

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
імені Б. І. Веркіна

На правах рукопису

Сивокінь Віталій Юхимович

НЕЛІНІЙНІ ТА РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА У СИСТЕМІ ПОВЕРХНЕВИХ
ЕЛЕКТРОНІВ НАД РІДКИМ ГЕЛІЄМ

(01.04.09. - фізика низьких температур)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 1996

36.48

№. 36.443

Дисертація в рукопис
Роботу виконано у Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б.І.Веркіна

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00760758 (X)

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук
професор В.М.Григор'єв
доктор фізико-математичних наук
Ю.З.Ковдра

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
С.І.Шевченко
кандидат фізико-математичних наук
старший науковий співробітник
Л.В.Карнацевич

Провідна організація: Харківський державний університет

Захист відбудеться " 14 " січня 1997 року о 15 годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 02.35.02 при Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б.І.Веркіна НАН України (310164, м. Харків - 164, пр. Леніна 47).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б.І.Веркіна НАН України (310164, м. Харків - 164, пр. Леніна 47).

Автореферат розіслано " 13 " грудня 1996 р.

Відгуки на автореферат у двох екземплярах з підписом, що завіреним гербовою печаткою, просимо направляти за адресою: 310164, м. Харків - 164, пр. Леніна 47, ФТІНТ НАН України, вченому секретарю Спеціалізованої вченої ради Д 02.35.02.

Вчений секретар Спеціалізованої вченої ради
доктор фізико-математичних наук

О.С.Ковальов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність досліджень, які є метов дисертації, має два аспекти. Перший зв'язаний з суто експериментальною проблематиком. Розробка та створення рефрижератора розчинення за оригінальною схемою и такого, що має низку переваг у порівнянні з існуючими конструкціями, має неабиякий інтерес у зв'язку з поширванням досліджень при наднизьких температурах. Другий аспект торкається досліджень електронної системи на поверхні рідкого гелію. Актуальність досліджень нелінійної рухомості у неупорядкованій електронній системі обумовлена можливістю отримання інформації щодо короткохвильової ділянки риплонного спектру та кінетичних явищ на поверхні надплинної рідини. Вивчення електронно-риплонних резонансів у вігнеровському кристалі має інтерес, бо такі резонанси можуть бути ефективним засобом вивчення кінетичних явищ на поверхні квантових рідин, експериментальних даних про які надто мало. І нарешті, дослідження нелінійної поведінки двовимірної електронної системи у температурному інтервалі, що перекриває ділянки існування неупорядкованої та кристалічної фаз, може дати інформацію про характер фазового переходу і про особливості деформації та руйнування вігнеровського кристалу.

Мета дисертації - дослідити нелінійні та резонансні явища в системі поверхневих електронів над рідким гелієм, зокрема при наднизьких температурах.

Для цього було вирішено такі проблеми:

1. Розроблено, виготовлено, залушено рефрижератор розчинення оригінальної конструкції з низькотемпературним циклом циркуляції ^3He та експериментально досліджено його характеристики.
2. Експериментально досліджено нелінійну рухомість неупорядкованої електронної системи в умовах її перегріву.
3. Експериментально досліджено нелінійну поведінку електронної системи у температурному інтервалі, що

перекриває ділянки існування неупорядкованої та кристалічної фаз. Досліджено нелінійну поведінку вігнеровського кристалу при наднизьких температурах.

4. Експериментально досліджені електрон-риплонні резонанси у вігнеровському кристалі у широкому температурному інтервалі.

Щодо наукової новизни отриманих результатів, треба підкреслити, що розроблений та побудований у рамках цієї роботи рефрижератор розчинення є оригінальним і його захищено авторським свідоцтвом. Дослідження нелінійної рухомості неупорядкованої електронної системи в умовах великих притискувчих полів проведено уперше і уперше за допомогою системи поверхневих електронів вдалося отримати експериментальну інформацію щодо спектру риплонів у короткохвильовій ділянці. Вимірювання частот зв'язаних електрон-риплонних резонансів проведено у широкій температурній області, у тому числі при температурах, де раніш таких вимірювань не було. Крім того, вивчення зв'язаних електрон-риплонних резонансів було проведено за умов добре контрольованої лінійності відгуку, що дозволило отримати надійні результати і показати застосовність існуючих теоретичних уяв для кількісного їх опису.

