



<https://doi.org/10.15407/scin16.04.060>

І.П. ЖАРКОВ¹, В.В. САФРОНОВ¹, В.О. ХОДУНОВ¹,
В.М. КОНОВАЛ¹, В.О. МАСЛОВ¹, О.В. СЕЛІВАНОВ¹, А.Г. СОЛОНЕЦЬКИЙ¹,
О.А. КАЛЕНЮК², А.П. ШАПОВАЛОВ², В.Є. ШАТЕРНІК²

¹Інститут фізики НАН України,
пр. Науки, 46, Київ, 03028, Україна,
+380 44 525 1220, +380 525 1589, fizyka@iop.kiev.ua

²Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36, Київ, 03142, Україна,
+380 44 424 3110, metall@imp.kiev.ua

ПРЕЦИЗИЙНИЙ ТЕРМОРЕГУЛЬОВАНИЙ КОМПЛЕКС КРІОГЕННОЇ АПАРАТУРИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУНЕЛЬНИХ КОНТАКТІВ НАДПРОВІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вступ. Дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) та їхніх похідних тунельних контактів та гібридних гетероструктур на базі надпровідних та феромагнітних матеріалів під дією надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання та магнітних полів в широкому діапазоні температур є актуальним завданням для розроблення елементної бази спінтроніки, надпровідникової електроніки (зокрема для надпровідних і квантових комп'ютерів) та надчутливих сенсорів.

Проблематика. Одним із сучасних інформативних фізичних методів досліджень властивостей тунельних контактів та гібридних гетероструктур на базі надпровідних та феромагнітних матеріалів є дослідження ВАХ та їхніх похідних в області низьких температур (переважно діапазон рідкого гелію) в магнітному полі. Сюди входить дослідження магнітоопору, ефекту Холла, квантового ефекту Холла, зокрема й під дією спінової інжекції. На сьогодні не існує прецизійного комплексу терморегульованої кріогенної апаратури для досліджень ВАХ тунельних контактів надпровідних матеріалів, який би повністю міг задовольнити потреби вивчення параметрів надпровідних матеріалів.

Мета. Розроблення конструкції та виготовлення прецизійного терморегульованого комплексу кріогенної апаратури для досліджень ВАХ тунельних контактів надпровідних матеріалів.

Результати. Виготовлено комплекс прецизійної терморегульованої кріогенної системи (діапазон температур 2,0–300 К) для дослідження ВАХ тунельних контактів надпровідних матеріалів. Комплекс створено на базі гелієвого кріостата рідинно-проточного типу з вбудованим надпровідним соленоїдом (НПС) (діапазон магнітного поля 0–2,9 Тл) та спеціалізованим маніпулятором для зміни напрямку магнітного поля, з регулятором температури, з програмованим блоком живлення НПС, автоматизованим блоком вимірювання ВАХ та програмним забезпеченням до нього.

Цитування: Жарков І.П., Сафронов В.В., Ходунов В.О., Коновал В.М., Маслов В.О., Селіванов О.В., Солонецький А.Г., Каленюк О.А., Шаповалов А.П., Шатернік В.Є. Прецизійний терморегульований комплекс кріогенної апаратури для дослідження вольт-амперних характеристик тунельних контактів надпровідних матеріалів. *Nauka innov.* 2020. Т. 16, № 4. С. 60–70. <https://doi.org/10.15407/scin16.04.060>

Висновки. Характеристики створеного кріокомплексу не поступаються параметрам кращих західних аналогів, а за показниками економічності використання кріоагенту та сервісу перевищують їх.

Ключові слова: вольт-амперні характеристики, тунельні контакти, надпровідні гетероструктури, терморегульована гелієва кріосистема.

Завдання створення вітчизняного комплексу терморегульованої кріогенної апаратури для досліджень вольт-амперних характеристик (ВАХ) тунельних контактів надпровідних матеріалів із можливістю зміни орієнтації зразка відносно вектора магнітного поля та одночасного підведення до зразка електричного поля та фактора оптичного впливу, а також розгортки магнітного поля за заданою програмою є актуальною проблемою, оскільки на сьогодні в світі не існує кріосистем з таким сервісом.

Провідними виробниками кріогенної техніки з вбудованими надпровідними соленоїдами (НПС) є такі компанії: “*Oxford Instruments plc*” (Великобританія), “*Cryo Industries of America Inc*” (США), “*ABBES Instruments*” (США), “*JANIS Research Company, Inc*” (США), “*CryoVac*” (Німеччина), “*Cryomagnetics corp*” (США), “*RTI Company*” (Росія).

В Україні розробниками аналогічної продукції є Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України, Інститут фізики НАН України (Київ) та Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (Харків). Але кріостати зазначених виробників не мають таких додаткових опцій як зміна орієнтації зразка відносно вектора магнітного поля та одночасне підведення до зразка сильних електричних полів. Крім того, розгортка магнітного поля за заданою програмою в цих системах забезпечується комплектацією кріостатів керованими джерелами струму інших виробників, що має незручності при монтажу й запуску таких кріостатів, оскільки кожен виробник запускає на місці експлуатації тільки свій прилад і відповідає за свою частину роботи.

На сьогодні не існує комплексу терморегульованої кріогенної апаратури для досліджень

вольт-амперних характеристик тунельних контактів надпровідних матеріалів, яка б повністю могла задовольнити потреби вивчення параметрів надпровідних матеріалів.

