

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 538.941+ 53.082.25

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ НА
ПОВЕРХНОСТИ СЛОЯ ЖИДКОГО ${}^4\text{He}$ В НОРМАЛЬНОМ И
СВЕРХТЕКУЧЕМ СОСТОЯНИЯХ

©2024 г. А. А. Левченко^а, Л. П. Межов-Деглин^а, И. А. Ремизов^а,
П. Г. Селин^{а,*}, М. Р. Султанова^а

*Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна Российской академии наук
Россия, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, 2*

**e-mail: selin@issp.ac.ru*

Поступила в редакцию 26.06.2024 г.

После доработки 26.07.2024 г.

Принята к публикации 15.10.2024 г.

Описана конструкция установки, предназначенной для исследования особенностей взаимодействия вихревых течений, генерируемых капиллярно-гравитационными волнами на поверхности жидкого гелия ${}^4\text{He}$ в нормальном и сверхтекучем состояниях, с инжектированными зарядами. Приведен пример результатов изучения влияния порождаемых волнами вихревых течений в слое сверхтекучего гелия He-II глубиной 2.5 см при температурах $T \geq 1.5$ К на распределение токов отрицательных ионов по пяти сегментам погруженного в жидкость приемного коллектора.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно (см., например, [1–8]), что инжектированный в жидкий ${}^4\text{He}$ свободный электрон локализуется в объеме жидкости в вакуумной полости – электронном пузырьке радиусом около 17 \AA при давлении насыщенных паров. Эти отрицательно заряженные наночастицы (отрицательные ионы) можно попытаться использовать в качестве пробных частиц при изучении не только классической, но и квантовой турбулентности, порождаемой нелинейными капиллярными волнами на поверхности сверхтекучего He-II (квантовой бозе-жидкости [3, 7, 9, 10–13]).

Как было показано ранее (см., например, [3, 4]), при возбуждении квантовых вихрей в сверхтекучем He-II, охлажденном ниже температуры 1.0 К, отрицательные ионы локализуются вблизи кора вихря. Энергия связи электронного пузырька с вихревой нитью (глубина потенциальной ямы U_q) составляет $U_q \approx 50$ К, и в слабых электрических полях напряженностью $E \leq 30$ В/см можно наблюдать движение в жидкости заряженных клубков

квантовых вихрей. С повышением температуры He-II до 1.65 К энергия связи отрицательных ионов с квантовыми вихрями сначала плавно уменьшается в несколько раз, а затем резко падает в узком интервале температур 1.65 – 1.70 К, так что при температурах выше 1.7 К энергия связи $U_q \leq 2$ К и отрицательные ионы, которые движутся в объеме He-II под влиянием приложенного электрического поля, практически не захватываются квантовыми вихрями.

В работе [14] было показано, что нелинейное взаимодействие между неколлинеарными капиллярными волнами, распространяющимися на поверхности слоя жидкости, приводит к генерации вихревого течения под поверхностью слоя. Мы воспользовались методикой, описанной в этой статье, для возбуждения вихревых течений на поверхности слоя гелия как в нормальном He-I, так и в сверхтекучем He-II состояниях [15–18].

Во втором разделе описана конструкция установки, предназначенной для изучения особенностей взаимодействия вихревых течений, генерируемых капиллярно-гравитационными волнами на поверхности жидкого ^4He , с инжектированными зарядами. Там же приведена методика измерений. В третьем разделе показан один из результатов тестовых испытаний работоспособности установки. В заключении кратко подведены итоги проделанной работы.

2. КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема размещения основных узлов установки в объеме вакуумной полости оптического криостата приведена на рис. 1а. Рядом показана фотография металлического гелиевого криостата [16], снабженного плоскими оптическими окнами из кварцевого стекла 7 (рис. 1б). Вертикально ориентированный цилиндрический контейнер 1, в котором расположена рабочая ячейка, крепится на четырех медных хладопроводах 6 (рис. 1а) в вакуумной полости криостата. Контейнер 1 окружен холодным медным экраном 5, прикрепляемым к медному кольцу на дне гелиевой ванны криостата. Гелиевый экран окружен азотным экраном 4, который крепится на стенках азотной ванны криостата. Плоские кварцевые окна, установленные на азотном и гелиевом экранах, и наружные вакуумно-плотные окна 7, которые крепились на цилиндрических выносных тубусах, приваренных к обечайке криостата (7 на рис. 1б), позволяют следить за движением уровня жидкого гелия в объеме рабочей ячейки.

Методика регистрации волн, возбуждаемых колеблющимися плоскими волнопродукторами на поверхности слоя гелия в рабочей ячейке, подробно описана в работе [17]. Направленный на поверхность слоя жидкости лазерный луч от расположенного снаружи источника света 9 на рис. 1а отражался от свободной поверхности слоя и попадал на оптический датчик 10 на рис. 1а, выход которого был подсоединен к наружной компьютеризированной системе регистрации и обработки

результатов измерений. По амплитуде колебаний отраженного луча можно было судить об амплитуде колебаний волн, возбуждаемых на поверхности жидкости.

