

**І.П. Жарков, В.В. Сафронов, С.П. Паламарчук,
О.С. Пилипчук, А.Г. Солонецький, В.О. Ходунов**

Інститут фізики НАН України, Київ

КОМПЛЕКС КРІОАПАРАТУРИ З ВБУДОВАНИМ НАДПРОВІДНИМ СОЛЕНІДОМ ДЛЯ МАГНІТОФІЗИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



Створено комплекс криогенної апаратури на базі терморегульованого гелієвого кріостата з вбудованим надпровідним соленоїдом для дослідження гальваномагнітних явищ у низькорозмірних системах. Комплекс забезпечує регулювання температури досліджуваного зразка в діапазонах 1,6–4,2; 4,2–80; 80–300 К та її стабілізацію з точністю не більше 0,1 К у магнітному полі до 7,84 Тл.

Ключові слова: криосистема, гелій, терморегуляція, стабільність температури, надпровідний соленоїд.

При створенні та використанні різних функціональних пристроїв електроніки і оптоелектроніки (генераторів НВЧ, приймачів та випромінювачів ГЧ-діапазонів) на основі структур з квантовими ямами (КЯ) розуміння фізичних параметрів, від яких залежать процеси переносу носіїв заряду у таких системах, є важливим. Дослідження гальваномагнітних явищ у широких діапазонах температур, електричних та магнітних полів є одним із методів вивчення властивостей структур з КЯ. Насамперед, це температурні дослідження коефіцієнта Холла та питомого опору, дослідження магнітоопору та осциляцій Шубнікова–де-Гааза (далі ШдГ) та квантового ефекту Холла при фіксованій температурі. Діапазон температур, в якому проявляються квантово-розмірні ефекти, відповідає області нижче 20–70 К. У переважній більшості випадків дослідження проводять у діапазоні температур 4,2–1,2 К, що досягається відкачкою парів рідкого гелію. Діапазон магнітних по-

лів для ефективного дослідження магнітоопору і осциляцій ШдГ є не менше 5 Тл.

Для дослідження кутових залежностей (кут між напрямком магнітного поля і електричного струму через зразок) магнітоопору створено механізм повороту зразка відносно повздовжньої осі в процесі вимірів. Для систем з КЯ важливим фактором є можливість дослідження процесів, пов'язаних з розігрівом електронів у КЯ прикладеним електричним полем. З цією метою маніпулятор (тримач) разом зі звичайними підводящими проводами має коаксіальні вводи для досліджень у сильних імпульсних латеральних електричних полях. Для запобігання джоулевого перегріву зразків сильне електричне поле подається на зразок в імпульсному режимі з тривалістю імпульсів порядку мкс. Оптичні вводи в терагерцевому діапазоні частот можуть бути реалізовані по світловодах у вигляді пустотінних відполірованих трубок. Для роботи з надпровідним магнітом створено кероване джерело з можливістю як плавної розгортки у всьому діапазоні, так і зупинки в заданій точці.

