовать о квантовом характере движения носителей. В этой области температур, по-видимому, происходит туннелирование электронов между потенциальными ямами, возникающими из-за наличия электронов, локализованных на подложке. Необходимо учитывать, что даже малый случайный потенциал может приводить к локализации носителей в одномерной системе. Следует также отметить, что электроны, находящиеся в каналах, должны при локализации образовывать на поверхности жидкого гелия лунки, наличие которых может усложнить характер их движения.

В настоящей работе определялись также частота плазменных колебаний ω_p в системе параллельных проводящих каналов, которая вычислялась как подгоночный параметр из значений G_r и G_i . Интересно отметить, что экспериментально найденная величина ω_p в случае отсутствия локализации оказалась

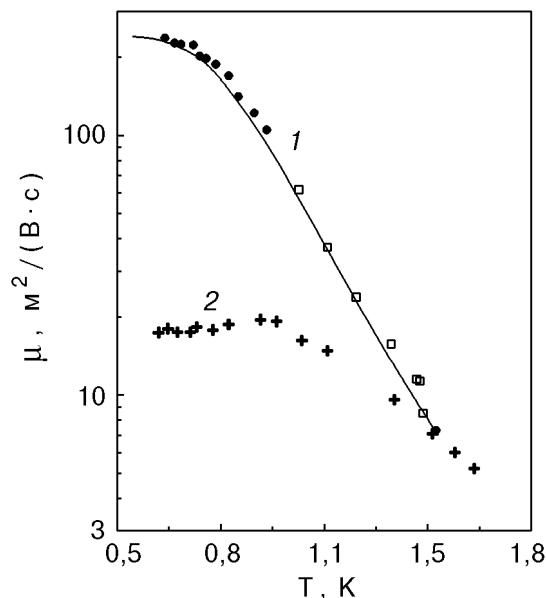


Рис. 2. Температурная зависимость подвижности носителей в линейных электронных каналах над жидким гелием: 1 — незаряженная подложка, $a = 5 \cdot 10^{-4}$ см (□); $a = 7 \cdot 10^{-5}$ см (●); сплошная линия — теория [7]; 2 — заряженная подложка, $a = 4 \cdot 10^{-5}$ см.

приблизительно на порядок больше рассчитанной теоретически. Как было обнаружено, ω_p уменьшается с понижением температуры, что пока не находит объяснения. Отметим также, что в случае локализации величина ω_p для зависимости 2, как это имело место и для квазиодномерных электронных систем [5], увеличивается по сравнению со случаем незаряженной подложки.

Таким образом, в настоящей работе впервые реализованы линейные электронные цепочки на поверхности жидкого гелия и измерена подвижность носителей в такой системе. Подвижность определяется, как и в случае двумерной системы, взаимодействием с атомами газообразного гелия и с риплонами. При зарядке подложки электронами и возникновении вследствие этого вариаций потенциала, в котором движутся носители, наблюдается тенденция к локализации.

Указанные цепочки могут служить моделью для проверки и исследований многих свойств одномерных систем, таких как свойства переноса, локализации носителей, возможные переходы в упорядоченное состояние и т.д.

Авторы выражают благодарность В. Н. Григорьеву за интерес к работе и обсуждение результатов.

1. Ю. З. Ковдря, Ю. П. Монарха, *ФНТ* **12**, 1011 (1986).
2. Ю. З. Ковдря, В. А. Николаенко, *ФНТ* **18**, 1278 (1992).

3. О. И. Киричек, Ю. П. Монарха, Ю. З. Ковдря, В. Н. Григорьев, *ФНТ* **19**, 458 (1993).
4. Hideki Yayama and Akihisa Tomokiyo, *Czech. J. Phys.* **46–51**, 353 (1996).
5. В. А. Николаенко, Х. Яяма, Ю. З. Ковдря, А. Томокийо, *ФНТ* **23**, 642 (1997).
6. Yu. Z. Kovdrya, V. A. Nikolaenko, H. Yayama, A. Tomokiyo, O. I. Kirichek, and I. B. Berkutov, *J. Low Temp. Phys.* **110**, 191 (1998).
7. S. S. Sokolov, Guo-Giang Hai, and N. Studart, *Phys. Rev.* **B51**, 5977 (1995).

Linear electron chains at superfluid helium surface

Yu. Z. Kovdrya, V. A. Nikolaenko,
S. P. Gladchenko, and S. S. Sokolov

The unique one-dimensional system of linear electron chains at liquid helium surface is realized experimentally for the first time. The distortion of the surface of liquid helium covering the profiled dielectric substrate, and the holding electric field confining the electrons to the bottom of the created channels, are used to realize the system. The carrier mobility in the linear electron chains is measured in the temperature range 0.5–1.8 K at holding electric fields up to 1 kV/cm. It is shown that the electron mobility depends on substrate cleanness. For clean substrates the mobility increases with decreasing temperature. The results agree with the existing theory.