Наукові результати та положення, що виносяться на захист:

1. Конструкція рефрижератора розчинення з криогенним циклом циркуляції ^3He та результати дослідження його роботи.
2. Експериментальне дослідження нелінійної рухомості поверхневих електронів у неупорядкованій фазі.
3. Висновок про те, що спектр риплонів у короткохвильовій ділянці співпадає з його довгохвильовою асимптотикою.
4. Експериментальне дослідження нелінійної поведінки вігнеровського кристалу при наднизьких температурах.
5. Експериментальне дослідження зв'язаних електрон-риплонних резонансів у вігнеровському кристалі у широкій температурній ділянці.

Наукова та практична цінність роботи:

Розроблений у роботі рефрижератор розчинення може бути

корисним у багатьох галузях фізики низьких температур. Отримані нові експериментальні дані щодо нелінійної поведінки поверхневих електронів над рідким гелієм мають служити удосконаленню наших знань про двовимірні системи, зокрема про двовимірну електронну систему з кулоновської взаємодії.

Апробація роботи.

Результати роботи доповідались на:

- IV Республіканському семінарі з фізики та техніки низьких температур, Донецьк, 1989 р.
- XXI Обласній науково-технічній конференції молодих дослідників, ФТІНТ НАН України, Харків, 1990 р.
- 3-му Радянсько-західнонімецькому семінарі по теплообміну, Харків, 1990 р.
- Міжнародній конференції ICES-14, Київ, 1992 р.
- Симпозіуми по квантовим рідинам та кристалам, Ітака (США), 1995 р.
- Міжнародній конференції LT-21, Прага (Чеська республіка), 1996 р.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці більшості вузлів та елементів рефрижератора розчинення, виготовленні, іспитах і проведенні експериментального дослідження його роботи, а також проведенні експериментальних досліджень електронної системи на поверхні рідкого гелію, обробці експериментальних результатів (з використанням ЕОМ) і проведенні розрахунків, необхідних для порівняння отриманих результатів з існуючими теоріями.

Обсяг та структура роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, закінчення і списку літератури з 105 найменувань. Повний обсяг роботи складає 143 сторінки, у тому числі 26 малюнків і 1 таблиця.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

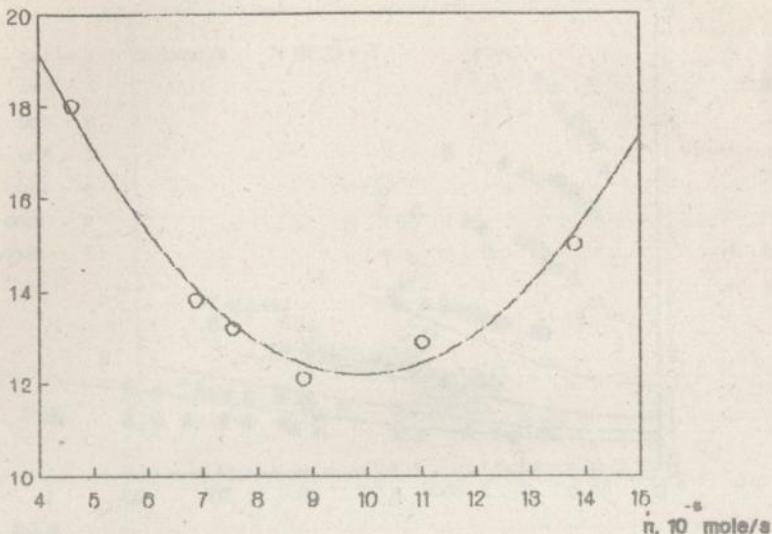
Вступ містить обговорення актуальності проблеми та наукової новизни. Обговорюється також мета роботи та

положення, які виносяться на захист. У Вступі йдеться також про наукові праці, у яких опубліковано основні результати дисертації та про апробацію цих результатів.