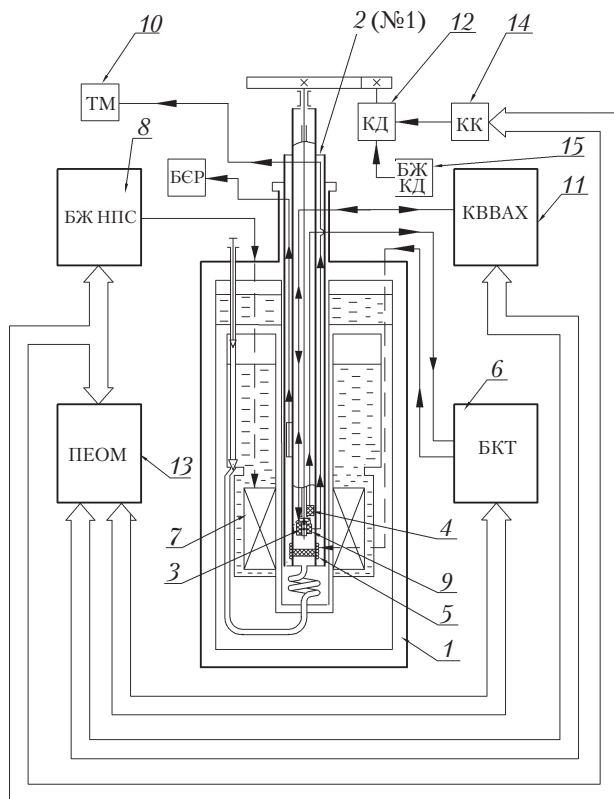


Рис. 1. Структурно-функціональна схема кріокомплексу

Відомі кріостати з вбудованим надпровідним соленоїдом [1–3]. Недоліками цих технічних рішень є те, що в деяких кріостатах не передбачена можливість заміни соленоїда, в зв'язку з чим їх функціональні можливості обмежені, тому що зразок може знаходитися під впливом незмінного за своїми характеристиками (однорідність, максимальна напруженість) магнітного поля або однорідність магнітного поля є недостатньою. Тому метою роботи було створення такої конструкції, яка б давала можливість поліпшити головні характеристики системи, зокрема однорідність магнітного поля надпровідного соленоїда, а також проведення комплексу магнітофізичних та електрофізичних досліджень.

Для вирішення цієї задачі корпус терморегульованого гелієвого кріостата виконаний знімним. У його середині розташована завантажувальна шахта і посудина для кріогенної рідини із вмонтованим в неї надпровідним соленоїдом.

Ця посудина охоплена радіаційним екраном, який з'єднаний з баком охолодження. Посудина має вхід і вихід для кріогенної рідини. В середині шахти і в центрі надпровідного соленоїда встановлена вставка з робочою камерою, на якій розташовані теплообмінник, нагрівач і датчик температури а в центрі — тримач досліджуваного зразка. Сам же кріостат додатково обладнаний контурами вимірювання магнітофізичних та електрофізичних характеристик та кроковим двигуном вставки, які зв'язані з ПЕОМ по електричній та інформаційній мережі для дослідження кутових залежностей цих характеристик.

Те, що робоча камера кріостата із нагрівачем та датчиком температури розташована на тязі і охоплює тримач зразка, а теплообмінник розташований у завантажувальній шахті, дозволяє зменшити кількість конструктивно-технологічних з'єднань, виконаних пайкою, оскільки поверхня робочої камери конструктивно звільнена від теплообмінника. Таким чином підвищується однорідність магнітного поля надпровідного соленоїда.

Суть рішення задачі пояснюється рис. 1, де наведена структурна схема кріосистеми для магнітофізичних та електрофізичних досліджень. На рис. 2 представлено устрій кріостата, де показано вертикальний осьовий переріз кріостата із вставкою 2, **A** — вигляд кріостата зверху, **I** — вертикальний переріз нижньої частини вставки у збільшеному масштабі, **B** — вертикальний переріз нижньої частини вставки у збільшеному масштабі (вигляд збоку).

Терморегульована кріосистема для магнітофізичних досліджень складається з таких блоків: *a* — контур терморегулювання і стабілізації температури, що містить у собі кріостат 1; вставку 2 із досліджуванним зразком 3; датчик температури 4; електронагрівач 5; блок керування температурою (БКТ) 6 та блок ємнісного рівнеміра (БЭР) рідкого гелію в шахті кріостата; *b* — контур регулювання і стабілізації напруженості магнітного поля, що містить в собі кріостат 1 із вбудованим надпровідним

соленоїдом (НПС) 7, блок живлення НПС 8, датчик Холла 9, тесламетр (мультиметр) 10; *в* – комплекс вимірювання вольт-амперних характеристик (КВВАХ) 11; *з* – блок автоматичного керування кутом нахилу зразка, що містить вставку 2, яка перетворює обертання штока навколо вертикальної осі в обертання тримача із зразком 3 навколо горизонтальної осі, кроковий двигун (КД) 12, що зв'язаний з керуючою ПЕОМ 13 через керуючий контролер (КК) 14 по електричній та інформаційній мережі і блок живлення крокового двигуна (БЖКД) 15.

