

## Аномалия проводимости неоднородного квазиодномерного электронного канала над жидким гелием

Ю.З. Ковдря, В.А. Николаенко, А.В. Смородин

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

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2007 г., после переработки 19 июня 2007 г.

Экспериментально изучена проводимость квазиодномерной электронной системы в проводящем канале над жидким гелием в области температур 0,5–1,9 К. Установлено, что для ряда подложек наблюдаются аномалии на зависимости проводимости от потенциала прижимающего электрического поля (резкое понижение проводимости). Такое поведение проводимости, по-видимому, связано с вариациями потенциала вдоль проводящего канала, обусловленными различными видами неоднородностей.

Експериментально вивчено провідність квазіодновимірної електронної системи в провідному каналі над рідким гелієм в області температур 0,5–1,9 К. Встановлено, що для ряду підкладок спостерігаються аномалії на залежності провідності від потенціалу електричного поля, що притискає (різке зниження провідності). Така поведінка провідності, очевидно, пов'язана з варіаціями потенціалу уздовж провідного каналу, обумовленими різними видами неоднорідностей.

PACS: 67.40.Jg Ионы в жидком  $^4\text{He}$ ;  
73.20.-r Электронные состояния на поверхностях и границах раздела.

Ключевые слова: электроны и ионы, сверхтекучий  $^4\text{He}$ , квазиодномерная электронная система, квантовый провод.

Видное место среди активно исследуемых в настоящее время наноструктур занимает квазиодномерная (Q1D) электронная система над жидким гелием, предложенная в 1986 г. Ковдрей и Монархой [1] и позднее реализованная над профилированной диэлектрической подложкой в каналах, заполненных жидкостью, форма поверхности которой искажена капиллярными силами [2]. Использование в экспериментах ряда идентичных каналов повышает соотношение сигнал/шум. Электроны локализируются вблизи дна каналов под действием прижимающего электрического поля. Глубина жидкости в центре канала существенно больше радиуса кривизны ее поверхности  $r$ , при этом рассеяние электронов на риплонах — квантах капиллярных волн, преобладающее при температурах  $T < 0,8$  К, является таким же, как над массивной жидкостью. При температуре выше 1 К электроны преимущественно рассеиваются атомами гелия в паровой

фазе. Один из важных параметров — ширину проводящего канала, зависящую от поля и радиуса, — можно менять в широких пределах. Эффекты, вызванные присутствием тонкой пленки (меньше  $10^{-5}$  см) на краях канала, заметно модифицируют электрон-риплонное рассеяние и могут приводить к взаимодействию электронов с неоднородностями межфазной границы: жидкость–твердая подложка. Неоднородности стенок канала вызывают дополнительное рассеяние, связанное как с сильным поляризационным взаимодействием электронов со стенками, так и с локализацией части электронов на неоднородностях стенок.

Перенос заряда в «чистых» каналах (свежеприготовленная подложка), когда влиянием неоднородностей стенок и тонких пленок можно пренебречь, исследован достаточно хорошо как теоретически, так и экспериментально [3,4]. Важным результатом ис-

пользования чувствительных к неоднородностям узких проводящих каналов является обнаружение слабой локализации носителей на атомах гелия в паре в классической Q1D электронной системе [5]. Значительный интерес вызывает изучение проводящих каналов с дополнительным потенциалом рассеяния, вызванным, в частности, деградацией подложки. Естественно ожидать, что прижимающее электрическое поле, сильно влияющее на структуру волновой функции электронов и на электрон-риплонное взаимодействие, должно заметно сказываться и на взаимодействии носителей с неоднородностями подложки.

В работе экспериментально изучается проводимость Q1D электронной системы над жидким гелием как функция прижимающего поля в условиях неоднородностей. Как и в работе [4], подложкой служили параллельно расположенные нейлоновые нити, углубления между которыми заполнены гелием. Значение радиуса кривизны поверхности жидкости определяется как  $r = \alpha / \rho gh$  ( $h$  — высота подложки над поверхностью гелия,  $\alpha$  — коэффициент поверхностного натяжения гелия и  $\rho$  — его плотность). Для типичного значения  $h = 8$  мм радиус кривизны  $r$  составлял  $3,4 \cdot 10^{-3}$  см. Конструкция ячейки и методика измерений аналогичны тем, которые применялись в работе [4]. Особенностью данной работы было то, что для создания дополнительных неоднородностей потенциала вдоль проводящих каналов использовали прямоугольные «фрагменты» поверхности измерительных электродов в виде небольших периодических углублений с шагом около 0,05 и глубиной  $10^{-4}$  см.