Глава 1 має вступний характер. Виходячи з того, що є низка обзорів [1-3], де досить повно описано властивості поверхневих електронів, у тому числі і вігнеровського кристалу, було доцільним викласти в ній загальні результати, що мають відношення до теми дисертації, а при обговоренні оригінальних експериментальних результатів сконцентруватися на конкретних питаннях, що безпосередньо торкаються проблеми, що досліджується.

Глава 2 присвячена проблемам розробки та створення установки для дослідження системи поверхневих електронів в умовах низьких та наднизьких температур. В ній описано розроблений у роботі рефрижератор розчинення оригінальної конструкції. Суттєвою особливістю цього рефрижератора є засіб реалізації безперервного режиму циркуляції ^3He . Основна ідея конструкції міститься у використанні двох конденсаційних насосів, кожен з яких може незалежно охолоджуватись рефрижератором з адсорбційною відкачкою ^3He . Конденсаційні насоси з'єднані лініями відкачки з камерою випарвання, а лініями повертання через теплообмінники з камерою розчинення. Низькотемпературна частка (камери випарвання і розчинення та теплообмінники) в принципі такі ж самі, як у традиційних рефрижераторах [4], хоча й мають деякі особливості. Принцип роботи рефрижератора досить простий. Якщо конденсаційний насос охолоджується, пари ^3He відкачуються з камери випарвання, конденсуються на холодній поверхні, а рідкий ^3He стікає в камеру розчинення; таким чином відбувається циркуляція ^3He . Якщо адсорбційний насос вичерпав свій ресурс і регенерується, то ^3He , що виділився, поступає при температурі близько 1,5 K в охолоджувачу ванну ^3He . Конденсаційний насос відігрівається і перестає відкачувати ^3He з камери випарвання і, таким чином, виключається з контуру циркуляції. У главі аналізуються дані експериментального дослідження роботи рефрижератора. На малюнку 1 зображена залежність температури у камері розчинення від циркуляції при використанні у рефрижераторі системи теплообмінників, що складається з безперервних та

T, mK

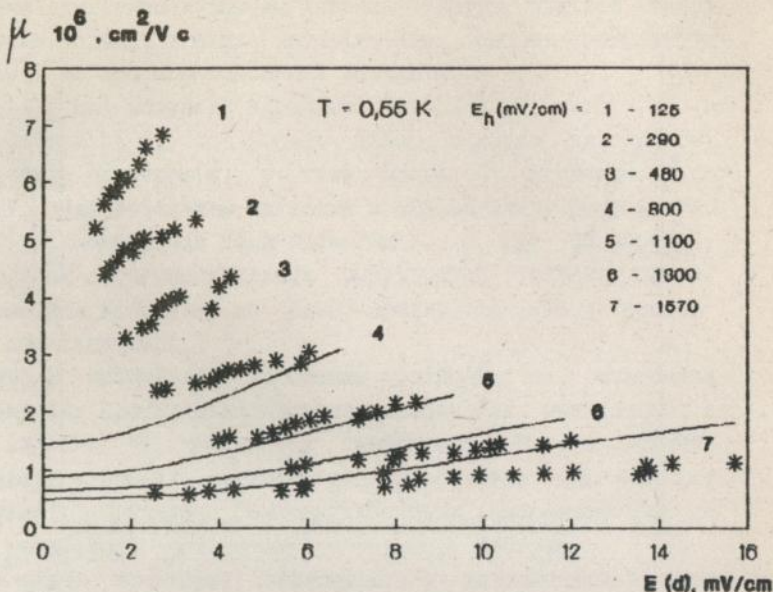


Мал. 1

дискретних теплообмінників. Мінімальна отримана температура було близько 12 мК при швидкості циркуляції 100 мкмолей за секунду.

У главі також описано і докладно проаналізовано експериментальну ячейку для вимірювань характеристик електронного шару по поверхні рідкого гелію та вимірвальну схему, наведено формули для розрахунків, що базуються на точному рішенні рівнянь Максвелла.

