

PACS numbers: 67.25.-k, 67.30.-n, 67.80.-s, 68.35.Ct, 73.25.+i, 73.90.+f, 85.30.De

## **Анализ нанощероховатостей подложек с использованием левитирующих электронов над сверхтекучей плёнкой гелия**

А. В. Смородин, В. А. Николаенко

*Фізико-технічний інститут низких температур НАН України,  
просп. Леніна, 47,  
61103 Харків, Україна*

Описано устройство для исследования нанощероховатостей подложек путём анализа проводимости левитирующих электронов над плёнкой жидкого гелия в зависимости от её толщины. Устройство представляет собой камеру для сверхтекучего гелия и измерительную ячейку с подложкой, горизонтально расположенной над измерительными электродами, которые в вертикальном направлении перемещаются с помощью электромеханической тяги. По характеристикам переноса электронов имеется возможность идентифицировать нанощероховатости размером от единиц ангстремов при ненасыщенной гелиевой плёнке до  $10^2$  нм при насыщенной плёнке гелия.

Описано пристрій для дослідження нанощерсткостей підкладок шляхом аналізу провідності електронів, що левітують над плівкою рідкого гелію, залежно від її товщини. Пристрій є камерою для надплинного гелію і вимірювальною коміркою з підкладкою, горизонтально розташованою над вимірювальними електродами, які у вертикальному напрямку переміщуються за допомогою електромеханічного тягу. За характеристиками переносу електронів є можливість ідентифікувати нанощерсткості розміром від одиниць Ангштремів (при ненасиченій гелійовій плівці) до  $10^2$  нм (при насиченій плівці гелію).

The device for study of nanoroughness of substrates by the analysis of conductivity of electrons levitating above a helium film as a function of film thickness is described. The device contains the chamber for superfluid helium and a measuring cell with substrate horizontally positioned above measuring electrodes, which are moved in a vertical direction by electromechanical draught. Using measured electron-transport characteristics, one can identify nanoroughness from angstrom range (for an unsaturated helium film) to  $10^2$  nanometers (for a saturated helium film).

**Ключевые слова:** жидкий гелий, поверхностный электрон, проводимость низкоразмерных систем.

(Получено 17 ноября 2010 г.)

Анализ качества поверхности подложек имеет большое значение в нанотехнологии, в частности, для применения ее продуктов в наноэлектронике [1]. Существует ряд нанометрических и спектроскопических методов такого анализа. Среди них наиболее известны как туннельная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, фазово-интерференционный метод. Качество интерфейсных границ может быть определено, в частности, по транспортным характеристикам носителей в образце на границе слоев или границе различных веществ. Это относится, прежде всего, к инверсионным и аккумуляционным слоям и гетероструктурам. Интересным дополнением к такого рода системам являются левитирующие электроны над гелием при низких температурах [2, 3]. Слой левитирующих электронов в отличие от электронных слоев в твердотельных образцах формируется в неглубокой потенциальной яме над диэлектриком с низкой диэлектрической проницаемостью. Двумерная электронная плазма локализуется на значительном расстоянии от поверхности, существенно превышающем межатомные расстояния в веществе. Электроны в слое характеризуются максвелловским распределением по скоростям и бoльцмановским распределением по уровням энергии в потенциальной яме.

Помимо гелия, подобные электронные системы могут существовать над диэлектриками с низкой проницаемостью, такими как жидкий и твердый неон, водород и ряд других криогенных веществ. Но идеальной подложкой для левитирующих электронов служит поверхность сверхтекучего гелия. Боровский радиус электрона в этом случае составляет  $\cong 10$  нм, электронный энергетический спектр имеет вид  $E_n = Q^2 R / n^2$  с энергией электрона на основном уровне около 8 К. Здесь  $Q = (\epsilon - 1) / [4(\epsilon + 1)]$  — параметр, характеризующий силы изображения,  $R = me^4 / (2\hbar^2)$  — постоянная Ридберга (13,6 эВ) и  $\{n\}$  — ряд натуральных чисел. Реализация электронной плазмы над гелием и измерение транспорта носителей в ней относительно просты: в поле между пластинами плоского конденсатора, частично заполненного диэлектриком (подложкой), свободные электроны эмитируются от источника на поверхность пленки, покрывающей диэлектрик. Одна из пластин конденсатора является составной, между частями которой по емкостно-связанной методике измеряется кондактанс электронного слоя [4].