Усередині розбірного корпусу кріостата 1 розміщується знімний бак ємністю 5,5 л для кріогенної рідини (гелію) 16, що оточений мідним екраном 17, який охолоджується кріогенною рідиною (азот) 18, що залита у бак 18 ємністю 2,8 л. Бак 16 закріплюється на верхньому фланці 19, який підвішений до кришки 20 на тонкостінних трубках 21, 22, 23, 24 із матеріалу з низькою теплопровідністю. Трубки підвісу багатофункціональні. Трубка 21 використовується:

- ✦ для розміщення голчастого вентиля 25, що регулює подачу рідкого гелію через трубку 26, знімну трубку 27 і змієвик 28 в камеру термостатування 29 кріостата за допомогою рукоятки 30 і також для розташування голчастого вентиля 31, що регулює подачу газоподібного гелію в камеру термостатування 29 за допомогою рукоятки 32;
- ✦ трубка 22 використовується для розміщення силового струмовводу 33 до надпровідного соленоїда (НПС) 34;
- ✦ трубка 23 використовується для заливки рідкого гелію в бак 16;
- ✦ трубка 24 використовується для розміщення показника рівня рідкого гелію 35.

До верхнього фланця 19 на шпильках 36 закріплений нижній фланець 37, до якого на шпильках 38 закріплений НПС 34, що оточений знімним баком 16 для рідкого гелію. НПС виконаний у вигляді каркаса, на якому навитий надпровідний провід. Силовий струмоввід 33

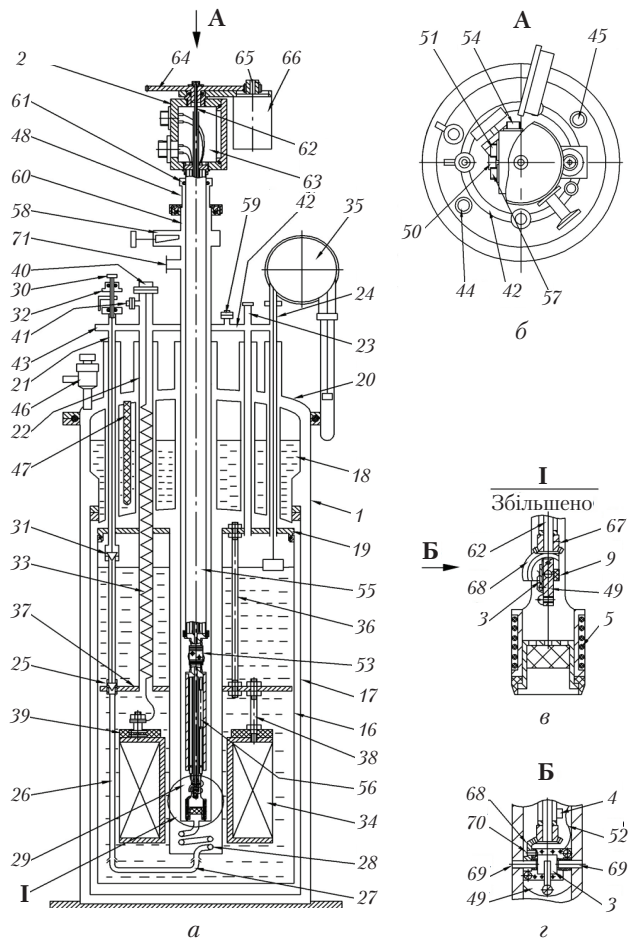


Рис. 2. Терморегульована кріостатна система для магнітофізичних та електрофізичних досліджень

виконано у вигляді косички з мідних проводів. Провідники від НПС підпаяні до плати 39 і до роз'єму 40. Потенційні провідники НПС виведені на роз'єм 41. У верхній частині трубки підвісу фланця 19 з посудиною 16 з'єднані проміж собою колектором 42 для відводу гелію, що випаровується в магістраль через штуцер 43.

