Физика низких температур, 1995, т. 21, № 10, с. 1020–1022 УДК 532.132

Нелинейные особенности подвижности электронов в двумерном вигнеровском кристалле на поверхности жидкого гелия

В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, Ю. З. Ковдря, В. Н. Григорьев

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 29 мая 1995 г.

Проведены измерения подвижности двумерного электронного слоя на поверхности жидкого гелия в неупорядоченном и кристаллическом состояниях при концентрациях зарядов $6 \cdot 10^8$ и $1{,}3 \cdot 10^9$ см$^{-2}$. Исследования проводились при температурах 1,5–0,09 К на частоте 1,3 МГц. В области существования вигнеровского кристалла при больших ведущих полях обнаружено нелинейное поведение подвижности, зависящее от геометрии электронной системы.

Проведено вимірювання рухомості двовимірного електронного шару на поверхні рідкого гелію у неупорядкованому та кристаличному станах при концентраціях зарядів $6 \cdot 10^8$ та $1{,}3 \cdot 10^9$ см$^{-2}$. Дослідження проведено при температурах 1,5–0,09 К на частоті 1,3 МГц. В області існування вігнерівського кристалу при великих ведучих полях знайдено нелінійну поведінку рухомості, що залежить від геометрії електронної системи.

При достаточно низких температурах поверхностные электроны (ПЭ) над жидким гелием могут упорядочиваться в периодическую структуру — вигнеровский кристалл. Сопровождающая образование кристалла локализация электронов приводит к деформации поверхности гелия, а следовательно, к изменению характера электрон-риплонного взаимодействия и кинетических свойств ПЭ, в частности их подвижности при температурах ниже 0,8 К, когда кинетические свойства ПЭ определяются в основном их рассеянием на длинноволновых риплонах. Теоретические и экспериментальные исследования свойств ПЭ как в неупорядоченной фазе, так и в двумерном вигнеровском кристалле, дают информацию о диссипативных процессах на поверхности жидкого гелия и поэтому представляют большой интерес [1]. Особый интерес вызывают исследования при температурах и концентрациях зарядов, перекрывающих области жидкой и кристаллической фаз. Подвижность ПЭ при переходе электронная жидкость—вигнеровский кристалл изучалась в экспериментальных работах [2,3]. Кристаллизация ПЭ приводила к скачкообразному уменьшению подвижности, величина которого зависела от концентрации электронов. В [2] подвижность ПЭ μ измерялась с использованием экспериментальных ячеек прямоугольной геометрии при напряжении на ведущем электроде V_g = 3–30 мВ. При этом величина μ в указанной области напряжений не зависела от V_g. В работе [4] изучалось плавление вигнеровского кристалла при больших ведущих полях в магнитном поле. Наблюдался фазовый переход в электронном кристалле, причем соответствующее переходу критическое магнитное поле зависело, в частности, от амплитуды ведущего поля. Авторы связывали наблюдаемый эффект со сдвиговыми деформациями вигнеровского кристалла. Экспериментальное [5] и теоретическое [6] изучение подвижности ПЭ в больших дрейфовых полях показало, что при увеличении ведущего электрического поля и связанного с этим перегрева электронной системы подвижность ПЭ возрастает. Однако в кристаллической фазе данные о поведении подвижности ПЭ в больших дрейфовых полях отсутствуют.

В настоящей работе измерялась подвижность электронов над жидким гелием в кристаллической фазе до температур 90 мК при концентрации электронов $6 \cdot 10^8$ и $1{,}3 \cdot 10^9$ см$^{-2}$ и напряжениях на ведущем электроде вплоть до 0,6 В. Измерялся сдвиг фазы тока, прошедшего через заряженную электронами измерительную ячейку круговой геометрии. Поверхность жидкого гелия располагалась между двумя электродами диаметром 27 мм, окруженными охранным кольцом. Верхний электрод состоял из диска и двух колец с зазорами между ними 0,2 мм. Переменное напряжение V_g от генератора подавалось на внешнее кольцо, сигнал снимался с диска. Промежуточное кольцо было заземлено. Нижний электрод, на который подавался положительный потенциал для удержания электронов, состоял из трех одинаковых секторов с зазором между ними 0,2 мм. На каждый сектор независимо от других мог подаваться прижимающий потенциал. Такая конструкция оказалась очень удобной для юстировки ячейки в горизонтальной плоскости. При юстировке измеряли напряжения пробоя на каждом из секторов при малом уровне гелия над электродом и добивались выравнивания величины этих напряжений изменением наклона всей установки. Различие в высоте уровня жидкости над прижимающим электродом составляло после юстировки до 30 мкм.

