

## Аномальный перенос заряда в квазиодномерной электронной системе над жидким гелием

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

Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: sgladchenko@ilt.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2003 г.

Измерена проводимость  $\sigma$  в квазиодномерной электронной системе над жидким гелием в интервале температур 0,5–1,7 К в широкой области плотностей электронов  $n$ . Показано, что величина  $\sigma/ne$  ( $e$  — заряд электрона) вначале увеличивается с понижением температуры, а затем, пройдя максимум, при  $T \approx 1$  К начинает понижаться. В этой области температур величина  $\sigma/ne$ , начиная с некоторого значения дрейфового потенциала  $V_d$ , уменьшается с ростом  $V_d$ . Сделано предположение, что обнаруженный в работе аномальный перенос заряда обусловлен либо пространственным упорядочением электронов в квазиодномерных каналах, либо образованием многоэлектронных поляронов в неоднородном потенциале вдоль каналов.

Виміряно провідність  $\sigma$  у квазіодновимірній електронній системі над рідким гелієм в інтервалі температур 0,5–1,7 К в широкій області густин електронів  $n$ . Показано, що величина  $\sigma/ne$  ( $e$  — заряд електрону) спочатку збільшується зі зниженням температури, а потім, пройшовши максимум, при  $T \approx 1$  К починає знижуватися. У цій області температур величина  $\sigma/ne$ , починаючи з деякого значення дрейфового потенціалу  $V_d$ , зменшується із зростанням  $V_d$ . Зроблено припущення, що виявлений у роботі аномальний перенос заряду обумовлений або просторовим упорядкуванням електронів у квазіодновимірних каналах, або утворенням багатоелектронних поляронів у неоднорідному потенціалі уздовж каналів.

PACS: 67.40.Jg, 73.20.Dx, 73.20.Fz

Успехи в нанoeлектронной технологии стимулируют активное исследование двумерных проводящих систем с ограниченной геометрией. Квазиодномерная электронная система над жидким гелием была реализована в работе [1], в [2,3] подробно изучен перенос носителей в такой системе. Было установлено, что, как и в случае двумерных электронных систем над жидким гелием, подвижность носителей при  $T > 0,8$  К определяется их взаимодействием с атомами гелия в паре, а при  $T < 0,8$  К характеристики переноса обусловлены взаимодействием электронов с тепловыми колебаниями поверхности жидкости — риплонами. Обнаружено [3], что проводимость электронов в квазиодномерной электронной системе над жидким гелием при  $T < 0,8$  К падает, причем зависимость дрейфовой скорости электронов  $v$  от ведущего электрического поля  $E_{||}$  в этой области температур носит нелинейный характер и подобна

зависимости  $v$  от  $E_{||}$  для двумерного электронного кристалла. Поэтому авторы сделали вывод, что в квазиодномерных каналах возникало пространственное упорядочение электронов.

В настоящей работе исследована проводимость электронов  $\sigma$  над жидким гелием в квазиодномерных каналах в широкой области плотностей электронов  $n$  в прижимающих полях до 900 В/см. Исследования проводили в интервале температур 0,5–1,7 К на частоте измеряемого сигнала 100 кГц. В отличие от работы [3], где электроны поперек канала удерживались прямоугольной потенциальной ямой, проводящие каналы в настоящей работе формировались потенциальной ямой квадратичной формы. В работе использовалась профилированная диэлектрическая подложка, расположенная на некоторой высоте над уровнем жидкого гелия. Затекающий на подложку жидкий гелий формировал «желобки» на поверхности жидко-

сти, что при наличии прижимающего электрического поля  $E_{\perp}$  позволяло создать потенциальную яму поперек канала. Электроны, локализованные в таком канале, движутся свободно вдоль канала, их движение перпендикулярно каналу является квантованным и носит осцилляторный характер с частотой  $\omega_0 = \sqrt{eE_{\perp}/mr}$  (здесь  $e$ ,  $m$  — заряд и масса электрона;  $r$  — радиус кривизны поверхности жидкости в канале). Экспериментальная ячейка и методика измерений подробно описаны в [2].