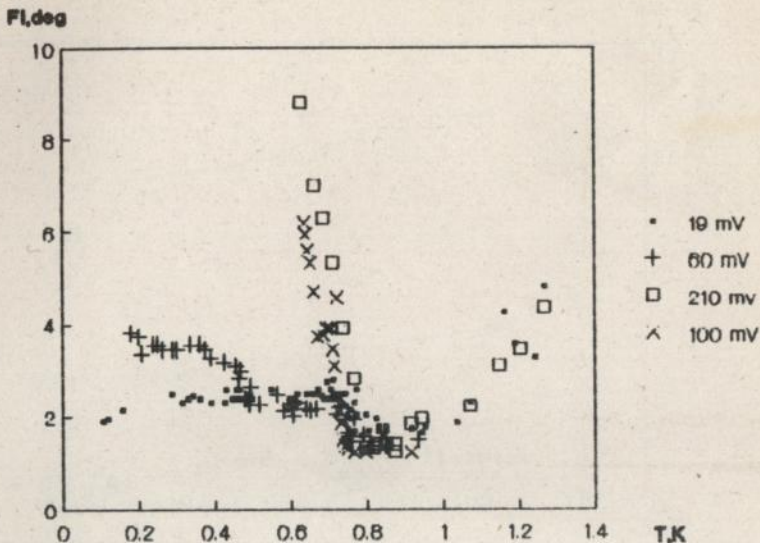
У главі 3 обговорюються результати досліджень рухомості неупорядкованої електронної системи в умовах її перегріву. Якщо ефективна електронна температура досить велика, основну роль в енергетичній релаксації починають грати двофрілонні процеси, у яких беруть участь короткохвильові риплони. Вивчаючи нелінійну рухомість електронів на основному енергетичному рівні, можна визначити ефективну електронну температуру, перевірити теоретичні уяви про релаксаційні процеси в електрон-риплонній системі та зробити висновки щодо короткохвильової ділянки риплонного спектру. На малюнку



Мал. 2

2 приведено експериментальні дані про рухомість електронів в залежності від ведучого поля при різних значеннях притискувочого поля. Дані порівнюються з розрахунками на базі існуючої теорії [5] у припущенні, що короткохвильова ділянка риплонного спектру має такий же функціональний вид, що і його довгохвильова асимптотика. Як видно, кореляція між теорією та експериментом досить добра, що свідчить про те, що двохранлонні процеси, в яких народжуються короткохвильові риплони, дійсно відіграють важливу роль у процесах енергетичної релаксації електронної системи, а припущення щодо спектру короткохвильових риплонів добре обґрунтовані.

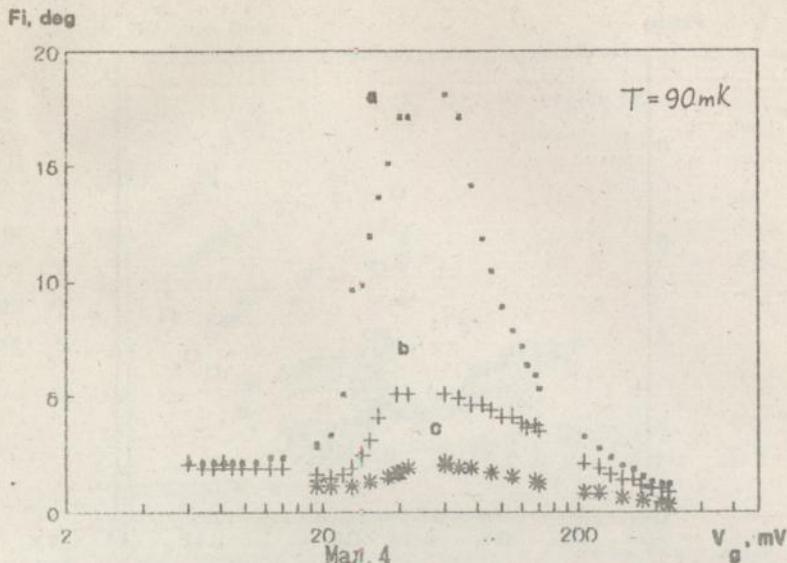
У главі 4 описані результати експериментального дослідження електронної системи на поверхні рідкого гелію в ділянці температур, що включає в себе температуру плавлення вігнеровського кристалу в умовах нелінійного впливу на систему та нелінійну поведінку вігнеровського кристалу при наднизьких температурах. Характер фазового переходу неупорядкована система-вігнеровський кристал добре видно на 8



