

PACS numbers: 67.25.-k, 67.30.-n, 67.80.-s, 73.20.-r, 73.25.+i, 73.90.+f, 85.30.De

## **Влияние заряда подложки на перенос поверхностных электронов над гелием в условиях квазиодномерности**

В. А. Николаенко, А. В. Смородин

*Физико-технический институт низких температур НАН Украины,  
просп. Ленина, 47,  
61103 Харьков, Украина*

В работе используется квазиодномерная система поверхностных электронов (ПЭ) над сверхтекучим гелием в качестве классической модели твердотельного квантового проводника. Выполнены экспериментальные исследования кинетики поведения электронов в узких каналах в присутствии заряда на подложке. Ход температурной зависимости в этих условиях имеет ступенчатый характер при температуре ниже 1,3 К, и параметры ступеней в различных опытах отличаются. Подобный характер зависимости не описывается классическими моделями переноса заряда, где учитывается рассеяние электронов в каналах на атомах гелия в паре и рипплонгах. Предполагается, что подобная зависимость является проявлением квантового характера переноса в электронных каналах.

У статті використовується квазиодновимірна система поверхневих електронів (ПЕ) над надплинним гелієм у якості класичного моделю твердотільного напівпровідника. Виконано експериментальні дослідження кінетики поведінки електронів у вузьких каналах у присутності заряду на підложці. Хід температурної залежності в цих умовах має східчастий характер за температури нижче 1,3 К; параметри сходів у різних випробуваннях є різними. Подібний характер залежності не описується класичними моделями переносу заряду, де враховується розсіяння електронів у каналах на атомах гелію в парі та рипплонгах. Вважається, що така залежність є виявленням квантового характеру переносу в електронних каналах.

Quasi-one-dimensional system of the surface electron (SE) over superfluid helium is used as a classical model for a solid-state quantum conductor. Experimental investigations of electron kinetics in narrow channels in the presence of charge on the substrate are carried out. The course of temperature dependence under such conditions demonstrates stepwise behaviour at temperatures lower than 1.3 K, and parameters of steps in different experiments are varying. Classical models of charge transfer do not describe a similar

character of this dependence, when electrons scattering in channels on atoms of helium in steam and ripplons is considered. It is supposed that such dependence demonstrates quantum behaviour of charge transfer in electronic channels.

**Ключевые слова:** твердотельный квантовый проводник, квазиодномерная система поверхностных электронов, сверхтекучий гелий.

*(Получено 21 ноября 2010 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие современной нанотехнологии стимулирует фундаментальные и прикладные исследования одномерных и нольмерных систем на полупроводниковой и металлической основе. В наноэлектронике такие системы известны как квантовые проволоки и квантовые точки, применяемые в одноэлектронных транзисторах, лазерах на гетероструктурах, квантовых битах в квантовых компьютерах и др. [1]. Классическим аналогом вырожденных твердотельных проводящих наноструктур служат структуры с применением поверхностных электронов (ПЭ) [2]. ПЭ представляют собой слой электронов над диэлектриком с малой проницаемостью, что ведет к образованию неглубокой потенциальной ямы. Электроны находятся на большом расстоянии от поверхности диэлектрика, порядка 10 нм. Сверхтекучий гелий является идеальной подложкой для ПЭ, о чем свидетельствует предельно высокая подвижность электронов в слое ( $\cong 10^4$  см<sup>2</sup>/Вс), ограниченная лишь диссипациями на атомах гелия в паре и на риплонах — квантованных колебаниях поверхности гелия. Электронный спектр  $\theta^2 R/n^2$  (где  $n = 1, 2, \dots$ ;  $\theta$  — эффективность изображения электрона в подложке;  $R = 13,6$  эВ — постоянная Ридберга) с энергией 8 К основного состояния электрона.

Модуляция свойств подложки в одном или двух направлениях позволяет создавать ультрачистые одномерные или нольмерные системы на основе ПЭ [3]. В таких системах проявляются как классические, так и квантово-волновые свойства носителей при соизмеримости мезоскопического размера электронной системы с длиной волны де Бройля ( $\cong 1000$  ангстрем при 1 К и растущую с температурой как  $T^{-1/2}$ ).