Часть сечения экспериментальной ячейки показана на рис. 1. Ячейка состояла из двух компланарно расположенных прямоугольных измерительных электродов размером  $5 \times 9$  мм, которые были разделены заземленной полоской  $1 \times 9$  мм. Малые зазоры между частями электродов не вносили заметных неоднородностей потенциала в плоскости подложки. Источником электронов служила вольфрамовая нить накаливания над щелью в верхнем электроде, находящемся на расстоя-

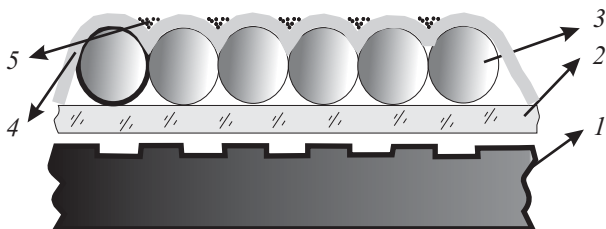


Рис. 1. Структура измерительной ячейки. 1 — измерительные электроды с фрагментированными поверхностями; 2 — стеклянная пластинка; 3 — подложка из нейлоновых нитей; 4 — жидкий гелий; 5 — поверхностные электроны.

нии  $d = 1$  мм от измерительных электродов. Измерения проводили по методике Соммера–Таннера на частоте 20 кГц при потенциале ведущего поля от нескольких милливольт до 1 В. В модели источника тока с использованием синхронного усилителя измеряли 0-градусную ( $U_0$ ) и 90-градусную ( $U_{90}$ ) составляющие сигнала. Подложку помещали на измерительные электроды, она состояла из 85 нейлоновых нитей диаметром 90 мкм, расположенных в ряд на стеклянной пластине размером  $11 \times 9 \times 0,24$  мм. Параболический потенциал перпендикулярно каналу имеет вид  $U(y) = [eE_{\perp} / (2r)]y^2$ . Полуширина проводящего канала  $a$  для чистой подложки при  $a < r$  и относительно большой плотности электронов, что соответствует условиям нашего эксперимента, выражается аналогично [6]:  $a = 2\sqrt{er n_l / E_{\perp}}$ , где  $n_l$  — линейная плотность электронов, и составляет менее 15 мкм. Связь прижимающего потенциала и прижимающего поля задается соотношением  $E_{\perp} = V_{\perp} / d$ . Значение межуровневого расстояния в энергетическом спектре Q1D системы, определяемое как  $\hbar\sqrt{eE_{\perp} / (mr)}$ , не превышало в экспериментах 0,3 К и, таким образом, электроны заселяли не только основную, но и возбужденные уровни энергии.

Измерения проводили в области температур от 1,9 до 0,5 К, что перекрывает области как электрон-газового, так и электрон-риплонного рассеяний. В ходе измерений снимали зависимости измерительного сигнала, проходящего через ячейку с электронами, от прижимающего потенциала  $V_{\perp}$ . Средняя плотность электронов в полоске и относительная величина проводимости определялись аналогично [7] по величинам  $U_0$  и  $U_{90}$ . В экспериментах плотность электронов составляла от  $10^4$  до  $3 \cdot 10^8$  см $^{-2}$ .

Типичные экспериментальные зависимости относительной величины проводимости от  $V_{\perp}$ , снятые при  $T = 1,5$  К, приведены на рис. 2. В газовой области исследования проведены при значениях  $V_{\perp}$  до 160 В. В ряде экспериментов имели место две аномалии, как изображено на графиках. Верхняя кривая получена при увеличении прижимающего потенциала, а нижняя — при его уменьшении. Расхождение данных при  $V_{\perp} \leq 60$  В соответствует уменьшению концентрации электронов примерно на 20%. При этом положение аномалии сдвинулось к меньшим величинам прижимающего потенциала. На вставке показана зависимость компоненты  $U_0(V_{\perp})$ , снятая при  $T = 0,6$  К для  $80 \text{ В} < V_{\perp} < 140 \text{ В}$ . Аномалия здесь наблюдается при  $V_{\perp} \approx 115$  В. Гистерезис в положении аномалий не наблюдался. Уменьшение проводимости в области аномалий составляло до 15% при 1,5 К до 50% при 0,6 К. Положение аномалий в отдельном опыте не зависело от амплитуды и частоты сигнала (изменения были порядка  $\pm 150\%$ ). Следует отметить, что анома-