Отже, створення комплексу терморегульованої кріогенної апаратури для досліджень ВАХ тунельних контактів надпровідних матеріалів є актуальним завданням.

Мета роботи полягала у розробленні єдиного комп’ютеризованого комплексу терморегульованої кріогенної апаратури, який поєднує в собі терморегульований кріостат із вбудованим надпровідним соленоїдом з полем від 0–2,9 Тл, автоматизований регулятор температури, кероване джерело струму для програмованої розгортки магнітного поля, маніпулятор з можливістю автоматизованого повороту зразка відносно вектора магнітного поля і одночасного підведення електричного поля та оптичного впливу до досліджуваного зразка з об’єднаним керуванням режимами роботи всіх перерахованих компонентів від центрального комп’ютера.

Інститут фізики НАН України має певний досвід створення кріосистем для магнітофізичних досліджень та аксесуарів до них [1–9]. З урахуванням набутого досвіду було розроблено та виготовлено комплекс терморегульованої кріогенної апаратури для досліджень вольт-амперних характеристик тунельних контактів надпровідних матеріалів на базі кріостата із спеціалізованим маніпулятором, опис конструкції яких наведено нижче, регулятора температури та програмованого джерела живлення НПС.

Схему кріостата зображено на рис. 1. Усередині розбірного корпусу 1 міститься гелієвий бак 2, оточений мідним екраном 3, що охолоджується рідким азотом, залитим в азотний бак 4.

Гелієвий і азотний баки підвішені до кришки 5 на тонкостінних трубках із матеріалу з низькою теплопровідністю. Трубки підвісу гелієвого бака 6, 7, 8 використано: а) для розміщення рівнеміру 9 (трубка 6); б) для розміщення голчастого вентиля 10 подачі рідкого гелію, що керується рукояткою 11, а також голчастого вентиля 12 подачі газоподібного гелію, що керується рукояткою 13 або ж для завантаження рідкого гелію при знятих голчастих вентилях 10 і 12 (трубка 7); в) для розміщення силового струмоznімача 14 з НПС (трубка 8).

Надпровідний соленоїд 15 виконано у вигляді двох котушок Гельмгольца, кожна з яких складається з трьох знімних секцій, на яких навито надпровідний провід СКНТ-0,33. Внутрішні секції закріплено на горизонтальній осі соленоїда на патрубках 16. Середні й зовнішні секції закріплено на внутрішніх. Усі елементи секції 15 через систему підвісів 17 кріпляться до кришки 18 гелієвого бака, яка ущільнюється з гелієвим баком 2 на індієвих прокладках, забезпечуючи необхідну герметичність. Силовий струмоznімач 14 виконано у вигляді косички з мідних дротів.

Провідники від кожної котушки соленоїда 15 підпаяні через комутаційні плати 19 до контактів роз'єму 20. Потенціальні провідники соленоїда виведені на роз'єм 21.

У верхній частині трубки підвісу гелієвого бака 2 з'єднані між собою колектором 22 для відводу гелію, що випаровується, у магістраль через штуцер 23.

Трубка підвісу азотного бака 24 використовуються для завантаження рідкого азоту, а вихід парів азоту здійснюється через зовнішню частину трубки 8, охолоджуючи косичку силового струмоznімача 14 і виводиться через штуцер 25.

Вакуумна порожнина кріостата відкачується форвакуумним насосом через вакуумний кран 26. Високий вакуум створюється кріонасосом 27. У центрі корпусу кріостата розміщується шахта (завантажувальна труба) 28. Рідкий і газоподібний гелій подається до шахти