Полученные результаты представлены на рис. 1 в виде зависимости величины  $\sigma/ne$  от температуры  $T$  для различных значений плотности электронов в канале. Методика расчета величины  $\sigma$  аналогична приведенной в работе [2]. При построении кривых 1, 3, 4 использовано теоретическое значение подвижности при 1,6 К. Здесь же на вставке показано распределение электронов поперек канала для средней плотности  $1,4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ , полученное с использованием расчета [4]. Как видно, величина  $n$  существенно неоднородна вдоль канала. Кривая 1 на рис. 1 получена для электронейтральной подложки и относится к случаю малой плотности электронов в канале, когда электроны образуют линейную цепочку. Величина  $\sigma/ne$  для этой кривой экспоненциально

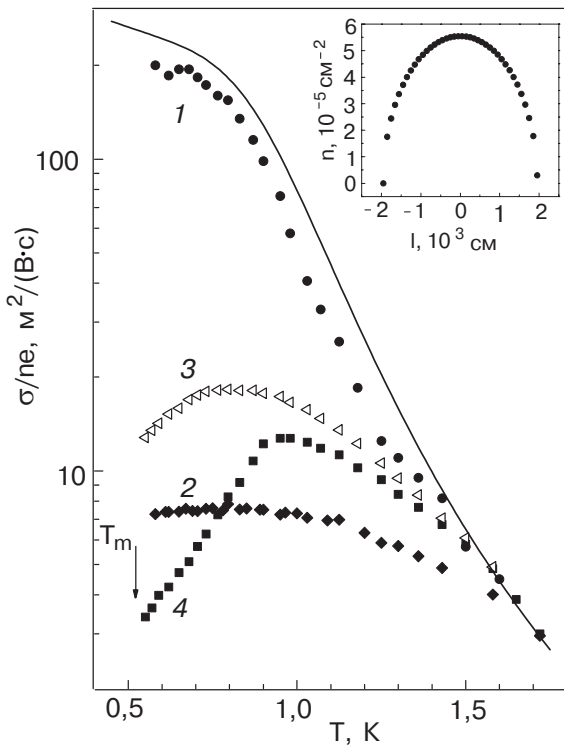


Рис. 1. Температурная зависимость величины  $\sigma/ne$  для различных значений электронной плотности  $n$ ,  $\text{см}^{-2}$ :  $2,18 \cdot 10^5$  (1);  $5,77 \cdot 10^6$  (2);  $1,35 \cdot 10^8$  (3);  $1,7 \cdot 10^8$  (4). Сплошная линия — теоретический расчет для квазиодномерной системы [6]. На вставке представлен расчет распределения плотности электронов поперек канала.

увеличивается в области газового рассеяния электронов. При более низких температурах, в области риплонного рассеяния, зависимость величины  $\sigma/ne$  от температуры более плавная. Кривая 2 описывает случай, когда на подложку нанесен электрический заряд. Видно, что подвижность электронов для заряженной подложки существенно ниже и при низких температурах практически не зависит от  $T$ . В этой области температур подвижность, по-видимому, определяется туннелированием электронов между потенциальными ямами, которые образованы электронами, локализованными на твердой диэлектрической подложке. При определении величины  $\sigma/ne$  для кривой 2 предполагалось, что существуют два канала рассеяния носителей: 1) как и для незаряженной подложки, обусловленный рассеянием электронов на атомах гелия в паре и риплонах, 2) связанный с вариациями потенциала, вызванного наличием зарядов на твердой подложке. Кроме того, предполагалось, что подвижность электронов, обусловленная наличием вариаций потенциала, не зависит от температуры.

