

**И.П. Жарков<sup>1</sup>, А.Н. Иващенко<sup>3</sup>, Э.М. Руденко<sup>2</sup>, И.В. Короташ<sup>2</sup>,  
А.А. Краковный<sup>2</sup>, В.В. Сафронов<sup>1</sup>, В.А. Ходунов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики НАН Украины, Киев

<sup>2</sup> Институт металлофизики НАН Украины, Киев

<sup>3</sup> Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев

## **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КРИОКОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛЁНОЧНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР**



Для комплексных исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых и сверхпроводниковых плёночных гетероструктур в широком температурном интервале при воздействии токовой инжекции, магнитного поля и оптического излучения был создан компьютеризированный информационно-измерительный криокомплекс (ИИК), не имеющий мировых аналогов. Предлагаемый нами криокомплекс позволяет проводить прецизионную стабилизацию температуры образцов в диапазоне  $1,6 \div 330$  К, воздействовать магнитным полем индукцией до 2 Тл, проводить измерение ВАХ с возможностью управления током «накачки», что особо важно при исследовании транзисторных структур. Программное обеспечение компьютера позволяет автоматизировать согласованную работу модулей комплекса, а также обработку, сохранение и выдачу данных измерений в удобном виде.

*Ключевые слова:* плёночные гетероструктуры, туннельный эффект в сверхпроводниках, информационно-измерительный комплекс, измерение вольт-амперных характеристик.

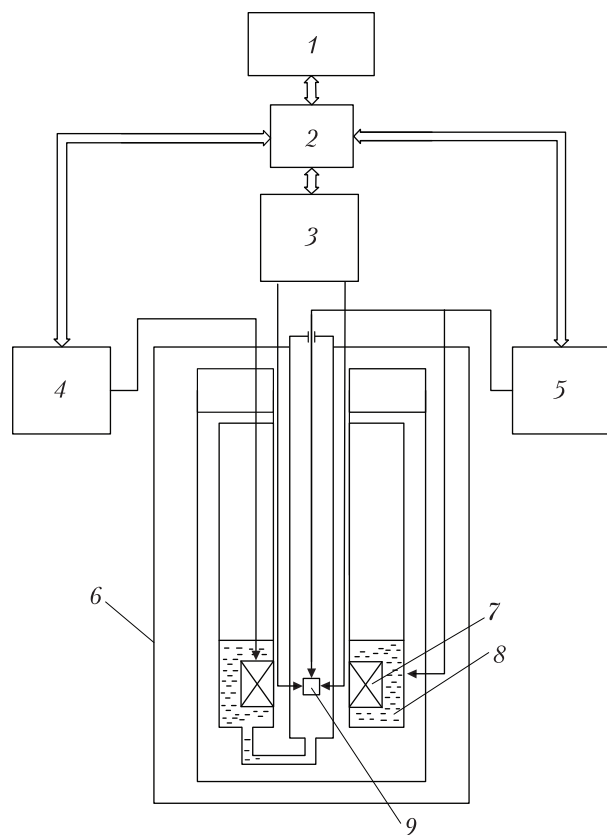
Для всестороннего изучения электрофизических свойств плёночных гетероструктур широко используются различные внешние воздействия. Это могут быть температура [1], магнитное поле [2], оптическое и СВЧ-излучения [3, 4], а также токовая электронная инжекция [5]. В связи с отсутствием аппаратуры, обеспечивающей одновременное воздействие нескольких факторов физического воздействия на исследуемый образец, нами создан информационно-измерительный криокомплекс (ИИК), позволяющий проводить измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых и сверхпроводниковых плёночных ге-

тероструктур при рабочем токе до 1500 мА, в диапазоне температур  $1,6 \div 330$  К, магнитном поле до 2 Тл. Кроме того, ИИК позволяет также воздействовать на образцы оптическим и СВЧ-излучением.

Благодаря применению современной элементной базы управление процессом измерения осуществляется от единой ПЭВМ, что дает возможность автоматизировать процедуры измерения и обработки полученных данных и снизить затраты на проведение эксперимента.