Трубки підвісу азотної посудини 44 і 45 використовуються для заливки і видалення парів азоту. Вакуумна порожнина кріостата відкачується форвакуумним насосом через вакуумний кран 46. Високий вакуум створюється кріонасосом 47. У центрі корпусу кріостата розміщується шахта (завантажувальна труба) 48, що закінчується камерою термостатування

29. У камеру 29 кріостата знизу через трубки 26 і 27 і теплообмінник (змійовик) 28 подається рідкий або газоподібний гелій, що охолоджує зразок 3, закріплений на тримачі 49 вставки 2 (див. 4 і 5). Для нагрівання камери використовується електронагрівач 5, встановлений у нижній частині вставки 2. Виводи від нагрівача 5 під'єднані до роз'єму 50.

Для контролю температури в камері встановлений датчик температури 4. На тримачі зразка 49 встановлений датчик Холла 9 для вимірювання напруженості магнітного поля НПС в його центрі. Виводи від датчика Холла під'єднані до роз'єму 51. До зразка під'єднані дроти 52, що через комутаційну плату 53 під'єднані до роз'єму 54. У трубі 55 вставки розташований ємнісний показчик 56 рівня гелію, що під'єднаний до розйома 57. Зверху на шахті закріплений шиберний затвор 58, який при

шлюзуванні зразків для їх заміни перекриває прохідний канал шахти, що дає можливість проводити заміну зразків без відігрівання кріостата.

Для запобігання руйнації кріостата при підвищенні тиску на корпусі кріостата встановлено запобіжний клапан 59. На верхньому патрубку 60 кріостата закріплена вставка 2 з можливістю переміщення по вертикалі і обертання навколо вертикальної вісі до фіксації в сальниковому ущільненні 61. У центральній трубі вставки 55 закріплений з можливістю обертання шток 62. Шток у верхній частині закріплений на комутаційній коробці 63. На штоку жорстко закріплено зубчасте колесо 64, кінематично зв'язане з шестернею 65, яка жорстко закріплена на валу крокового двигуна 66.

У нижній частині штока 62 жорстко закріплено зубчасте колесо 67, що через одноступеневу зубчасту конічну передачу кінематично зв'язане із зубчастим сектором 68, який жорстко закріплений на напівосях 69 у нижній частині вставки. Зубчастий сектор 68 обертається на осях навколо горизонтальної осі і через штифт 70 обертає тримач 49 із зразком 3. У початковому положенні тримач 49 із зразком 3 розташований вздовж осі НПС 34, а у другому крайньому положенні тримач із зразком обернений на 90 ° відносно початкового і розташований поперек осі НПС. Тримач зі зразком може обертатися на різні кути в межах від 0 до 90 °. Кут повороту зразка задається від ПЕОМ через кроковий двигун.

Таблиця 1

Залежність витрат кріоагента від струму НПС при 4,2 К

Струм НПС, А	Індукція магнітного поля, Т	Витрати кріоагента, см ³ /год
0	—	200
10	1,12	220
20	2,24	250
40	4,48	280
50	5,6	300
60	6,72	310
70	7,84	320

Таблиця 2

Залежність витрат кріоагента від температури при максимальному введеному полі

Температура задана, T _з , К	Температура фактична, T _ф , К	Перерегулювання, ΔT _{пер} , К	Стабільність температури, ΔT _{ст} , ±К	Тиск газу в баці з кріоагентом, P, мм вод. ст.	Витрати кріо-агента, см ³ /год
4,2	4,19	—	0,01	200	320
6,0	6,0	<0,05	<0,05	200	280
12,0	12,0	<0,05	<0,05	200	260
20,0	20,0	<0,05	<0,05	200	220
40,0	40,0	<0,05	<0,05	200	190
80,0	80,0	<0,05	<0,05	200	170

Кріостат працює з кріогенною рідиною — гелієм — таким чином.