Кривые 3, 4, снятые при значении дрейфового потенциала  $V_d \approx 30 \text{ мВ}$ , относятся к случаю широких проводящих каналов с большой плотностью электронов. Видно, что температурная зависимость величины  $\sigma/ne$  для таких каналов отличается от зависимости, представленной кривыми 1, 2. Величина  $\sigma/ne$ , пройдя максимум, положение которого зависит от плотности электронов, начинает уменьшаться с понижением  $T$ .

На рис. 2 приведена зависимость величины  $\sigma/ne$  от величины дрейфового потенциала  $V_d$ , соответствующей кривой 3 на рис. 1. На рис. 2 видно, что в области высоких температур (1,5 К) величина  $\sigma/ne$  практически не зависит от  $V_d$ . В области низких температур, где наблюдается аномальная температурная зависимость, начиная с некоторого значения

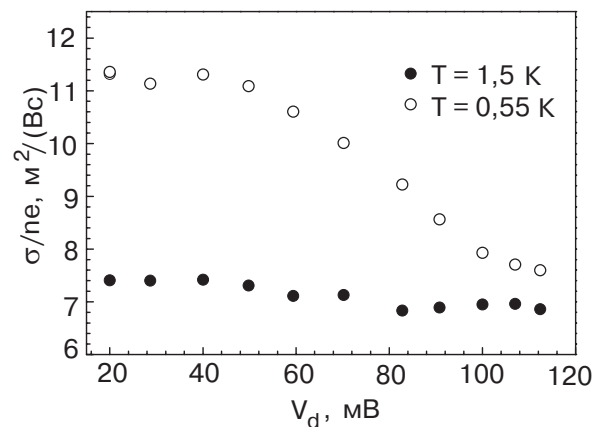


Рис. 2. Зависимость  $\sigma/ne$  от величины дрейфового потенциала  $V_d$  в квазиодномерной электронной системе.

$V_d$ , величина  $\sigma/ne$  уменьшается с увеличением  $V_d$ . В этой области температур перенос носителей при достаточно больших значениях ведущего поля носит нелинейный характер.

Одно из возможных объяснений аномального электронного переноса в узких каналах, предложенное в [3], состоит в том, что в квазиодномерных каналах, так же как и в случае двумерной электронной системы, происходит пространственное упорядочение электронов с образованием под ними лунок. В работе [5] было показано, что в узких каналах, образованных параболическим потенциалом (как это имеет место в настоящей работе), эффективная масса лунки является анизотропной и чрезвычайно большой ( $\sim 10^5 m_e$ ). Можно предположить, что при достаточно низких температурах движение таких массивных лунок будет определяться вязкостью жидкого гелия  $\eta$ . Поскольку величина  $\eta$  для жидкого гелия при  $T \leq 1,1$  К с понижением температуры увеличивается, то подвижность комплексов электрон—лунка должна уменьшаться. При этом следует иметь в виду, что, поскольку среднее расстояние между электронами и, следовательно, размеры лунок  $\sim 10^{-4}$  см, возможно, режим движения лунок является переходным между вязким и кнудсеновским, так что температурная зависимость подвижности лунок не будет полностью определяться зависимостью  $\eta$  от  $T$ . Не исключено, что определенное влияние на характер движения лунок может оказывать и поверхностная вязкость жидкого гелия.

В пользу предположения о том, что в квазиодномерных каналах при  $T < 0,8$  К образуются лунки, свидетельствует также зависимость величины  $\sigma/ne$  от дрейфового потенциала. Для квазиодномерной системы в области риплонного рассеяния подвижность должна повышаться с ростом ведущего электрического поля [7]. В настоящей работе для квазиодномерных каналов наблюдается обратная зависимость: с ростом  $V_d$  величина  $\sigma/ne$  понижается. Такая зависимость, наблюдавшаяся также в [3], может служить дополнительным свидетельством упорядочения в электронной системе.