Мал. 3

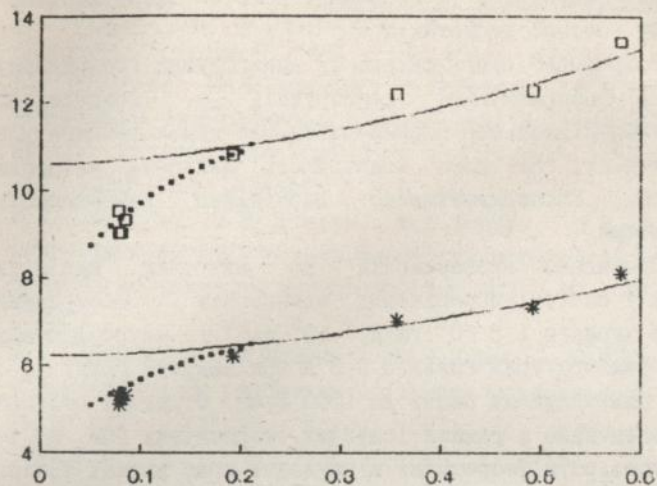
малюнку 3. При малих рівнях сигналу спостерігається стрибок фази при кристалізації і приблизна незалежність фази від температури у кристалічній фазі. Але якщо ведуче поле збільшується, характер поведінки фази сигналу при кристалізації змінюється. На малюнку 4 приведено дані, щодо поведінки електронного кристалу при наднизьких температурах. Залежність фази від ведучого поля має немонотонний характер. Дані мають попередній характер. Поки що немає теоретичних моделей щодо спостерігаємих явищ. Можливо, що поведінка, що ми бачимо, пов'язана зі збудженням нелінійного резонансу та плавленням електронного кристалу, але проблема потребує додаткових досліджень.

У главі 5 аналізуються результати експериментального дослідження зв'язаних електрон-риплонних резонансів у вігнеровському кристалі у широкій ділянці температур (70 - 600 мК). Уперше такі резонанси спостерігались у експериментах Граймса і Адамса [6], де уперше було продемонстровано наявність вігнеровського кристалу. Експериментальних даних



щодо електрон-риплонних резонансів було мало, експериментальні дані [7] значно відрізнялись від теоретичних оцінок [8]. У роботі виміряно частоти і ширини зв'язаних резонансів у широкому температурному інтервалі та за умов контрольованої лінійності відгуку. Результати приведено на малюнку 5 у вигляді температурної залежності частот двох гармонік зв'язаних коливань. Лініями показано результати теоретичних розрахунків [9]. Як видно, теорія кількісно описує експериментальні дані, за винятком вимірювань при найнижчих температурах. Відхилення можна пояснити впливом домішок ^3He у природному ^4He , які змінюють коефіцієнт поверхневого натягу рідини. Якщо прийняти цей факт до уваги, співпадіння теоретичних та експериментальних даних стає добрим у всьому інтервалі температур. На малюнку 6 приведено температурну залежність ширини резонансів. Ширина резонансу залежить від кінетичних явищ на поверхні надплинної рідини, але характер такої залежності не дуже зрозумілий і потребує додаткових досліджень, у першу чергу