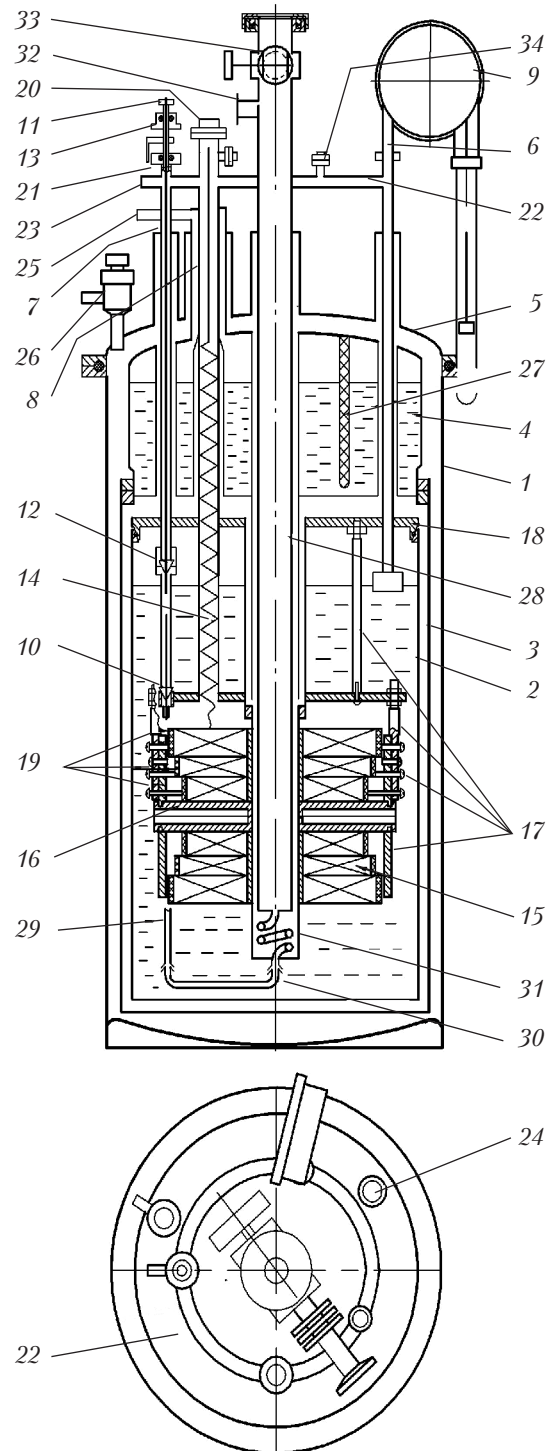


Рис. 1. Схема кріостата

28 через голчасті вентиля 10 і 12, трубками 29, 30 і змієвиком 31. Трубка 30 знімна. Випускання газоподібного гелію відбувається через шахту 28 і штуцер 32.

Зверху на шахті закріплюється шаровий кран 33, який використовується для шлюзування зразків при їхній заміні, перекриває прохідний канал шахти, що дає можливість проводити заміну зразків без нагрівання кріостата. Для запобігання руйнування кріостата, при підвищенні тиску в гелієвому об'ємі та шахті, встановлено-запобіжні клапани 34, розривні мембрани яких таровано на робочий тиск $5-7 \times 10^4$ Па.

Технічна характеристика НПС

Постійна НПС — це співвідношення індукції магнітного поля B (Тл) в центрі НПС до величини струму живлення I (А), яку виміряно при кімнатній температурі при струмах в обмотці $\pm I$ (А), дорівнює 0,15 (Тл/А). Значення постійної соленоїда при гелієвій температурі (4,2 К) не виходить за межі похибки вимірювання. Постійну НПС виміряно за допомогою *InSb* датчика Холла. Індукція магнітного поля визначається за формулою:

$$B = 0,15 \times I.$$

Гранична величина струму живлення при температурі 4,2 К дорівнює 19,5 А і є граничною величиною поля в центрі НПС 2,9 Тл, граничний струм 19,5 А подається в НПС протягом 25 хв. Для живлення НПС використано блок живлення, розроблений Інститутом фізики НАН України.

Конструктивна особливість системи «кріостат—маніпулятор» полягає в тому, що камеру термостатування розташовано на маніпуляторі.

Робота маніпулятора (рис. 2) пояснюється кресленнями *a* — функціональна схема установки для керування кроковим двигуном вставки; *b* — вертикальний перетин вставки; *v* — вид вставки збоку; *z* — вид А вставки; *d* — перетин $B-B$ вставки.

Функціональна схема установки (рис. 2, *a*) для керування кроковим двигуном складається із маніпулятора 1 із кроковим двигуном 2, комп'ютера 3, що керує кроковим двигуном за заданою програмою через контролер керування 4, та джерела живлення 5.

Маніпулятор 1 (рис. 2, *b*) містить механізм обертання навколо її вертикальної осі підкладки 6 із зразком 7. Механізм складається із центральної трубки 8, всередині якої закріплено трубку 9, що вгорі жорстко закріплена на зубчатому колесі 10 і обертається разом із ним у втулці 11, яку жорстко закріплено зверху на комутаційній коробці 12, що з'єднана з верхньою частиною центральної трубки через втулку 13, а знизу трубку 9 закріплено, з можливістю обертання, у корпусі 14. Зверху трубка 9 через зубчате колесо 10 і шестерню 15 кінематично зв'язана з кроковим двигуном 2, а знизу жорстко з'єднана через тримач 16 з підкладкою 6 із зразком 7. Таким чином кроковий двигун 2 обертає підкладку 6 із зразком 7 навколо вертикальної осі вставки.

На верхній частині коробки 12 закріплено платформу 17, на якій встановлено кроковий двигун 2 із шестерню 15, зубчате колесо 10, мікроперемикач 18 (рис. 2, *v, z*), що визначає початкове положення механізму обертання підкладки 6 із зразком 7, мікроперемикач 19, що визначає кінцеве положення механізму обертання, кронштейн 20. Знизу зубчатого колеса 10 закріплено втулку 21, за допомогою якої спрацьовують мікроперемикачі 18 і 19 при обертанні зубчатого колеса. На кронштейні 20 зверху закріплено втулку 22, в яку впаяно трубку 23. Навколо втулки 22 разом із трубкою 23 обертається втулка 24 із впаяною в неї трубкою 9. Нерухома трубка 23 закінчується знизу над верхнім торцем зразка 7 і призначена для встановлення в ній світлопроводу 25. На підкладці 6 біля зразка 7 встановлено комутаційну плату 26 і підпружинені притиски 27 і 28 для закріплення зразка 7 на підкладці 6. В нижній частині підкладки навито електронагрівач 29. На корпусі 14 закріплено комутаційні плати 30,