Шероховатость поверхности со сверхтекучей пленкой гелия на подложке существенно влияет на проводимость левитирующих электронов. Первые систематические СВЧ-измерения проводимости электронов над пленками различной толщины на ситалловой подложке выполнены в работе [5]. Теоретически вопрос влияния

шероховатостей подложки на перенос носителей над пленками гелия рассматривался в работе [6]. При соизмеримости толщины сверхтекучей гелиевой пленки на подложке и эффективного размера шероховатости, могут развиваться термоактивационные и перколяционные эффекты в процессах переноса заряда.

Результаты, полученные в экспериментах, интерпретируются на основе теории [6], в которой в больцмановском приближении учтено рассеивание электронов на неоднородностях подложки. Величина эффективной проводимости при термоактивационном механизме переноса заряда может быть определена как  $\sigma^* = \sigma_0 e^{-\Delta/T}$ , где  $\sigma_0$  — проводимость электронов над сверхтекучим гелием, ограниченная их взаимодействием с атомами гелия в паре и рипплонами (квантованными колебаниями поверхности сверхтекучего гелия), и  $\Delta$  — энергия термоактивации. Из определяемых в эксперименте значений проводимости и теоретических значений  $\sigma_0$  можно найти  $\Delta$ , а из квантового соотношения неопределенностей Гейзенберга оценивается характерное время релаксации носителей. При условии превышения де Бройлевской длины волны электрона расстояния между неоднородностями подложки можно определить размер шероховатости  $a \approx \hbar(m\Delta)^{-1/2}$ . Туннелирование электронов через потенциальные барьеры в неоднородной квазиодномерной электронной системе над гелием экспериментально изучались в [7].

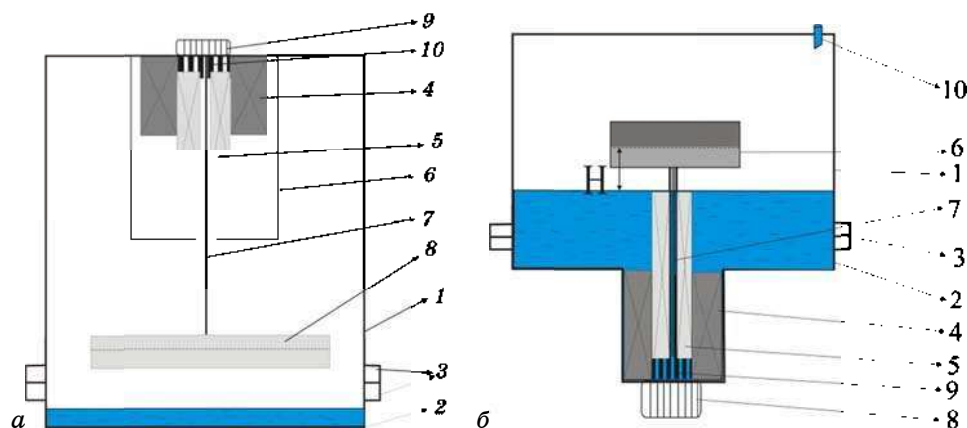
Толщины пленок сверхтекучего гелия определяются: для тонких пленок ( $d$  меньше 600 Å) как  $d = d_0 / H^{1/3}$  ( $d_0 = 2,88 \cdot 10^{-6}$  см<sup>4/3</sup> — константа, определяемая Ван дер Ваальсовским потенциалом [12]), а для массивных пленок —  $d = d_0 / H^{1/4}$  (где  $d_0 = 2,9 \cdot 10^{-6}$  см<sup>5/4</sup> [13]). Расстояние  $H$  между уровнем массивного гелия в ячейке и подложкой, на которой находится пленка, задается напуском расчетного количества газообразного гелия в герметичную камеру с ячейкой. В работе [8] уровень гелия под ячейкой изменяли посредством вытеснения определенного количества гелия из свободного объема, используя сильфонную газо-жидкостную систему. Следует отметить инерционность исследований и нарушение теплового баланса в вышеприведенных процедурах установки уровня, которые не позволяли оперативно выполнять исследования зависимости транспорта электронов от толщины пленки.