Вакуумна порожнина кріостата відкачується форвакуумним насосом через вакуумний кран 46. Досліджуваний зразок 3 закріплюється на тримачі 49 вставки. При відкритому шибєрному затворі 8 у шахту 48 кріостата встановлюється вставка 2 і закріплюється на верхньому патрубку 60 кріостата. Вставка встановлюється до упору в дно робочої камери 29 і фіксується в сальниковому ущільненні 61.

Після заливки азоту в бак 18 охолоджується підвісний радіаційний екран 17, який охоплює бак 16 з НПС і робочу камеру 29, що приводить до заохолодження всіх складових частин кріостата, які знаходяться в середині екрана. Охолодження адсорбційного кріонасоса 47 приводить до підвищення вакууму. Після заливки азоту і охолодження вищевказаних частин кріостата гелій заливається в бак 16 через трубку 23. Рівень гелію в баці 16 контролюється за допомогою покажчика рівня. Для подачі газоподібного гелію в робочу камеру 29 закривають вентиль 25 за допомогою рукоятки 30 і відкривають вентиль 31 за допомогою рукоятки 32.

Для подачі рідкого гелію в робочу камеру закривають вентиль 31 за допомогою рукоятки 32 відкривають вентиль 25 за допомогою рукоятки 30. Гелій або його пари під тиском надходять із бака 16 через трубки 26, 27 і теплообмінник (змійовик) 28 у робочу камеру 29 і виходять через патрубок 71 в магістраль збору гелію. Оскільки теплообмінник (змійовик) розташований у завантажувальній шахті, а не на зовнішній поверхні робочої камери, то він не підпаяний до її поверхні на всю свою довжину. Тим зменшується кількість припою і відповідно вплив компонентів пайки на однорідність магнітного поля надпровідного соленоїда.

Для роботи при температурі нижче 4,2 К у робочу камеру 29 подають рідкий гелій і відкачують пари гелію вакуумним насосом через патрубок 71.



Рис. 3. Зовнішній вигляд кріокомплексу

Для проведення магнітофізичних та електрофізичних досліджень використовується кріостатна система, наведена на рис.1. Перед дослідженням встановлюється і стабілізується магнітне поле. Контроль магнітного поля здійснюється за допомогою датчика Холла ПХЕ602117А.

Необхідний кут орієнтації зразка відносно орієнтації магнітного поля за рахунок його повороту задається ПЕОМ 13 через контролер 14, який керує кроковим двигуном 12.

Як показали дослідження, витрати кріоагента під відкачкою (1,6 К) при максимальному введеному полі становлять не більше 400 см³/год. Витрати кріоагента при температурі 4,2 К та в діапазоні 4,2–80 К наведені в табл. 1 та 2. Як видно з наведених даних, однієї заливки кріостата вистачає на повний робочий день

На рис. 3. наведено зовнішній вигляд кріогенного комплексу, який має такі технічні характеристики:

область регуляції температури	1,6–4,2; 4,2–80; 80–300 К
область регуляції магнітного поля	0–7,84 Т
нестабільність температури	менше 0,1 К
неоднорідність магнітного поля в центрі робочої камери кріостата, Тл	не гірше $1 \cdot 10^{-3}$ на довжині 30 мм
зразок може знаходитись в рідині або в газі	
діаметр каналу для зразка	20 мм
швидка зміна зразка	

автоматично керована зміна положення зразка відносно вектора магнітного поля

програмована зміна температури, поля, положення зразка

витрати рідкого гелію при максимальному введеному полі при 1,6 К не більше 400 см³/год

витрати рідкого гелію в діапазоні 4,2–80 К не більше 0,320 см³/год

витрати рідкого гелію в діапазоні 80–300 К не більше 0,320 см³/год

ВИСНОВКИ

Розроблений криогенний комплекс забезпечує одночасне програмоване регулювання температури дослідного зразка в діапазоні 1,6–4,2; 4,2–80; 80–300 К та її стабілізацію з точністю $\pm 0,05^\circ$ в регульованому магнітному полі до 7,8 Тл і автоматизовану програмовану зміну орієнтації зразка відносно вектора магнітного поля.