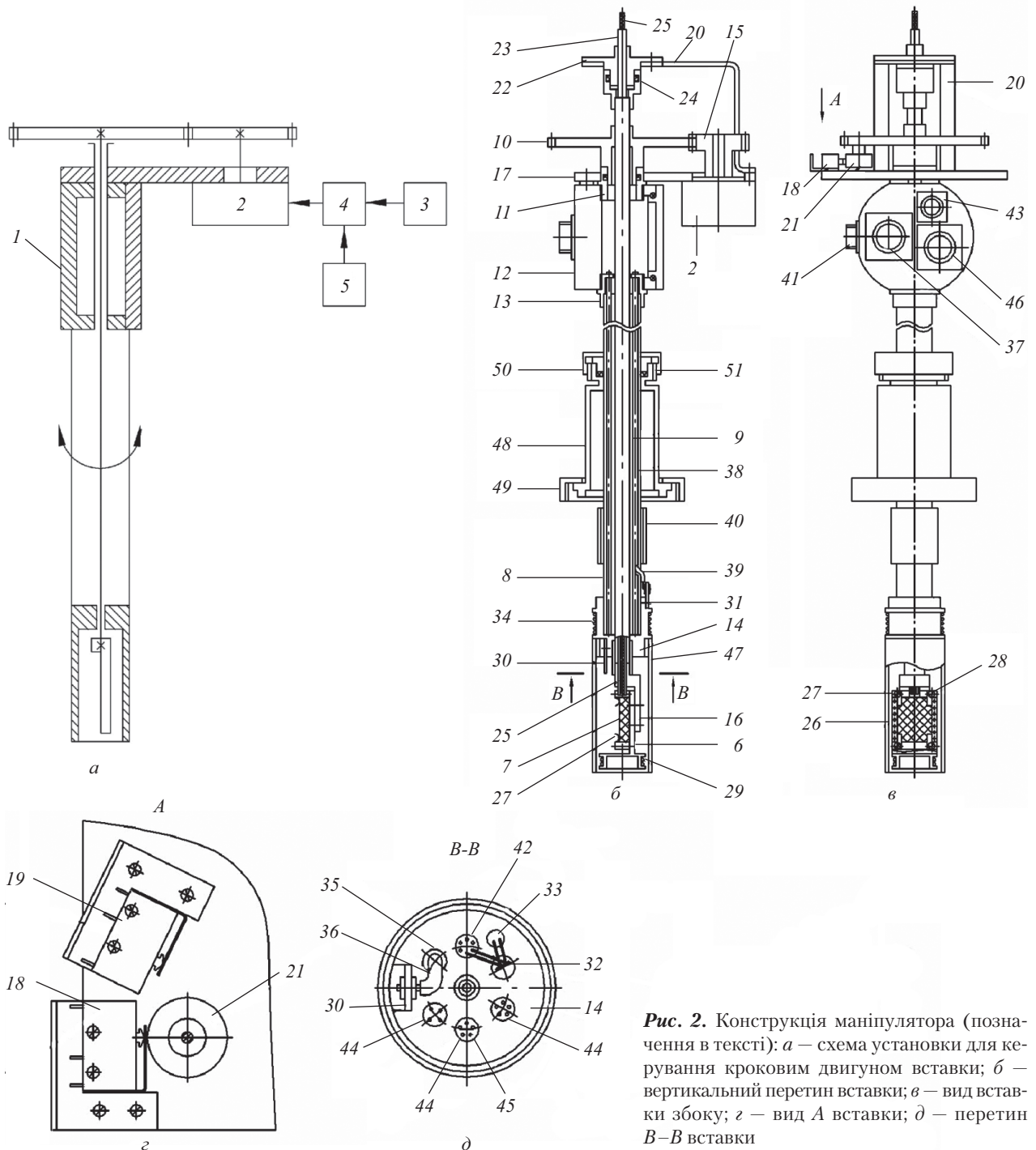


Рис. 2. Конструкція маніпулятора (позначення в тексті): *а* – схема установки для керування кроковим двигуном вставки; *б* – вертикальний перетин вставки; *в* – вид вставки збоку; *г* – вид А вставки; *д* – перетин В-В вставки

31 і 32, датчик температури 33 (рис 2, д) і навітий електронагрівач 34. Крім того, в корпусі закріплено трубки для підведення кабелів і провідників, що йдуть від комутаційних плат

крізь корпус 14, трубку 8 до роз'ємів на комутаційній коробці 12. Трубку 35 призначено для підведення кабелю надвисокої частоти 36 від комутаційної плати 30 до роз'єму 37 на короб-