Целью настоящей работы является предложение схемы устройства и методики для определения размеров нанощероховатостей, характерных для подложки. Процедура заключается в измерении проводимости левитирующих электронов над сверхтекучей пленкой гелия при изменении ее толщины и в идентификации неоднородностей по полученной зависимости.

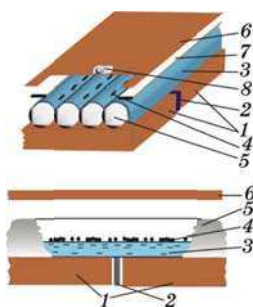
Предлагаемое устройство основано на возможности вертикально перемещать измеряемую ячейку относительно гелиевой ванны. Ячейка содержит горизонтально расположенные измерительные

электроды, над которыми находится исследуемый образец в виде пластины. Так как боковые поверхности измерительной ячейки открыты, сверхтекучий гелий под действие капиллярных сил затекает на подложку, образуя пленку на ее поверхности. Изменение толщины пленки при перемещении ячейки над поверхностью жидкости осуществляется посредством электромеханической тяги.

Схематический пример устройства изображен на рис. 1, *а*. Устройство находится в вакуумируемой камере 1 с дном камеры 2, соединяемых через индиевое уплотнение посредством фланцевого соединения 3. В верхней части камеры закреплена неподвижная катушка 4, внутри которой находится подвижная катушка 5. Катушки соединены последовательно и запитаны от одного программируемого внешнего источника тока. Обе катушки экранированы сверхпроводящим кожухом 6. Посредством тонкой кварцевой нити 7 подвижная катушка соединена с центром измерительной ячейки 8 (рис. 2). Напряжения и сигнал на катушку и ячейку подаются через вакуумированный электрический разъем 9. Скользящая контактная система 10, размещенная в верхней части внутри неподвижной катушки, электрически связывает разъем и ячейку, соединенную посредством жгута тонких про-



**Рис. 1.** Устройства для исследования нанощероховатостей подложек: (*а*) 1 — вакуумная камера, 2 — дно камеры, 3 — фланцевое соединение, 4 — неподвижная катушка, внутри которой находится подвижная катушка (5), 6 — сверхпроводящий кожух, 7 — тонкая нить (из кевлара), 8 — измерительная ячейка, 9 — вакуумированный электрический разъем, 10 — скользящая контактная система, размещенная в верхней части внутри неподвижной катушки, электрически связывающая разъем и ячейку, соединенную с системой посредством жгута тонких проводников; (*б*) 1 — вакуумная камера, 2 — дно камеры, 3 — фланцевое соединение, 4 — неподвижная катушка, 5 — подвижная катушка, 6 — измерительная ячейка, 7 — коаксиальный уровнемер-толкатель, 8 — электрический разъем, 9 — скользящая контактная система с демпфером, 10 — капилляр заполнения.



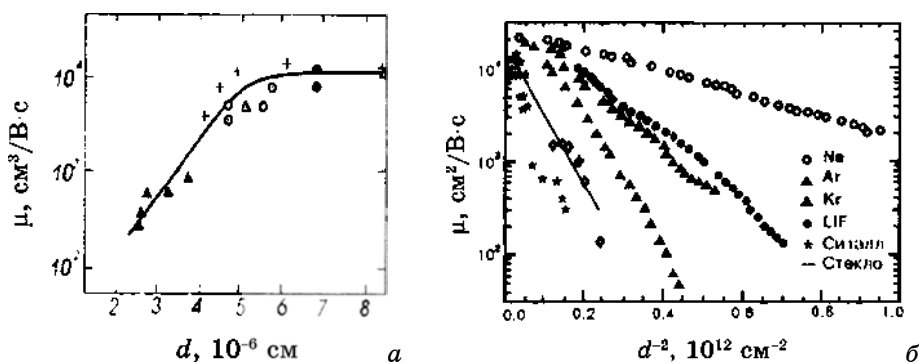
**Рис. 2.** Ячейка для исследования нанощероховатостей подложек: 1 — электроды, 2 — заземленный электрод, 3 — жидкий гелий, 4 — поверхностные электроны, 5 — нейлоновая нить, 6 — прижимающий электрод, 7 — охранный электрод.