Измерения проводились на частоте 1,3 МГц. Выходной сигнал усиливался находящимся при комнатной температуре предусилителем и поступал на измеритель разности фаз. Ячейка находилась в тепловом контакте с камерой растворения рефрижератора с адсорбционно-конденсационной откачкой [7]. В эксперименте поверхность гелия заряжалась при температуре 1,5 К до плотности насыщения электронного слоя, соответствующей приложенному прижимающему полю. В опытах проводились измерения сдвига фазы сигнала, связанного с зарядкой поверхности жидкого гелия электронами. Эти данные с использованием для нормировки данных о подвижности ПЭ вблизи температуры плавления вигнеровского кристалла [2] позволяли определить подвижность ПЭ для всех использованных температур и прижимающих электрических полей E_{hold}.

На рис. 1 приведены температурные зависимости нормированного сдвига фазы $\Delta\varphi$ для концентрации электронов $n_s = 1{,}3\cdot 10^9$ см$^{-2}$ при различных напряжениях V_g, подаваемых на ведущий электрод. При малых значениях V_g данные, полученные в настоящей работе, находятся в хорошем согласии с результатами работ [2,8]. При малом ведущем поле (с амплитудой подаваемого на ячейку сигнала 19 мВ) при температуре 0,75–0,8 К наблюдается скачок подвижности, который мы, аналогично работе [2], интерпретируем как появление вигнеровского кристалла. Концентрация ПЭ $n_s = 1{,}3\cdot 10^9$ см$^{-2}$, которая следует из диаграммы состояний жидкость — кристалл [9], согласуется с оценкой, полученной из соотношения $E_{\text{hold}} = 2\pi e n_e$. Подвижность вигнеровского кристалла при малом ведущем поле в пределах погрешности наших измерений не зависит от температуры. При значении ведущего поля, соответствующего амплитуде подаваемого сигнала 60 мВ, зависимость $\Delta\varphi$ от температуры при $T > 0{,}4$ К совпадает с аналогичной зависимостью при 19 мВ, однако при $T < 0{,}4$ К подвижность начинает отклоняться от значений при малом ведущем поле. При еще больших значениях ведущего поля, соответствующих амплитудам сигнала 100 и 210 мВ, переход в состояние вигнеровского кристалла сопровождается резким возрастанием $\Delta\varphi$. В области малых ведущих полей величина $\Delta\varphi$ при ее малых значениях прямо пропорциональна μ^{-1} [10], однако при больших значениях V_g и ведущего электрического поля, когда в системе ПЭ значительную роль играют нелинейные эффекты, интерпретация поведения $\Delta\varphi$ может носить более сложный характер, зависящий от природы процессов, происходящих в электронном кристалле. Измерения подвижности ПЭ в области жидкого состояния вблизи перехода в кристалл показали слабое увеличение подвижности с увеличением ведущего поля, что находится в качественном соответствии с теоретическими представлениями [6].

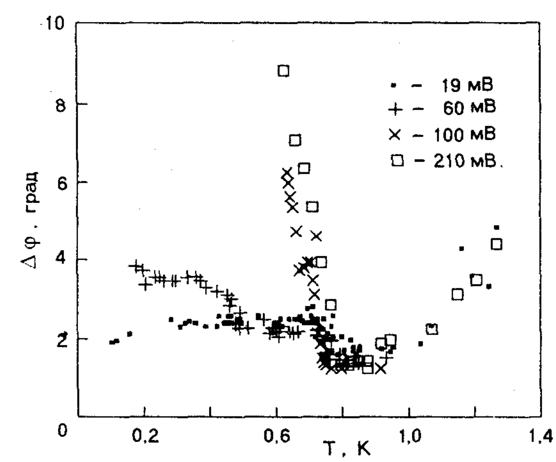

Рис. 1. Температурная зависимость сдвига фазы сигнала при различных напряжениях, подаваемых на ведущий электрод. Концентрация поверхностных электронов $1{,}3\cdot 10^9$ см$^{-2}$.

На рис. 2 приведена снятая при низкой температуре (90 мК) зависимость сдвига фазы сигнала в области электронного кристалла от ведущего поля, точнее от пропорциональной ведущему полю амплитуды подаваемого сигнала. Концентрация ПЭ при этих измерениях составляла $6\cdot 10^8$ см$^{-2}$ (переход в кристалл происходил при температуре 0,58 К). При малых ведущих полях $\Delta\varphi$ не зависит от поля, однако при увеличении ведущего поля значение $\Delta\varphi$ резко увеличивается, достигает максимума и понижается при дальнейшем увеличении поля до значений, близких к характерным для жидкости вблизи перехода в кристалл. Конструкция ячейки позволила легко изменить геометрию электронного пятна. После измерений в круговой геометрии (рис. 2, кривая *а*) один из секторов прижимающего электрода был заземлен, что привело