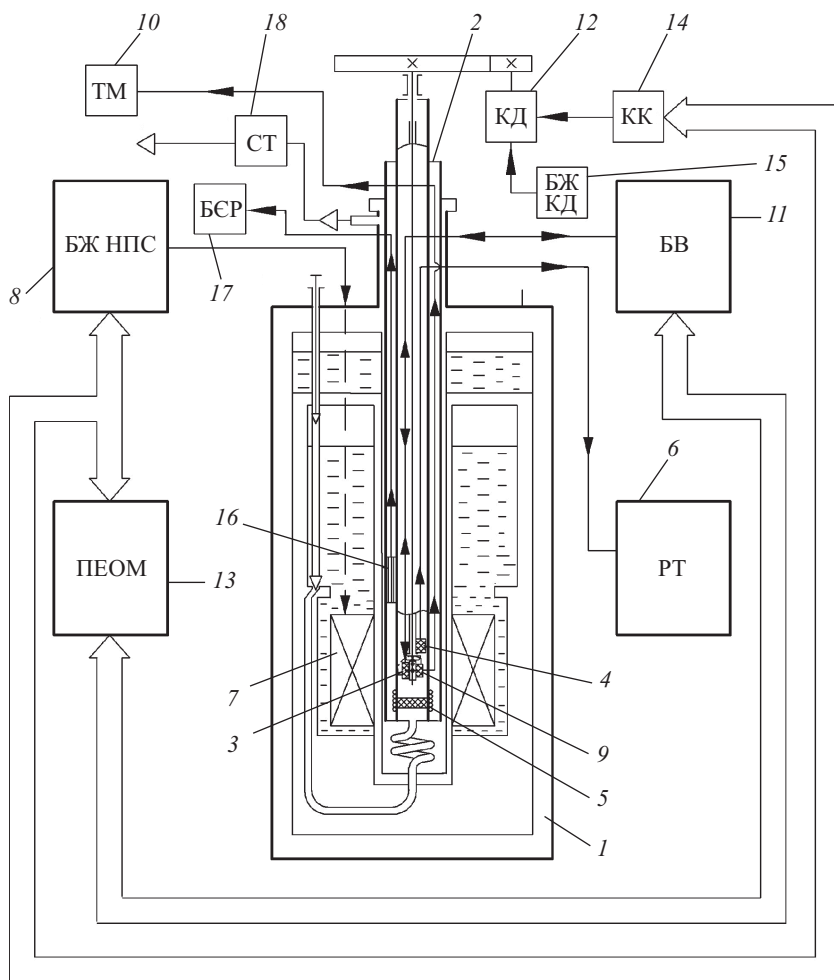


Рис. 3. Функціональна та структурна схема кріокомплексу

ці 12. Трубку 38 призначено для підведення кабелю високої частоти 39 від датчика 40 ємнісного показчика рівня гелію через комутаційну плату 31 до роз'єму 41 на коробці 12. Трубку 42 призначено для підведення провідників від датчика температури 33 через комутаційну плату 32, а також від електронагрівачів 29 і 34 до роз'єму 43 на коробці 12. Трубки 44 призначено для підведення провідників 45, що йдуть від зразка 7 через комутаційну плату 26 до роз'єму 46 на коробці 12. В нижній частині корпусу 14 закріплено мідний екран 47 для зменшення градієнту температури вздовж зразка. Вставка має подовжувач 48 для закріплення її на верхньому патрубку кріостата за допо-

могою накидної гайки 49. У верхній частині подовжувач має сальникове ущільнення 50 для можливості переміщення центральної трубки 8 вгору або вниз, а також її обертання навколо вертикальної осі з послідуною фіксацією трубки за допомогою накидної гайки 51.

Вставка працює таким чином: зразок 7 закріплюється на підкладці 6 за допомогою затискачів 27 і 28 (рис. 2, б, в). Кроковий двигун 2 через шестерню 15 і зубчате колесо 10 обертає трубку 9 разом з тримачем 16 та підкладкою 6 із зразком 7. Кут оберту зразка 7 навколо вертикальної осі вставки залежить від кількості кроків двигуна 2, що задаються комп'ютером 3 через контролер керування (рис. 2, а)

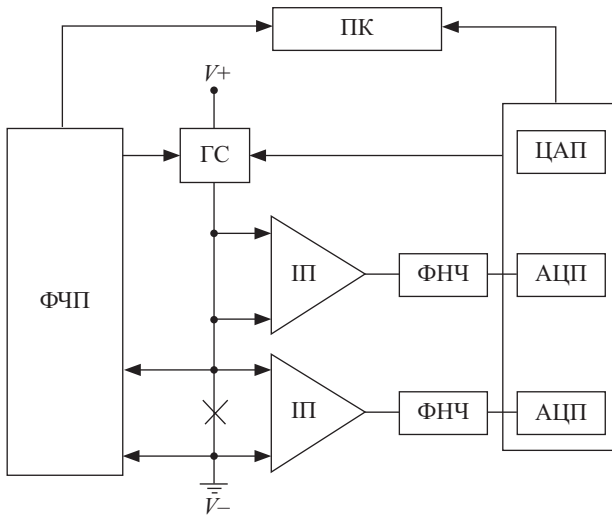


Рис. 4. Блок-схема системи для одночасного виміру прямих та диференційних ВАХ: ПК – персональний комп’ютер; ФЧП – фазочутливий підсилювач; ДС – джерело струму; R – шунт; X – зразок; $V+$, $V-$ – джерела напруги; ІП – інструментальний підсилювач; ФНЧ – фільтр низьких частот; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

і від передаточного числа шестерні 15 і зубчатого колеса 10 ($i = 2/9$). Враховуючи, що кроковий двигун обертає за один крок вал на кут $0,9^\circ$, а передавальне число між шестернею 15 і зубчатим колесом 10 ($i = 2/9$), можна визначити кут оберту підкладки 6 із зразком 7 при одному кроці двигуна: $0,9^\circ \times 2/9 = 0,2^\circ$.

Кут оберту X зразка 7 можна задавати й фіксувати через кількість кроків N двигуна, що керується комп’ютером:

$$N = X/0,2.$$

Наприклад, для оберту зразка на кут $X = 180^\circ$ потрібно N кроків двигуна:

$$N = 180^\circ/0,2^\circ = 900 \text{ кроків.}$$

Максимальний кут оберту залежить від кутового положення мікроперемикача 19 і становить 320° .