водников через контактную систему 10. Контактная система 10 служит одновременно и демпфирующим устройством при перемещении подвижной катушки. При подаче на катушки питающего тока неподвижная катушка втягивает внутрь себя подвижную катушку, подтягивая вверх над гелием ячейку с образцом. См. также рис. 1, б.

В качестве тягового механизма могут быть применены элементы линейного двигателя, из работы [9]. Работа механизма основана на эффекте Мейснера, где внешнее магнитное поле соленоида взаимодействует с полем, наведенным в сверхпроводящем цилиндре. Измерительная система и расчет характеристик электронного транспорта аналогичны примененным в работе [7]. Для повышения чувствительности устройства могут быть использована квазиодномерная система поверхностных электронов. При этом исследуемая подложка в виде тонкой пластинки помещается на профилированную структуру, например, выполненную в виде ряда диэлектрических световодов.

Примеры зависимости подвижности поверхностных электронов от толщины гелиевой пленки для различных подложек из работ [10, 11] показаны на рис. 3.

В заключение следует отметить, что в данной работе приведена модель и устройство для оценки качества поверхности подложек на основе сканирования поверхностными электронами. Шероховатость поверхности образца существенно влияет на проводимость левитирующих электронов над пленкой сверхтекучего гелия на образце. По крутизне и характеру зависимости проводимости электронов от толщины пленки при фиксированной температуре определяется энергия термоактивации в случае активационного механизма проводимости путем сопоставления с теорией, рассмотренной в работе [6], и характерный размер шероховатости на поверхности. При этом можно идентифицировать размер нанощероховато-



**Рис. 3.** Зависимости транспорта левитирующих электронов от толщины пленки на подложках: (а) зависимость подвижности для ситалловой подложки, (б) зависимости подвижности электронов от  $d^{-2}$  для ряда подложек (включая данные из [5, 10, 11]).

стей от долей нанометра до  $10^2$  нм.

Предложена схема устройства для исследования наношероховатостей путем анализа изменений проводимости левитирующих электронов над пленкой с изменением ее толщины. Устройство представляет собой камеру для сверхтекучего гелия и измерительную ячейку с горизонтально расположенной над измерительными электродами подложкой, которые в вертикальном направлении перемещаются с помощью электромеханической тяги. Предложенное устройство позволяет оперативно программируемым образом варьировать толщину насыщенной пленки.

## 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. В. С. Эдельман, *УФН*, **130**: 675 (1980).
4. W. T. Sommer and D. J. Tanner, *Phys. Rev. Lett.*, **27**: 1346 (1971).
5. Ф. Ф. Менде, Ю. З. Ковдря, В. А. Николаенко, *ФНТ*, **11**: 646 (1985) (а); Р. Лейдерер, С. Назин, В. Шикин, *ФНТ*, **34**: 489 (2008) (б).
6. D. Coimbra, S. S. Sokolov, J-P. Rino, and N. Studart, *Phys. Rev. B*, **73**: 1 (2006).
7. А. В. Смородин, В. А. Николаенко, С. С. Соколов, *ФНТ*, **34**: 751 (2008).
8. E. Andrei, *Phys. Rev. Lett.*, **52**: 1449 (1984).
9. Sh.-C. Liu, G. Labbe, and G. G. Ihas, *J. Low Temp. Phys.*, **145**: 165 (2006).
10. K. Kono, U. Albrecht, and P. Leiderer, *J. Low Temp. Phys.*, **83**: 423 (1991).
11. J. Klier, I. Doicescu, P. Leiderer, and V. Shikin, *J. Low Temp. Phys.*, **150**: 212 (2008).
12. I. E. Dzyaloshinskii, E. M. Lifshitz, and L. P. Pitaevskii, *Adv. Phys.*, **10**: 165 (1961).
13. E. S. Sabiski and C. H. Anderson, *Phys. Rev.*, **A7**: 790 (1973).