Интересно отметить, что температура, при которой наступает уменьшение величины  $\sigma/ne$ , существенно выше температуры плавления двумерного электронного кристалла той же плотности. Кристаллизацию в двумерном слое электронов ограниченной геометрии теоретически рассматривали в [8–10] методами Монте-Карло и молекулярной динамики. Было показано, что в зависимости от условий реализации двумерной электронной системы ограниченной геометрии температура кристаллизации может быть как выше, так и ниже аналогичной

величины для системы больших размеров с той же плотностью частиц.

Еще один возможный механизм, который мог бы привести к аномальному переносу в квазиодномерных каналах, может быть связан с образованием многоэлектронных поляронов. Такие поляроны могут образовываться, например, вследствие вариации потенциала вдоль каналов, вызванной неоднородной плотностью зарядов на тонкой пленке по бокам проводящих каналов, или из-за вариации глубины каналов вследствие эллиптичности нейлоновых нитей, которые формируют «жидкий» канал. В тех местах, где расположены потенциальные ямы, плотность электронов больше, что приводит к микроскопическому прогибу жидкости и, следовательно, к образованию многоэлектронных поляронов. Эффективная масса таких поляронов будет очень большой, а кинетические характеристики должны быть во многом аналогичны кинетическим характеристикам лунок в электронном кристалле. К сожалению, расчетов свойств таких поляронов в настоящее время нет.

Таким образом, в настоящей работе обнаружен аномальный перенос в квазиодномерных электронных каналах, образованных параболической потенциальной ямой. Высказывается предположение, что такой аномальный перенос обусловлен либо пространственным упорядочением электронов в квазиодномерных каналах, либо образованием многоэлектронных поляронов.

Эксперименты будут продолжены в область больших значений плотностей электронов и прижимающих электрических полей.

Авторы выражают благодарность Ю.П. Монархе и С.С. Соколову за интерес к работе и обсуждение результатов.

1. Ю.З. Ковдря, В.А. Николаенко, *ФНТ* **18**, 1278 (1992).
2. С.П. Гладченко, В.А. Николаенко, Ю.З. Ковдря, С.С. Соколов, *ФНТ* **27**, 3 (2001).
3. P. Glasson, V. Dotsenko, P. Fozooni, M.J. Lea, W. Bailey, G. Papageorgiou, S.E. Anderson, A. Kristinsen, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 176802-1 (2001).
4. О.И. Киричек, Ю.П. Монарха, Ю.З. Ковдря, В.Н. Григорьев, *ФНТ* **19**, 458 (1993).
5. S.S. Sokolov and N. Studart, *Phys. Rev.* **B60**, 1556 (1999).
6. S.S. Sokolov, Guo-Qiang Hai, and N. Studart, *Phys. Rev.* **B51**, 5977 (1995).
7. S.S. Sokolov, Guo-Qiang Hai, and N. Studart, *Phys. Rev.* **B52**, 15509 (1995).
8. Ю.Е. Лозовик, *УФН* **153**, 356 (1987).
9. G.A. Farias and F.M. Peeters, *Phys. Rev.* **B55**, 3763 (1997).
10. K.M.S. Bajaj and R. Mehrotra, *Physica* **B194–196**, 1235 (1994).

**Anomalous charge transport in a  
quasi-one-dimensional electron  
system over liquid helium**

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

The conductivity  $\sigma$  in a quasi-one-dimensional (Q1D) electron system over liquid helium has been measured in a temperature interval 0.5–1.7 K for a wide range of electron densities  $n$ . It was shown

that the  $\sigma/ne$  value ( $e$  is the electron charge) increases first with decreasing temperature and then, passing through the maximum, it begins to decrease at  $T \approx 1$  K. In this temperature range  $\sigma/ne$  decreases with increasing drift potential  $V_d$  beginning with a certain value of  $V_d$ . It is supposed that the anomalous transport observed is conditioned either by space ordering of electrons in Q1D channels or by the formation of multi-electron polarons in the nonuniform potential along the channels.