Функціональну та структурну схему криокомплексу наведено на рис. 3.

Кріокомплекс складається з:

а) контуру терморегулювання і стабілізації температури, що містить криостат 1, маніпуля-

тору 2 із досліджуванним зразком 3, датчика температури *DTS-100* 4, електронагрівача 5, регулятора температури (РТ) 6, персональної електронно-обчислювальної машини (ПЕОМ) 13;

б) контуру регулювання і стабілізації напруженості магнітного поля, що містить криостат 1 із вбудованим надпровідним соленоїдом 7, блоку живлення (БЖ НПС) 8, маніпулятора 2 з *InSb* датчиком Холла 9, тесламіра (ТМ) 10, ПЕОМ 13;

в) блоку автоматичного керування кутом нахилу зразка, що містить маніпулятор 2, який обертає шток разом із тримачем та зразком 3 навколо вертикальної осі за допомогою крокового двигуна (КД) 12, що зв’язаний з керуючою ПЕОМ 13 через керуючий контролер (КК) 14 електричною та інформаційною мережами і блока живлення крокового двигуна (БЖКД) 15;

г) вимірювальної системи для електрофізичних вимірювань, що містить блок вимірювання (БВ) 11, з’єднаний із зразком 3 на маніпуляторі 2 електричною мережею та з ПЕОМ 13 інформаційною мережею;

д) ємнісного рівнеміра рідкого гелію в шахті криостата, що складається з ємнісного датчика (ЄД) 16 і блока ємнісного рівнеміра (БЄР) 17;

є) оптичного каналу в маніпуляторі, що складається із трубки 23, в якій встановлено світлопровід 25 для підведення фактору оптичного впливу із зовнішньої частини маніпулятора до зразка в його нижній частині;

ж) каналу для підведення електромагнітного випромінювання надвисокої частоти (НВЧ) до зразка в маніпуляторі, що складається із трубки 35, якою НВЧ кабель 36 надходить від роз’єму 37 на комутаційній коробці 12 у верхній частині маніпулятора до комутаційної плати 30 в його нижній частині ((див. рис. 2, б, д).

Оскільки роботу і принцип дії таких складових комплексу як регулятор температури, блок живлення НПС і т.д. детально вже описано в дослідженнях [7–9], то нижче докладно пояснено лише блок вимірювання вольт-амперних характеристик авторської розробки, який складається з джерела постійного струму та відповідного програмного забезпечення.

На рис. 4 показано блок-схему вимірювального обладнання, яке дозволяє здійснювати одночасні виміри прямих та диференційних вольт-амперних характеристик зразків [10]. Струм у схемі встановлюється джерелом струму (ДС), яке живиться від акумуляторної 24 вольтової батареї ($U+/-$). Таке живлення дозволяє значно зменшити шум та зробити гальванічну розв'язку зразка. У ДС надходить постійна напруга від цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) та змінна синусоїдальна опорна напруга з фазочутливого підсилювача (ФЧП). Ці напруги додаються та перетворюються у струм з деяким коефіцієнтом пропорційності відповідно до обраного діапазону зміни струму. ДС має чотири діапазони зміни струму $-\pm 20; \pm 5; \pm 1,25; \pm 0,3$ мА. Вибір діапазону здійснюється перемикачем. Інформація про обраний діапазон надходить до персонального комп'ютера у вигляді цифрового коду. В результаті ДС генерує синусоїдальний струм амплітудою I_{ac} з постійним зміщенням I_{dc} . Сумарний струм крізь зразок I_x визначається формулою $I_x = I_{dc} + I_{ac} \sin(\omega t)$, де ω — частота опорної напруги з ФЧП. Для мінімального впливу змінної компоненти виконується нерівність $I_{dc} \gg I_{ac}$, окрім випадку $I_{dc} \cong 0$. Кожному діапазону струму відповідає свій шунтуючий резистор, напруга на якому є пропорційною струму крізь зразок. Напруга з шунтуючого резистора переходить на інструментальний підсилювач (ІП) і далі, крізь фільтр низьких частот (ФНЧ), — на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Таким чином реалізовано канал виміру постійної компоненти струму I_{dc} . Виміри постійної компоненти напруги U_{dc} виконує другий аналогічний канал. ФНЧ застосовується в обох каналах для виключення впливу змінної компоненти напруги і струму на постійну компоненту. Зафіксовані дані з двох каналів АЦП надходять до персонального комп'ютера (ПК).

Напруга зі зразка також надходить на ФЧП, який вимірює змінну компоненту, що пропорційна диференційному опору ($U_{ac} \sim R_{dif}$) зразка. Таким чином, на ПК передаються значення