Робота виконана в рамках Програми наукового приладобудування, грант П2/ 15-40.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. №943669 СССР, МКИ G 05 D 23/30. Терморегулируемое криостатное устройство / В.С. Медведев, В.М. Ермаков, В.Б. Подолич. — Бюлл. изобретений СССР №26; опубликовано 15.07.1982.
2. А.с. №981781 СССР, кл. F25D 3/10. Криостат / В.С. Медведев, В.М. Ермаков, В.Б. Подолич. — Бюлл. изобретений СССР, №46; опубликовано 15.12. 1982.
3. А.с. №98974 Україна МПК G05D 23/30. Терморегульована криостатна система для магнітооптичних та електрофізичних досліджень / І.П. Жарков, В.В. Сафронов, А.Г.Чмуль, В.О. Ходунов — опубл. 10.07.2012 р.; бюл. «Промислова власність» № 13.

REFERENCES

1. A.s. №943669 SSSR, MKI G 05 D 23/30. Termoreguliruemoe kriostatnoe ustrojstvo. V.S. Medvedev, V.M. Ermakov, V.B. Podolich [in Russian].

2. A.s. №981781 SSSR, kl. F25D 3/10. Kriostat. V.S. Medvedev, V.M. Ermakov, V.B. Podolich [in Russian].
3. A.s. №98974 Ukrai'na MPK G05D 23/30. Termoregul'ovana kriostatna sistema dlja magnitootychnyh ta elektrofizychnyh doslidzhen'. Zharkov I.P., Safronov V.V., Chmul' A.G., Hodunov V.O. [in Ukraine].

*I.P. Zharkov, V.V. Safronov, S.P. Palamarchuk,
O.S. Pylypchuk, A.G. Solonetskiy, V.O. Khodunov*
Institute of Physics, the NAS of Ukraine, Kyiv

COMPLEX OF CRYOAPPARATUS WITH BUILT-IN SUPERCONDUCTIVE SOLENOID FOR MAGNETOPHYSICAL AND ELECTROPHYSICAL RESEARCH

The complex cryogenic equipment based on the temperature-controlled helium cryostat with a superconducting built-in solenoid for the study of galvanomagnetic phenomena in two-dimensional systems is created. It provides temperature control of the investigated sample in the range of 1.6–4.2; 4.2–80; 80–300 K and its stabilization with no more than 0.1 K accuracy in a magnetic field up to 7.84 Tl.

Keywords: cryosystem, helium, temperature control, temperature stability, superconductive solenoid.

*И.П. Жарков, В.В. Сафронов, С.П. Паламарчук,
А.С. Пилипчук, А.Г. Солонецький, В.А. Ходунов*
Институт физики НАН Украины, Киев

КОМПЛЕКС КРИОАППАРАТУРЫ СО ВСТРОЕННЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ СОЛЕНОИДОМ ДЛЯ МАГНИТОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Создан комплекс криогенной аппаратуры на базе терморегулируемого гелиевого криостата со встроенным сверхпроводящим соленоидом для исследования гальваномагнитных явлений в низкоразмерных системах. Комплекс обеспечивает регулирование температуры исследуемого образца в диапазонах 1,6–4,2; 4,2–80; 80–300 К и ее стабилизацию с точностью не более 0,1 К, в магнитном поле до 7,84 Тл.

Ключевые слова: криосистема, гелий, терморегулирование, стабильность температуры, сверхпроводящий соленоид.

Стаття надійшла до редакції 05.11.15