### **АППАРАТУРА**

Криокомплекс создан на базе универсальной прецизионной терморегулируемой криосистемы жидкостно-проточного типа [6,7] со встроенным сверхпроводящим соленоидом (СПС) и сменными оконными вводами [8] для



**Рис. 1.** Структурная схема ИИК: 1 – ПЭВМ; 2 – USB-сетевой концентратор типа HUB7i; 3 – система измерения ВАХ; 4 – блок управления СПС; 5 – регулятор температуры типа «Утрекс К.43»; 6 – криостат типа А298; 7 – СПС; 8 – гелиевый бак криостата; 9 – держатель исследуемого образца

воздействия на образцы оптическим излучением. Благодаря применению оригинального магнитооптического криостата со сменными оконными вводами существенно расширен спектральный диапазон исследований в магнитном поле: от ближней УФ- до дальней ИК-областей спектра. В состав ИИК входит система измерения ВАХ и подсистемы формирования влияющих факторов: температуры (регулятор температуры «Утрекс»), магнитного поля (блок управления током СПС), а также специализированный держатель исследуемого образца для подведения к нему СВЧ-излучения и электрического поля. Структурная схема ИИК представлена на рис. 1.

Установка и стабилизация температуры в рабочей камере криостата производится с помощью температурного регулятора типа «Утрекс К.43» из семейства микропроцессорных универсальных температурных регуляторов [9]. Температурный регулятор позволяет устанавливать температуру исследуемого объекта по жидкостно-проточной схеме (усовершенствованный метод Свенсона) в диапазоне  $4,2 \div 330$  К. В качестве измерительного датчика температуры в системе температурного регулирования использован термодиод, обеспечивающий измерение температуры с точностью  $\pm 0,05$  К. Для диапазона  $1,6 \div 4,2$  К применяется система откачки гелия с ручным управлением.

Воздействующий фактор магнитного поля формируется вмонтированным в криостат СПС с помощью блока управления (БУ). Блок управления представляет собой микропроцессорное устройство, обеспечивающее плавное задание тока СПС по алгоритму, исключающему срыв сверхпроводимости. Конструкции криостата (рис. 2) и СПС обеспечивают установку магнитного поля в диапазоне  $0 \div 2$  Тл.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемого образца измеряются с помощью микропроцессорной системы измерения. Принцип действия и возможности системы измерения ВАХ более подробно рассмотрены нами в работе [10].

Все электронные микропроцессорные системы с помощью сетевого концентратора типа HUB7i подключаются к USB-интерфейсу компьютера. Концентратор гальванически изолирован по физическому каналу USB, что обеспечивает минимизацию влияния сетевых помех и цифровых шумов ПЭВМ на измерения.

#### УПРОЩЕННАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА

Процедура исследований осуществляется следующим образом. Образец при помощи держателя устанавливается в терморегулируемой рабочей камере криостата, где с помощью температурного регулятора устанавливается

необходимый температурный режим. Затем в зависимости от решаемой задачи экспериментатор подводит к образцу магнитное поле, электрическое поле, оптическое, СВЧ-излучение или эти все факторы одновременно. Далее, по команде оператора система измерения производит воздействие на образец заданным током, измеряет и выводит предварительные результаты на экран ПЭВМ, а потом сохраняет данные для последующей обработки.

**Криокомплекс имеет следующие основные характеристики:**

диапазон задаваемых токов, А . . . . .	от -1,5 до +1,5
дискретность установки токов, % от граничного значения диапазона . . . . .	0,03
время установки заданного тока на образце, мкс . . . . .	не более 20
количество каналов измерения ВАХ . . . . .	2
разрядность АЦП . . . . .	14
частота дискретизации, кГц . . . . .	70
диапазон измерения напряжения, В . . . . .	от -10 до +10
ошибка измерения напряжения, % . . . . .	не более ± 0,05
диапазон рабочих температур, К . . . . .	1,6÷373 К
температурная нестабильность, К . . . . .	не более ± 0,05
максимальная индукция магнитного поля, Тл . . . . .	2
дискретность установки магнитного поля, не хуже, Тл . . . . .	0,001
ошибка измерения магнитного поля, не более, Тл . . . . .	0,0001

**РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Для демонстрации возможностей ИИК были проведены тестовые исследования. В качестве образцов мы использовали сверхпроводниковые и полупроводниковые плёночные структуры Sn-I-Pb, Mo-Re-Pb и др.