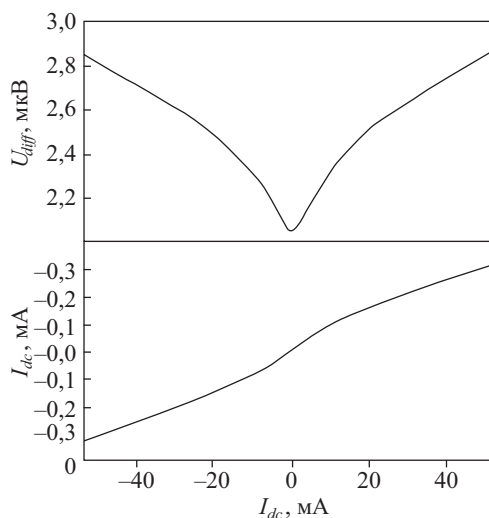


Рис. 5. Диференційна та пряма ВАХ гібридного контакту MoRe-Si(W)-MoRe

постійної та змінної компоненти напруги, а також значення струму. Керування вимірюваннями здійснює програма, яка змінює значення струму з визначеним кроком, вимірює струм та напругу у кожній точці. Мінімальний крок струму залежить від діапазону і складає для застосованого шістнадцятибітного ЦАП 300 нА для діапазону ± 20 мА та 4,6 пА — для діапазону $\pm 0,3$ мА. Слід зауважити, що мінімальний крок є значно меншим, ніж шум у реально вимірювальних контактах. Кількість вимірів за двома каналами АЦП досягає 10^6 /с. Така висока швидкість дозволяє здійснити додаткову фільтрацію шляхом розрахунку середнього значення струму та напруги за час вимірів в одній точці. Паралельно вимірюється амплітуда змінної компоненти.

Програма накопичує дані за один цикл сканування струму, будує залежності у будь-яких комбінаціях з трьох значень I_{dc} , U_{dc} та R_{dif} , дозволяє порівнювати до п'яти вимірних кривих між собою та зберігати дані у вигляді текстових файлів, що містять в собі три колонки зафіксованих чисел для подальшої обробки.

На рис. 5 зображено прямі та диференційні ВАХ гібридного трьохшарового контакту, виміряні розробленим блоком (рис. 4). Контакт

виготовлено з двох тонких плівок (~100 нм) надпровідного сплаву MoRe, які розділені між собою шаром кремнію, що містить нановключення вольфраму з розміром часток в декілька десятків нанометрів. Вимірювання виконано при температурі 4,2 К, значення температури фіксується діодним датчиком температури DTS-100. Дослідження проведено в магнітному полі Землі, яке вважається досить малим, таким, що не викликає помітної зміни ВАХ досліджуваних гетероструктур.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Розроблене для персонального комп'ютера програмне забезпечення дозволяє керувати процесом вимірювання прямих та диференційних вольт-амперних характеристик з використанням модуля Е-502 у реальному часі. Комунікація комп'ютера з модулем Е-502 здійснюється через USB або LAN з'єднання. У налаштуваннях програми є можливість підключати обрані канали АЦП модуля Е-502 до каналів вимірів струму, напруги та диференційної напруги, обирати кількість точок усереднення, час виміру точки, встановлювати діапазон струму та алгоритми сканування від меншого значення до більшого або циклічного сканування, встановлювати постійне значення струму, вимірювати рівень шуму за кожним каналом. Програма дозволяє одночасно спостерігати чотири виміряні ВАХ, порівнювати їх, змінювати масштаб відображення графіків та зберігати дані на диск у вигляді табличного текстового файлу. Застосовані фільтри низьких частот та алгоритми усереднення за кількома вимірними точками дозволили зменшити рівень шумів до значень $\pm 0,2$ мкВ на вимірюваних ВАХ. Отримані технічні характеристики кріосистеми наведено в таблиці.

Отже, розроблено унікальний інноваційний комплекс прецизійної терморегульованої кріогенної апаратури для досліджень вольт-амперних характеристик тунельних контактів надпровідних матеріалів із можливістю зміни орієнтації зразка відносно вектора магніт-

Технічні характеристики кріосистеми

Показник	Значення
Діапазон регулювання температури, К	2,0÷80÷300
Кріоагенти	Рідкий гелій, азот
Витрати рідкого гелію:	
при заходженні кріостата з НПС, л	Не більше 25
при підтримці температури 4,2 К, л/год	Не більше 0,25
при підтримці температури 1,6 К, л/год	Не більше 0,7
Час безупинної роботи при 4,2 К без дозаправки кріоагентами, год, не менше	5
Об'єм баку рідкого азоту, см ³	2800
Об'єм баку рідкого гелію, см ³	5500
Діаметр завантажувального каналу кріостата, мм	19
Маса:	
кріостата, кг	22
маніпулятора №1, кг	2
Характеристики електронагрівача, встановленого на маніпулятор	
опір, Ом	100
матеріал	Ніхром, Ø 0,12; L = 1000 мм
подавана напруга на електронагрівач, встановлений на маніпуляторі, В	0–40
Робочий тиск розривних мембран захисних клапанів, Па	$5-7 \times 10^4$
Характеристика соленоїдної системи:	
величина індукції магнітного поля в центрі НПС, Тл	2,9
неоднорідність поля, %	1–1,5
постійна НПС, Тл/А	0,15
гранична величина струму, А	19,5
Характеристики системи для вимірювання прямих та диференційних ВАХ	
чутливість прямого каналу, мкВ	0,3
чутливість диференційного каналу, мкВ	0,05
кількість діапазонів струмів	4
мінімальний крок струму, пА	4,6
розрядність каналів ЦАП та АЦП	16
максимальна швидкість вимірів АЦП, вимірів/секунду	10^6

ного поля та одночасного підведення до зразка електричного поля та фактору оптичного впливу, а також розгортки магнітного поля за заданою програмою. Цей комплекс не поступається за своїми можливостями кращим закордонним аналогам, а за показниками еконо-

мічності використання кріоагенту та сервісу перевищують їх.