В работе применена Q1D-система на ПЭ [4] с зарядением искривленной поверхности массивного гелия в полосках сверхтекучего гелия, затекающего на высоту  $H$  в канавки профилированной подложки. Электроны над гелиевой поверхностью локализованы поперек каналов в потенциальной яме вида параболического цилиндра  $U(y) = m\omega_0^2 y^2 / 2$ . Волновая функция и размер локализованного со-

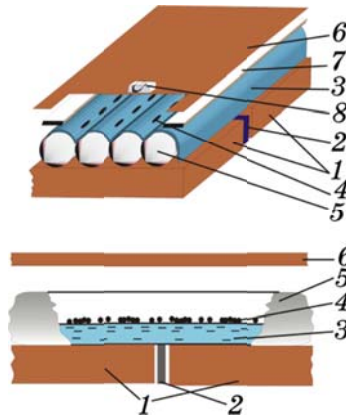
стояния электрона на основном уровне определяется следующей формулой  $\psi_0(y) = 1 / (\pi^{1/2} y_0) \exp(-x^2 / 2y_0^2)$  [5],  $y_0^2 = \hbar / (2\pi m \omega_0)$  с колебательным спектром  $\omega_0 = eE_{\perp} / (mR)$ . В экспериментах достигается величина  $y_0 \cong 100$  нм.

Подобная система управляема внешним электрическим и магнитным полем, легко варьируема по концентрации электронов, которая задается внешним полем. Система может служить и как объект исследований, и как высокочувствительный инструмент.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе исследовано сопротивление узких полосок из электронов над гелием при наличии заряда на подложке. Узкие полоски электронов формировались над жидкостью в канавках горизонтально расположенной диэлектрической профилированной подложки в присутствии прижимающего электрического поля. В поле  $E_{\perp} = 490$  В/см концентрация электронов была  $4 \cdot 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>. Потенциал заряда на подложке определялся, как и в полупроводниковых структурах, по отсечке проводимости на вольт-амперной характеристике и в экспериментах составлял  $\cong 30$  В.

Ячейка для исследования проводимости и ход эксперимента были аналогичны описанным в работе [6]. Подложка представляла собой набор из 35 горизонтально расположенных отрезков световода диаметром 125 мкм, уложенных в ряд на измерительных электродах размерами  $10 \times 5$  мм<sup>2</sup>. Подложка помещалась в герметичную камеру, куда дозировано конденсировался газ гелий. По разности уровней между поверхностями жидкости и подложки определялся



**Рис. 1.** Измерительная ячейка: 1 — электроды; 2 — заземленный электрод; 3 — жидкий гелий; 4 — поверхностные электроны; 5 — нейлоновая нить; 6 — прижимающий электрод; 7 — охранный электрод.

радиус  $R = \sigma/\rho gH$ , который составлял 35 мкм. Электроны эмитировались на подложку от нити накаливания. Глубина потенциальной ямы, оцениваемая как  $\phi = eE_{\perp}\delta$ , где  $\delta$  — величина стрелки прогиба, была  $\cong 10^4$  К.

Измерения выполнялись при частоте измерительного сигнала 20 кГц по методике, использующей ёмкостную связь измерительных электродов с электронной системой. Проводимость и подвижность ПЭ при известной концентрации определяли по измеренным с помощью синхронного усилителя (lock-in-amplifier) значениям 0-градусной и 90-градусной компонент измерительного сигнала.

На рисунке 2, а представлена температурная зависимость проводимости ПЭ с концентрацией  $\cong 10^8$  см $^{-2}$  при понижении  $T$  (нижняя кривая) и при повышении  $T$  (верхняя кривая). Видно, что при  $T \leq 1,3$  К появляются особенности в виде ступенчатых зависимостей проводимости от температуры. Протяженность ступеней становится больше при понижении температуры. Следует отметить, что от опыта к опыту параметры ступеней варьируют, хотя в одном эксперименте после ряда термоциклов характер ступеней проводимости остается практически неизменными. На рисунке 2, б приведена температурная зависимость  $\sigma(T)$  для электронных концентраций  $\cong 10^7$  см $^{-2}$ .