На рис. 3 представлена ВАХ туннельного контакта Sn-I-Pb при воздействии магнитных полей разной величины, параллельных плоскости контакта при температуре 2 К. В отсутствие магнитного поля на ВАХ (кривая 1) отчетливо наблюдается вертикальный участок при напряжении  $V_1$ , что соответствует сумме энергетических щелей олова и свинца при этой температуре, т. е. контакт находится в S-I-S-состоянии. При достижении магнитным полем

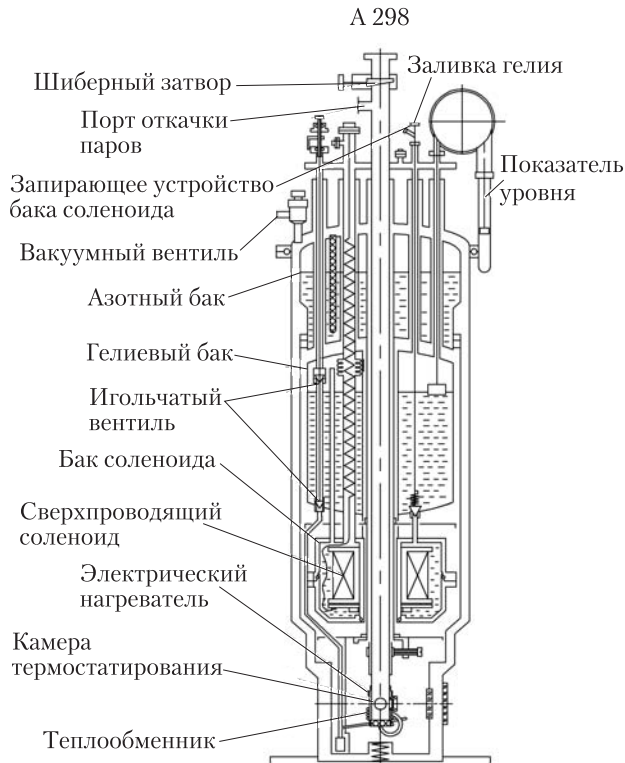


Рис. 2. Конструкция криостата

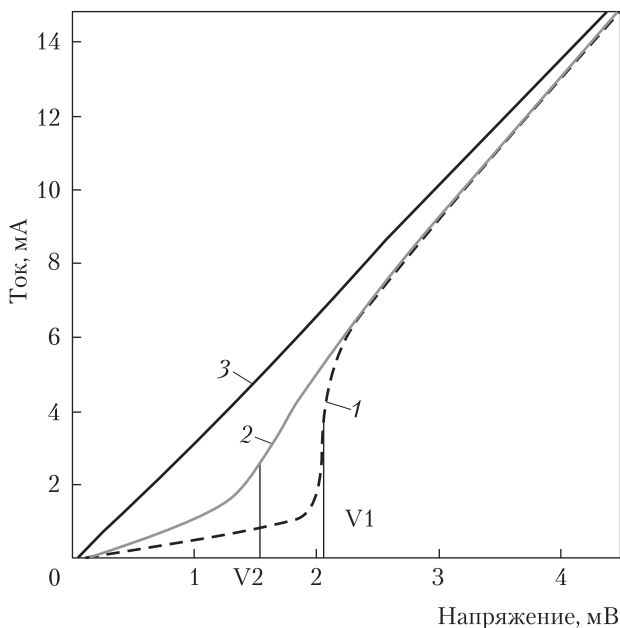


Рис. 3. ВАХ туннельного контакта Sn-I-Pb в разных магнитных полях: 1 – 0,00 Тл; 2 – 0,10 Тл; 3 – 0,17 Тл

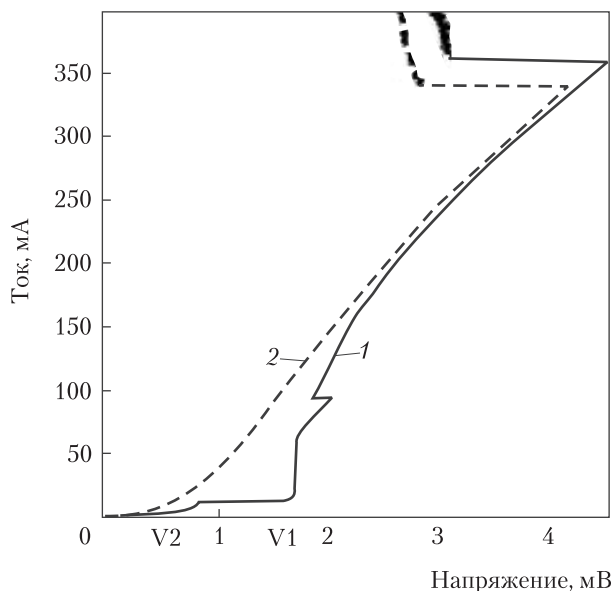


Рис. 4. ВАХ туннельного контакта Sn–I–Pb при разных температурах: 1 – 4,2 К; 2 – 3,0 К