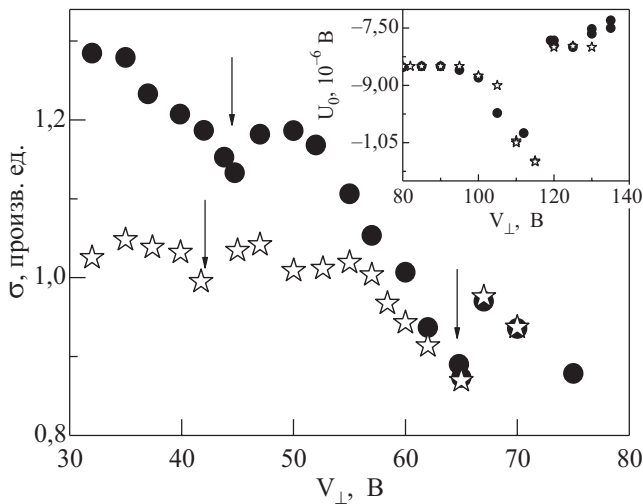


Рис. 2. Изменение проводимости канала в зависимости от прижимающего поля при температуре 1,5 К. (● — увеличение поля, ☆ — уменьшение поля). На вставке: 0-градусная ( $U_0$ ) компонента сигнала в зависимости от прижимающего потенциала  $V_{\perp}$  при температуре 0,6 К.

лии проводимости не наблюдались ни при относительно большом напуске гелия, ни при больших концентрациях электронов.

Зависимость локального минимума проводимости от величины прижимающего потенциала для одиночного проводящего канала наблюдалась и в работе [6]. Опыты проведены при большой насыщенной электронной концентрации и с зарядом на подложке. В настоящей работе концентрация была ненасыщенной и показано, что с ростом концентрации аномалия сглаживается; заряд на подложке также контролировался.

Исходя из размеров фрагментов на поверхности измерительных электродов и расстояния их до подложки оценочная вариация потенциала вдоль канала составляла  $\leq 10^3$  К при величине прижимающего потенциала  $E_{\perp} \sim 10^3$  В/см. По оценкам кулоновского взаимодействия вариации плотности электронов вдоль канала порядка  $10^7$ – $10^8$  м<sup>-2</sup>, т.е. могут образовываться своеобразные узкие проводящие «мостики» между более широкими участками канала. Расстояние упорядоченного движения электронов за полупериод измерительного сигнала при максимальной напряженности ведущего электрического поля  $\geq 10^{-2}$  В/см порядка  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  см. Длина свободного пробега электрона в газовой области составляла  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  м. Она меняется с температурой по экспоненциальному закону и может оказаться соизмеримой с размерами «мостика», что может вести к классическому размерному эффекту. В ходе отдельного эксперимента положение аномалии не зависело от температуры и, следовательно, этот эффект, по-видимому, отсутствовал.

Таким образом, наблюдаемые эффекты, вероятно, связаны с влиянием неоднородностей потенциала вдоль проводящих каналов. Такой потенциал может быть наведен также и неоднородностями стеклянной пластинки. Неоднородность потенциала вдоль проводящего канала может приводить к тому, что с увеличением прижимающего поля в некоторых местах каналов возникают зауженные места, «мостики» между многоэлектронными «резервуарами». Размеры «мостиков» можно изменять экспериментальными условиями от макроскопических до микроскопических. Уменьшению размера «мостика» способствует также действие параболического потенциала  $U(y)$ , растущее с увеличением прижимающего потенциала.

Соизмеримость «мостика» с длиной волны де Бройля ( $\sim 300$  Å для наших условий) может привести к квантовому размерному эффекту (в случае неоднородной ширины «мостика» возможна волноводная дисперсия). При дальнейшем увеличении  $V_{\perp}$  вероятен разрыв связей между своеобразными резервуарами зарядов. Наличие более одной аномалии проводимости можно объяснить либо дальнейшим дроблением канала на более мелкие участки, либо появлением другого типа неоднородности с ростом  $V_{\perp}$ . Аномалия изменялась с качеством подложки и концентрацией электронов: с ростом последней аномалия проводимости уменьшалась и сдвигалась к большим значениям  $V_{\perp}$ .