Предполагается, что наличие ступеней вызвано волнами зарядовой плотности (ВЗП) [7], формируемых в наших условиях слабоподвижными электронами на подложке, и образующих узкие полоски вдоль канала. Поверхностные электроны движутся в квазипериодическом поле ВЗП. В такой одномерной задаче с потенциалом  $U = kx^2/2$ , где  $k = m\omega^2$  вдоль канала имеет место модель линейного гармонического осциллятора. По оценкам  $E_n$  составляет 1 К, что согласуется с экспериментом. Может иметь место резонансное тун-

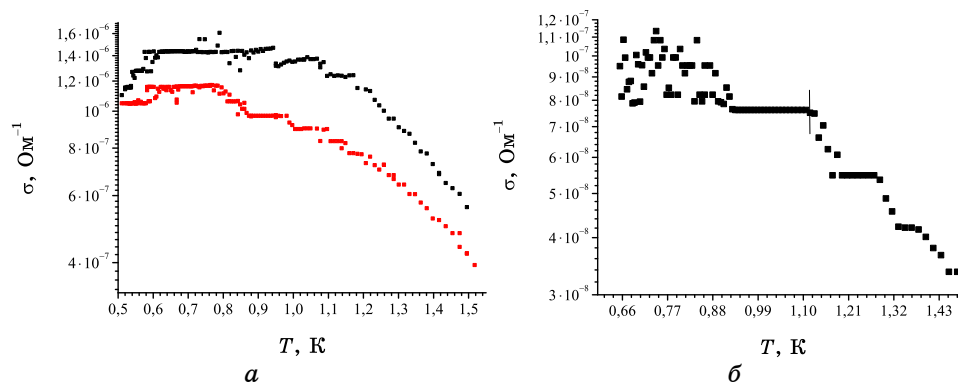


Рис. 2. Зависимость проводимости ПЭ в квазиодномерной системе от температуры.

нелирование электрона между потенциальными ямами. При более высоких  $T$  ширина энергетических уровней соизмерима с температурой.

Альтернативным объяснением наблюдаемого эффекта может служить и режим баллистического переноса электронов в квантовых нитях [8] при непрерывном изменении их плотности. Ширина полосы ограничивается, с одной стороны, воздействием внешнего прижимающего поля, сдвигающего заряд к линейным углублениям в подложке, с другой стороны, кулоновским отталкиванием заряда подложки. Однако размеры ступенек не соизмеримы с величиной квантования проводимости, которые имеют место в твердотельных квантовых проводниках.

### 3. ВЫВОДЫ

Таким образом, используя в работе Q1D-систему ПЭ над сверхтекучим гелием как классическую модель твердотельного квантового проводника, выполнены экспериментальные исследования кинетики поведения ПЭ в присутствии заряда на подложке. Ход температурной зависимости в этих условиях имел ступенчатый характер при температуре ниже 1,3 К, и параметры ступеней в различных опытах отличались. Подобный характер зависимости не описывается классическими моделями переноса заряда, с учетом рассеивателей в каналах. Предполагается, что подобная зависимость является проявлением квантового характера переноса в электронных каналах.

Альтернативное объяснение: заряд на подложке дополнительно «поджимает» слой ПЭ, ширина которого соизмерима с изменяющейся от температуры длиной волны де Бройля. Однако размеры ступенек не соизмеримы с величиной квантования проводимости, имеющей место в твердотельных квантовых проводниках.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ж. И. Алферов, *Физика и техника полупроводников*, **32**, № 1: 3 (1998).
2. В. Б. Шикин, Ю. П. Монарха, *Двумерные заряженные системы в гелии* (Москва: Наука: 1989).
3. Ю. З. Ковдря, *ФНТ*, **29**: 107 (2003).
4. Ю. З. Ковдря, Ю. П. Монарха, *ФНТ*, **12**: 571 (1986); Ю. З. Ковдря, В. А. Николаенко, *ФНТ*, **18**: 1278 (1992).
5. S. S. Sokolov, G.-Q. Hai, and N. Studart, *Phys. Rev. B*, **51**: 5977 (1995).
6. А. В. Смородин, В. А. Николаенко, С. С. Соколов, *ФНТ*, **34**: 751 (2008).
7. С. В. Зайцев-Зотов, *УФН*, **174**: 585 (2004).
8. И. А. Обухов, *Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах* (Москва–Киев–Минск–Севастополь: Вебер: 2005).