величины 0,1 Тл плёнка олова переходит в нормальное состояние, и мы наблюдаем N–I–S-состояние контакта, имеющего ВАХ (кривая 2) с плавной нелинейностью при напряжении смещения  $V_2$ , соответствующему энергетической щели свинца. Дальнейшее повышение индукции магнитного поля до 0,17 Тл делает ВАХ омической (кривая 3), что указывает на исчезновение сверхпроводимости в плёнке свинца. Следует обратить внимание, что магнитные поля, параллельные поверхности плёнки, при которых исчезает сверхпроводимость, намного превышают термодинамические магнитные поля олова и свинца (0,03Т и 0,08Т соответственно).

На рис. 4 представлены ВАХ низкоомного туннельного контакта Sn–I–Pb при разных температурах. При температуре 4,2 К, которая выше температуры сверхпроводящего перехода  $T_c^{\text{Sn}}$  олова, наблюдаются ВАХ типа N–I–S (кривая 1). На ней имеется нелинейность с перегибом при напряжении, соответствующем энергетической щели свинца  $\Delta_{\text{Pb}}$ . Кроме того, наблюдается скачок напряжения в сторону меньших значений при напряжениях, намного

больше  $\Delta_{\text{Pb}}/e$ . Так как контакт имеет очень низкое удельное сопротивление  $R_T \cdot A = 5 \cdot 10^{-6} \times \text{Ом} \cdot \text{см}^2$ , то туннельный ток имеет большую плотность и переводит сверхпроводники в неравновесное состояние. В неравновесном сверхпроводнике может возникать когерентная неустойчивость, приводящая к возникновению неоднородного состояния и к скачку напряжения на ВАХ туннельного контакта, что и наблюдается в нашем случае. При понижении температуры ниже  $T_c^{\text{Sn}}$  мы имеем дело с контактом типа  $S_1$ –I– $S_2$ . На ВАХ (кривая 2) хорошо видны особенности при напряжениях смещения  $V_1$  и  $V_2$ , соответствующих полусумме,  $(\Delta_1 + \Delta_2)/2$ , и полуразности,  $(\Delta_1 - \Delta_2)/2$ , энергетических щелей электродов соответственно. Кроме того, наблюдаются два участка с отрицательным скачком напряжения. Их можно связать с возникновением когерентной неустойчивости сначала в плёнке олова, а затем свинца. По значениям напряжений, при которых наблюдаются их скачки, можно провести важную оценку коэффициента перепоглощения неравновесных фононов в плёнке свинца и критической концентрации избыточных квазичастиц, приводящей к неустойчивости неравновесного сверхпроводящего состояния.

## ВЫВОДЫ

Разработан оригинальный информационно-измерительный комплекс, позволяющий проводить автоматизированные измерения ВАХ образцов новых материалов с возможностью одновременного управляемого воздействия на них температуры в диапазоне 1,6÷330 К, магнитного поля в диапазоне 0÷2 Тл, тока накачки 0÷1,5 А и оптического излучения.

Проведенные тестовые измерения плёночных гетероструктур продемонстрировали широкие возможности использования созданного ИИК для научных исследований.