Роботу виконано в рамках програми наукового приладобудування НАН України, гранти П-14/17-40, П-14/18-40, П-2/19-40.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент України на винахід № 98974. Жарков І.П., Сафронов В.В., Чмуль А.Г., Ходунов В.О. Терморегульована кріостатна система для магнітооптичних та електрофізичних досліджень.
2. Патент РФ на изобретение № 2466446. Жарков И.П., Сафронов В.В., Ходунов В.А., Чмуль А.Г. Терморегулируемая криостатная система для магнитооптических и электрофизических исследований.
3. Жарков І.П., Сафронов В.В., Паламарчук С.П., Пилипчук О.С., Солонецький А.Г., Ходунов В.О. Комплекс кріоапаратури з вбудованим надпровідним соленоїдом для магнітофізичних та електрофізичних досліджень. *Наука та інновації*. 2016. Т. 12, № 3. С. 29–34.
4. Патент України на винахід № 112992. Жарков І.П., Пилипчук О.С., Порошин В.М., Сафронов В.В., Ходунов В.О. Терморегульована кріостатна система для магнітофізичних та електрофізичних досліджень.
5. Жарков І.П., Сафронов В.В., Ходунов В.О., Коновал В.М., Маслов В.О., Селіванов О.В., ... Насека В.М. Сворення спеціалізованих маніпуляторів для низькотемпературних досліджень. *Наука та інновації*. 2018. Т. 14, № 2. С. 29–36.
6. Патент України № 120401 на користь модель. Жарков І.П., Коновал В.М., Маслов В.О., Селіванов О.В., Сафронов В.В., Солонецький А.Г., ... Ніколенко А.С. Вставка кріостата для електромагнітооптичних досліджень.
7. Жарков І.П., Іващенко О.М., Сафронов В.В., Солонецький А.Г. Компактне джерело живлення надпровідних соленоїдів. *Наука та інновації*. 2010. Т. 6, № 5. С. 60–64.
8. Патент України на винахід № 87503. Жарков І.П., Іващенко О.М., Сафронов В.В., Погребняк С.В. Спосіб та пристрій для регулювання температури.
9. Патент Российской Федерации на изобретение № 2366998. Жарков И.П., Иващенко А.Н., Погребняк С.В., Сафронов В.В. Способ регулирования и стабилизации температуры и устройство для его осуществления.
10. Каленюк А.А., Ребиков А.И., Черенько С.С. Статические и динамические вольтамперные характеристики тонких сверхпроводящих пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2013. Т. 35, № 3. С. 377–387.

Стаття надійшла до редакції / Received 20.01.20

Статтю прорецензовано / Revised 26.02.20

Статтю підписано до друку / Accepted 18.03.20

Zharkov, I.P.¹, Safronov, V.V.¹, Khodunov, V.A.¹, Konoval, V.M.¹, Maslov, V.A.¹, Selivanov, A.V.¹, Solonetsky, A.G.¹, Kalenyuk, A.A.², Shapovalov, A.P.², and Shaternik, V.E.²

¹Institute of Physics, the NAS of Ukraine,
46, Nauki Ave, Kyiv, 03028, Ukraine,
+380 44 525 1220, +380 525 1589, fizyka@iop.kiev.ua

²Kurdyumov Institute for Metal Physics, the NAS of Ukraine,
36, Vernadskii Blvd., Kyiv, 03142, Ukraine,
+380 44 424 3110, metall@imp.kiev.ua

PRECISE TEMPERATURE-CONTROLLED COMPLEX OF CRYOGENIC APPARATUS FOR RESEARCHES OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF TUNNEL CONTACTS OF SUPER- CONDUCTING MATERIALS

Introduction. The study of current-voltage characteristics (CVC) and their derivatives of tunnel contacts and hybrid heterostructures based on superconducting and ferromagnetic materials under influence microwave radiations and magnet fields in the wide range of temperatures is an actual task for development of element base of spintronics, superconducting electronics (in particular, for superconductive and quantum computers) and ultrasensitive sensors.

Problem Statement. One of the modern informative physical methods for studying the properties of tunnel contacts and hybrid heterostructures based on superconducting and ferromagnetic materials is the study of CVC and their derivatives in the low temperature region (mainly liquid helium range) in a magnetic field. This includes the study of magnetoresistance, Hall effect, quantum Hall effect, in particular under the action of spin injection. To date, there is no precision complex of temperature-controlled cryogenic equipment for the study of CVC of tunnel contacts of superconducting materials, which could fully meet the needs of studying the parameters of superconducting materials.

Purpose. Development of design and manufacture of precision temperature-controlled complex of cryogenic equipment for research of CVC of tunnel contacts of superconducting materials.

Results. A complex of precision temperature-controlled cryogenic system (temperature range 2.0–300 K) has been fabricated for the study of CVC of tunnel contacts of superconducting materials. The complex is based on a liquid-flow helium cryostat with built-in superconducting solenoid (SCS) (magnetic field range 0–2.9 T) and a specialized manipulator for changing the direction of the magnetic field, with a temperature regulator, with a programmable SCS power supply, automated measuring unit of CVC and software to it.

Conclusions. The characteristics of the created cryocomplex are not inferior to the parameters of the best western analogues, and in terms of cost-effectiveness of cryoagent and service use they exceed them.

Keywords: current-voltage characteristics, tunnel contacts, superconducting heterostructures, and temperature-controlled helium cryosystem.