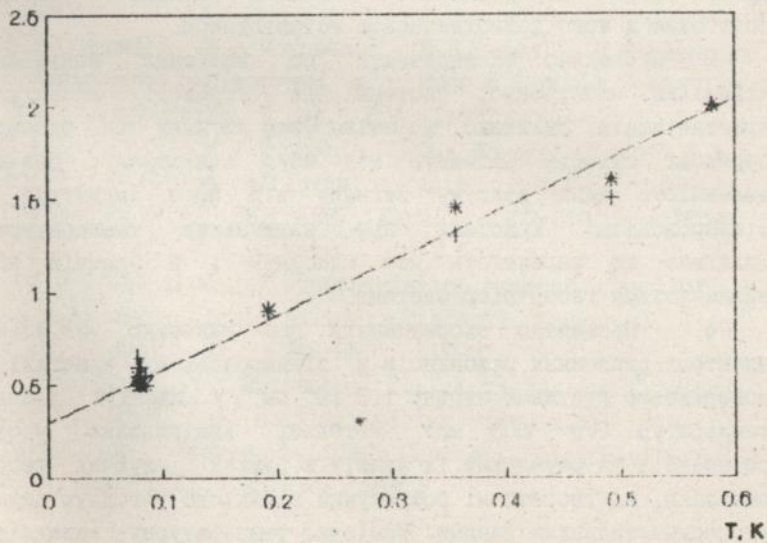
f, MHz



T, K

Мал. 5

dlt F, MHz



T, K

Мал. 6

теоретичних.

Основні результати та висновки роботи сформульовано у заключному розділі дисертації.

1. Розроблено, виготовлено і налагоджено рефрижератор розчинення оригінальної конструкції з конденсаційно-адсорбційнов відкачков. Рефрижератор має низькотемпературний цикл циркуляції ^3He . Його конструкцію захищена авторським свідоцтвом. Експериментально досліджено характеристики рефрижератора.

2. Проведено експерименти по вивченню нелінійної рухомості у системі поверхневих електронів з поверхневими густинами зарядів $1,3 \cdot 10^8$ та $2,7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ у неупорядкованій фазі при температурах близько 0,5 K при ведучих полях до 20 мВ/см та притискувачих полях до 1500 В/см. Отримані результати проаналізовано у рамках існуючих теоретичних уяв, що дозволило перевірити теоретичні міркування щодо впливу двофазних процесів на поверхні надплинної рідини на енергетичну релаксацію електронів і зробити висновок про те, що функціональна форма короткохвильової ділянки риплонного спектру співпадає з його довгохвильовою асимптотикою.

3. Проведено експерименти по вивченню нелінійної поведінки електронної системи при переході плавління-кристалізація. Знайдено, що зміна фази сигналу при фазовому переході суттєво залежить від його амплитуди. Вивчена залежність фази відгуку сигналу від його амплитуди у вігнеровському кристалі при наднизьких температурах. Знайдемо, що залежність має максимум і в значній мірі визначається геометрією системи.

4. Проведено експерименти по вивченню зв'язаних електрон-риплонних резонансів у вігнеровському кристалі з поверхневою густиною заряду $1,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ у широкій ділянці температур (70 - 600 мК). Ретельні вимірювання частот резонансів та ретельний їх аналіз в рамках існуючих теорій показали, що теоретичні розрахунки кількісно узгоджуються з експериментальними даними. Виміряно температурну залежність ширини резонансів, що дає підстави для використання таких резонансів для вивчення кінетичних явищ на поверхні надплинної рідини.

Основні результати дисертації викладено у роботах:

1. В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, Л. А. Погорелов, В. И. Соболев Особенности работы рефрижератора растворения с конденсационной откачкой, ФНТ, 19, 4, 444-449 (1993).
2. В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, Ю. З. Ковдря, В. Н. Григорьев, Нелинейные особенности в электронной подвижности в двумерном вигнеровском кристалле над жидким гелием, ФНТ, 21, 1020-1022 (1995).
3. В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, Ю. З. Ковдря, В. Н. Григорьев, Нелинейные явления в подвижности двумерного электронного слоя на поверхности жидкого гелия, ФНТ, 22, N7, 715-723 (1996).
4. В. Е. Сивоконь, В. В. Доценко, Ю. З. Ковдря, В. Н. Григорьев, Фонон-риплонные резонансы в двумерном электронном кристалле над жидким гелием, ФНТ, 22, N10, 1107-1112 (1996).
5. V. I. Sobolev, V. E. Sivokon', L. A. Pogorelov, V. N. Repin and V. V. Dotsenko Heat transfer at condensation pumping of the ^3He in dilution refrigerator, ФНТ, 16, 5, 564- 567 (1990).
6. В. И. Соболев, Л. А. Погорелов, В. Н. Репин, В. Е. Сивоконь Рефрижератор растворения а.с. СССР N 1290817, 1985 г. Булл. изобретений N 44, 264 (1987).
7. V. E. Sivokon', V. V. Dotsenko, L. A. Pogorelov and V. I. Sobolev, Dilution refrigerator with cryogenic pumping, Cryogenics, v. 32, ICEC Suppl., 209-210 (1992).
8. V. E. Sivokon', V. V. Dotsenko, Yu. Z. Kovdrya and V. N. Griгор'ev, The study of phonon-rippion resonances in Wigner crystal over liquid helium, Czechosl. Journ. of Phys. v. 46, Suppl. S1, 349-350 (1996).
9. V. E. Sivokon', V. V. Dotsenko, Yu. Z. Kovdrya and V. N. Griгор'ev, Non-linear mobility of two-dimensional electron layer over liquid helium, Czechosl. Journ. of Phys. v. 46, Suppl. S1, 351-352 (1996).

Цитована література

1. В. Б. Шикин, Ю. П. Монарха, Двумерные заряженные системы в гелии. Москва, Наука (1989).
2. В. С. Эдельман. УФН, т. 130, N 4, 675-705 (1980).

3. Ю. П. Монарха, В. Б. Шикин, ФНТ, т. 8, N 6, 563-593 (1982).
4. О. В. Лоунасмаа, Принципы и методы получения температур ниже 1 К, Москва, Мир (1977).
5. Ю. П. Монарха, ФНТ, т. 5, N 9, 994-1014 (1979).
6. С. С. Grimes, G. Adams, Phys. Rev. Lett., 42, N 12, 795-798 (1979).
7. К. Коно, J. Phys. Soc. Japan, N 3, 1111-1122 (1987).
8. Н. Намаизава, Solid St. Commun, 34, N 7, 607-610 (1980).
9. Ю. П. Монарха, В. Б. Шикин, ФНТ, т. 9, N 9, 913-917 (1983).

Sivokon' V.E. Non-linear and resonant phenomena in a surface electron system over liquid helium.

The thesis for taking a Candidate degree of science (physics and mathematics) speciality 01.04.09. - low temperature physics, B.I.Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS, Kharkov, Ukraine, 1996.

The 8 scientific papers and 1 authors certificate are defended, which contain investigation of important problems in a range of two-dimensional electron systems. Mobility of surface electrons in overheating regime, behavior of the electron system at Wigner crystallization, non-linear mobility peculiarities of the Wigner crystal at superlow temperatures and characteristics electron-ripplon resonances are studied. Besides, a dilution refrigerator with cryogenic circulation is developed.

Key words: helium, dilution refrigerator, two-dimensional system, electron crystal, non-linearity, resonance.

Сивоконь В.Е. Нелинейные и резонансные явления в системе поверхностных электронов над жидким гелием.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.09. - физика низких температур, Физико-технический институт низких температур им. Б.И.Веркина НАН Украины, Харьков, 1996.

Защищается 8 научных работ и 1 авторское свидетельство, которые содержат исследование актуальных проблем в области двумерных электронных систем. Исследуется подвижность поверхностных электронов в условиях их сильного перегрева, поведение электронной системы при вигнеровской кристаллизации, нелинейные особенности подвижности вигнеровского кристалла при сверхнизких температурах и характеристики электрон-риплонных резонансов. Разработан также рефрижератор растворения с криогенной циркуляцией.

Ключові слова: гелій, рефрижератор розчинення, двовимірна система, електронний кристал, нелінійність, резонанс,

43296

Відповідальний за випуск - канд. фіз.-мат. наук Зуєв Н. В.

Підписано до друку 21.11.1996 р.,
фіз. др. ар. 1, обл. вид. ар., замовлення N 24, тираж 100 прим.

Ротапрінт ФТІНТ НАН України, 310164, Харків, пр. Леніна, 47