*Работа выполнена в рамках программы научного приборостроения НАН Украины, грант П-9/40.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Poli N., Morten J. P., Urech M., Brataas A., Havilaod D.B., and Korenivski V.* Spin Injection and Relaxation in a Mesoscopic Superconductor // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — **100**. — С. 136601—136605.
2. *Meservey R. and Tedrow P. M.* Spin-polarized electron tunneling // *Phys. Rep.* — 1994. — **238**, № 4. — С. 173—243.
3. *Головашкин А.И., Иваненко О.Н., Мицен К.В., Мотулевич Г.П., Шубин А.А.* Температурная зависимость критической мощности оптической накачки неравновесных сверхпроводников // *ЖЭТФ.* — 1978. — **75**, № 4. — С. 1517—1519.
4. *Дмитриев В.М., Христенко Е.В.* Индуцирование и стимулирование сверхпроводимости внешним электромагнитным излучением // *Физика низких температур.* — 1978. — **4**, № 7. — С. 821—856.
5. *Rudenko E.M., Nevircovets I.P.* Superconducting tunnel phonon pumping device. *Supercond // Sci Technol.* — 1992. — **5**. — С. 402—403.
6. *Медведев В.С., Ермаков В.М., Водолазский П.В. и др.* Терморегулируемое криостатное устройство. — А. с. СССР № 436334, МКИ G05d 23/30, G 05d 16/06 // *Бюлл. изобретений СССР*, (15.07.74). — № 26. — С. 126.
7. *Zharkov I.P., Ermakov V.M., Safronov V.V., Tchmul A.G.* The special multi-purpose cryostat for biological low temperatures studies // *Вестник ХГУ.* — 1999. — № 434. — сер. Биофиз. вестник, вып. 3. — С.125.
8. *Жарков І.П., Єрмаков В.М. Сафронов В.В., Чмуль А.Г.* Терморегульований криостатний пристрій // Патент України на корисну модель. — № 18778. МПК G05D 23/30 // *Бюл.* №11. 15.11.2006.
9. *Жарков І.П., Иващенко А.Н., Погребняк С.В., Сафронов В.В.* Способ регулирования и стабилизации температуры и устройство для его осуществления // Патент Российской Федерации на изобретение. — № 2366998 10.09.2009 г.
10. *Жарков І.П., Иващенко А.Н., Сафронов В.В.* «Информационно-измерительная система для туннельной спектроскопии» // *Наука та інновації.* — 2010. — **6**, № 3. — С. 47—52.

*І.П. Жарков, О.М. Іващенко, Е.М. Руденко, І.В. Коротаєв, А.О. Краковий, В.В. Сафронов, В.О. Ходунов*

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КРІОКОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛІВКОВИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Для комплексних досліджень вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових та надпровіднико-

вих плівкових гетероструктур в широкому температурному інтервалі при дії струмової інжекції, магнітного поля та оптичного випромінювання було створено комп'ютеризований інформаційно-вимірвальний кріокомплекс (ІВК), який не має світових аналогів. Пропонований нами кріокомплекс дозволяє проводити прецизійну стабілізацію температури зразків в діапазоні 1,6÷330 К, впливати магнітним полем індукцією до 2 Тл, проводити вимірювання ВАХ з можливістю управління струмом «накачки», що особливо важливо при дослідженні транзисторних структур. Програмне забезпечення комп'ютера дає можливість автоматизувати узгоджену роботу модулів комплексу, а також обробку, збереження та подачу даних вимірювань в необхідному вигляді.

*Ключові слова:* плівкові гетероструктури, тунельний ефект в надпровідниках, інформаційно-вимірвальний комплекс, вимірювання вольт-амперних характеристик.

*I.P. Zharkov, O.M. Ivashchenko, E.M. Rudenko, I.V. Korotash, A.O. Krakovnyy, V.V. Safronov, V.O. Khodunov*

INFORMATIONAL MEASURING CRYOCOMPLEX FOR FILM HETEROSTRUCTURES

For complex investigations of voltage-current characteristics of semiconductor and superconductor film heterostructures in a wide temperature interval at with influence of current injection, magnetic-field, and also optical radiation, was created computerized informational measuring cryocomplex (IMC). IMC allows to realize the precise stabilizing of temperature of samples in a range from 1,6 to 373 K, to influence the magnetic field by induction to 2 T, to conduct measuring volt-ampere characteristic with possibility of management by a «pumping current», that is especially important at researching of transistor structures. Personal computer software allows to automatize the concerted work of the modules of complex, and also processing, saving and presenting of these measuring data. The work is carried out within the framework of the Program of scientific instrument making of NAS of Ukraine, grant P-9/40.

*Key words:* film heterostructures, tunnel effect in superconductors, informational measuring complex, volt-ampere characteristics measuring.

Надійшла до редакції 23.12.10