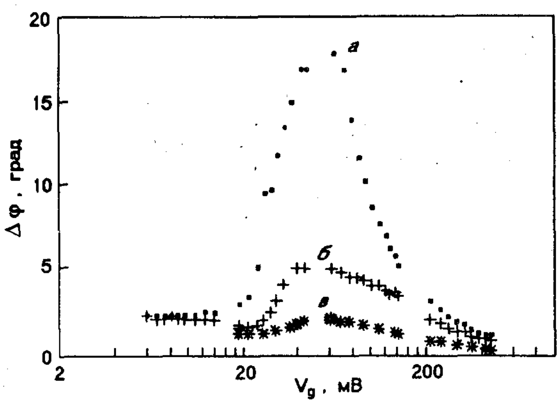

Рис. 2. Зависимость сдвига фазы сигнала от его амплитуды в области электронного кристалла при $T = 90$ мК и концентрации $6\cdot10^9$ см$^{-2}$ при расположении ПЭ над всем прижимающим электродом (*а*); над двумя секторами (*б*) и над одним сектором (*в*).

к изменению формы электронного пятна. Зависимость сдвига фазы от ведущего поля резко уменьшилась (рис. 2, кривая *б*). Заземление двух секторов еще более подавило эту зависимость (рис. 2, кривая *в*). Кривые на рис. 2 снимались как при увеличении, так и при уменьшении ведущего поля, при этом гистерезисные явления не отмечены. При отеплении ячейки с электронным пятном над одним сектором переход кристалл—жидкость был зафиксирован при той же температуре, что и переход жидкость—кристалл при охлаждении с круглым электронным пятном, что свидетельствовало о неизменности концентрации ПЭ в процессе измерений.

Нелинейный характер поведения электронного кристалла при больших ведущих полях в магнитном поле наблюдался в работе [11]. Авторы связывали наблюдаемые эффекты с возможным проскальзыванием электронного кристалла по отношению к лункам на поверхности гелия в скрещенных полях. Данные настоящей работы указывают на то, что необычные нелинейные эффекты проявляются в электронном кристалле и в отсутствие магнитного поля. По-видимому, существенную роль при этом играет геометрия ячейки.

Обнаруженные в настоящей работе нелинейные эффекты могут быть обусловлены несколькими причинами. Прежде всего, важную роль в этих процессах может играть пластическое течение кристалла, развивающееся при больших ведущих полях. Исследование пластичности вигнеровского кристалла представляет существенный интерес. Оценки показывают, что скорости электронов при использованных дрейфовых полях превышают скорость звука как в жидком гелии, так и в электронном кристалле Это может, по-видимому, привести к возбуждению электронами фононов в кристалле и гелии, что также должно сказываться на подвижности электронов. Не исключено также, что происходит возбуждение демультипликационных стоячих плазменных волн, которое должно иметь место в больших дрейфовых полях [12]. В этой связи представляют интерес дополнительные эксперименты, в частности, по изучению как активной, так и реактивной части комплексной проводимости электронного кристалла при различных частотах и амплитудах ведущего поля.

Работа частично финансировалась грантом UG199, предоставленным Американским физическим обществом.

1. В. Б. Шикин, Ю. П. Монарха, *Двумерные заряженные системы в гелии*, Наука, Москва, (1989).
2. R. Mehrotra, G. J. Guo, Y. Z. Ruan, D. B. Mast, and A. J. Dahm, *Phys. Rev.* B29, 5239 (1984).
3. R. Mehrotra, B. M. Guenin, and A. J. Dahm, *Phys. Rev. Lett.* 48, 641 (1982).
4. I. Wilen and R. Giannetta, *Jpn. J. Appl. Phys.* 26, Suppl. 26–3, 2105 (1987).
5. Б. Н. Есельсон, А. С. Рыбалко, Ю. З. Ковдря, *ФНТ* 5, 1354 (1979).
6. Ю. П. Монарха, *ФНТ* 5, 994 (1979).
7. В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, Л. А. Погорелов, В. И. Соболев, *ФНТ* 9, 444 (1993).
8. Yasuhiro Iye, *J. Low Temp. Phys.* 40, 441 (1980).
9. C. C. Grimes and G. Adams, *Phys. Rev. Lett.* 42, 795 (1979)
10. R. Mehrotra and A. J. Dahm, *J. Low Temp. Phys.* 67, 115 (1987).
11. K. Shirahama and K. Kono, *Techn. Rep. ISSP*, ser. A, N 2852 (1994).
12. Ю. П. Монарха, *ФНТ* 6, 685 (1980).

Non-linear features of electron mobility in 2*D* Wigner crystal over liquid helium

V. E. Sivokon', V. V. Dotsenko,
Yu. Z. Kovdrya, and V. N. Grigor'ev

The mobility of 2*D* electron system over liquid helium is measured in non-ordered and crystal states at electron concentrations of $6\cdot10^8$ and $1.3\cdot10^9$ см$^{-2}$, frequency 1.3 MHz and in the temperature range 1.5–0.09 K. In the Wigner crystal at high leading fields the non-linear mobility behavior was observed, which depends on the geometry of the electron system.