Не исключено влияние на аномальный перенос и участков подложки с дополнительными потенциальными ямами, в которых могут накапливаться электроны. Увеличение прижимающего потенциала может вести к перелокализации электронов из ям в проводящий канал, что может вызвать увеличение проводимости. Для такой реализации, по-видимому, необходима идентичность ям, чтобы аномалия проявлялась при данном  $V_{\perp}$ .

Ранее в двумерной системе поверхностных электронов над поверхностью твердого водорода, покрытого монослоями сверхтекучего гелия, при изменении толщины пленки были обнаружены аномалии проводимости [9], похожие на те, что наблюдались в настоящей работе. Аномалия проводимости наблюдалась и в случае нормальной пленки <sup>3</sup>He на водородной подложке, а также над массивной гелиевой пленкой, покрывающей диэлектрическую подложку. В работе [10] проведен теоретический анализ этого эффекта, который объяснен процессом перелокализации электронов с углублений шероховатой поверхности подложки на выступы при наращивании пленки.

Таким образом, в проводимости Q1D электронной системы над массивным гелием обнаружены аномальные особенности при наличии неоднородностей потенциала вдоль канала, которые могут быть вызваны

неоднородностями подложки и фрагментированием поверхности измерительных электродов. Аномалии наблюдаются при различных температурах, соответствующих как газовой, так и риплонной областям рассеяния носителей. Величина, форма и положение аномалий в пределах одного эксперимента не зависят ни от амплитуды и частоты измерительного сигнала, ни от направления изменения прижимающего потенциала, и ее положение практически не зависит от температуры. Аномалия зависит от качества поверхности подложки и концентрации электронов, с ростом которой сдвигается к большим значениям прижимающего поля. Аномальные особенности в проводимости могут быть объяснены зауженными участками проводящих каналов: электронные «резервуары» при определенных условиях могут быть соединены узкими, порядка длины волны де Бройля электрона, «мостиками», перенос через которые или их разрыв может вести к наблюдаемым эффектам. Аномальная особенность, таким образом, предположительно может быть вызвана квантово-размерным эффектом и/или дробовым эффектом, характеризующимся повышенным шумом сигнала.

Авторы выражают благодарность Ю.П. Монарха и С.С. Соколову за интерес к данной работе и обсуждение ее результатов.

1. Ю.З. Ковдря, Ю.П. Монарха, *ФНТ* **12**, 571 (1986).
2. Ю.З. Ковдря, В.А. Николаенко, *ФНТ* **18**, 1278 (1992).
3. S.S. Sokolov, Guo-Giant Hai, and N. Studart, *Phys. Rev.* **B51**, 5977 (1995).
4. С.П. Гладченко, В.А. Николаенко, Ю.З. Ковдря, С.С. Соколов, *ФНТ* **27**, 3 (2001).
5. Ю.З. Ковдря, В.А. Николаенко, С.П. Гладченко, *Письма в ЖЭТФ* **73**, 526 (2001).

6. В.Н. Григорьев, О.И. Киричек, Ю.З. Ковдря, Ю.П. Монарха, *ФНТ* **19**, 458 (1993).
7. V.A. Nikolaenko, Yu.Z. Kovdrya, and S.P. Gladchenko, *J. Low Temp. Phys.* **138**, 439 (2005).
8. P. Glasson, V. Dotsenko, P. Fozooni, M.J. Lea, W. Bailey, G. Papageorgiou, S.E. Anderson, and A. Kristensen, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 176801 (2001).
9. K. Kono, U. Albrecht, and P. Leiderer, *J. Low Temp. Phys.* **83**, 423 (1991).
10. Yu.P. Monarkha, U. Albrecht, K. Kono, and P. Leiderer, *Phys. Rev.* **B47**, 13812 (1993).

### Anomalies of conductivity in a quasi-one-dimensional electron system over liquid helium

Yu.Z. Kovdrya, V.A. Nikolaenko, and A.V. Smorodin

Conductivity of a quasi-one-dimensional electron system in the conducting channel above liquid helium is investigated experimentally in the temperature region 0.5–1.9 K. It is found that anomalies the conductivity as a function of pressing electric field displays (sharp downturn) for some substrates. Such a behavior of conductivity appears to result from variations in the potential along the conducting channel caused by inhomogeneities of profiled substrates.

PACS: 67.40.Jg Ions in liquid  $^4\text{He}$ ;  
**73.20.-r** Electron states at surfaces and interfaces.

Keywords: electrons and ions, superfluid  $^4\text{He}$ , quasi-one-dimensional systems, quantum wire.