Рис. 1. а – Схема криогенной части установки... **б** – фотография криостата

Конструкция рабочей ячейки, которая размещена внутри вертикально ориентированного цилиндрического контейнера, показана на рис. 2в. Изготовленный из нержавеющей стали контейнер 1 внутренним диаметром 150 мм и высотой 100 мм (толщина стенок 3 мм) снабжен прижимным прозрачным верхним окном 2 толщиной 3 мм, изготовленным из плавленного кварца. Для вакуумно-плотного соединения кварцевого окна 2 с верхним фланцем контейнера, а также прижимного медного диска 3 с нижним фланцем, как и окон 7 на рис. 2а, использовались пластичные индиевые колечки. Контейнер окружен холодным экраном (рис. 1а) и соединен с дном гелиевой ванны криостата с помощью четырех медных стержней, которые служили одновременно хладопроводами. Газообразный ^4He конденсировался в контейнер из наружного транспортного сосуда Дьюара через капилляр набора (на рис. 2в указано место ввода капилляра в контейнер), который проходил предварительно через гелиевую ванну криостата и был снабжен мелкопористым медным фильтром для предотвращения попадания посторонних твердых взвесей в объем ячейки. Набор жидкости производился до тех пор, пока поверхность жидкости не достигала края боковых граней ячейки (уровень жидкости регистрировался с точностью порядка 0.1 мм). Температура жидкого гелия в ванне криостата и, соответственно, в объеме контейнера и рабочей ячейки понижалась до 1.5 К путем откачки паров жидкого гелия из ванны внешним насосом. Изменения температуры жидкого гелия в рабочей ячейке контролировались с помощью полупроводникового термометра, установленного на наружной стенке контейнера, как показано на рис. 2в.

Рис. 2. а – Эскиз контейнера с экспериментальной ячейкой; **б** – схема экспериментальной ячейки; **в** – фотография ячейки в объеме контейнера

Показанная схематически на рис. 2а, б рабочая ячейка крепилась внутри контейнера на восьми вертикальных латунных шпильках высотой 70 мм и диаметром 3 мм. Шпильки были предварительно ввинчены в специально выточенный кольцевой пояс в нижней части контейнера. Как видно на рис. 2б, рабочая ячейка представляла собой прямоугольный параллелепипед внутренними размерами $50 \times 50 \times 30$ мм³. Закрепленные на шпильках плоские боковые грани и дно ячейки были изготовлены из листового дюралюминия толщиной 2 мм. Все металлические грани были электрически изолированы от шпилек и друг от друга кварцевыми шайбами. Верхняя грань ячейки 4 (рис. 2а) была изготовлена из кварцевого стекла. На нижнюю поверхность кварцевой грани была заранее напылена полупрозрачная металлическая пленка. При проведении измерений расстояние от поверхности жидкого гелия

в ячейке до нижней поверхности кварцевой грани составляло 3 мм. Радиоактивный источник инжектированных зарядов в гелии 11 (пленка из тритида титана на металлической подложке) установлен на одной из вертикальных боковых граней ячейки (рис. 2а). Диаметр источника 3 мм, средняя энергия излучаемых источником β -частиц близка к 5 кэВ, максимальная примерно равна 18 кэВ. Под действием облучения в слое жидкости глубиной порядка 10 мкм вблизи источника зарядов образовывалась плазма из свободных электронов и положительно заряженных гелиевых ионов. Прикладывая отрицательные напряжения к грани, на которой установлен источник, можно было инжектировать отрицательные заряды в объем жидкого гелия.

В серии первых экспериментов [15] источник зарядов был установлен на противоположной приемному коллектору грани. При модернизации установки мы переместили источник на смежную грань [18]. Изменение расположения источника позволило получить более однородную конфигурацию поля и увеличить напряженность поля вблизи источника зарядов, что, в свою очередь, позволило увеличить поток зарядов, приходящих на коллектор. Коллектор 10 (рис. 2а, б) был изготовлен из листа фольгированного стеклотекстолита с медным покрытием. Внешняя сторона коллектора была приклеена к дюралюминиевой грани клеем БФ-4 и электрически изолирована от металлической грани. На медном покрытии были заранее вытравлены 4 дорожки шириной 1 мм. Таким образом, приемный коллектор состоял из пяти электрически изолированных друг от друга вертикально ориентированных приемных сегментов линейными размерами 9×30 мм², на поверхность которых перед сборкой ячейки дополнительно была напылена золотая пленка.

Каждый сегмент коллектора был подключен к независимому усилителю тока (рис. 3). Устройство усилителей тока описано в работе [19]. При проведении экспериментов суммарный коллекторный ток при различных конфигурациях поля не превышал 5000 фА. Все электрические провода, которые соединяли детали, расположенные внутри контейнера 1 (рис. 1а) с наружными усилителями тока и источниками напряжений системы управления и сбора данных экспериментов, проходили через герметичные разъемы со стеклянной изоляцией, которые располагались на дне контейнера 3 (рис. 2а).

Рис. 3. Электрическая блок-схема установки

Для возбуждения взаимно перпендикулярных волн на свободной поверхности жидкости в ячейке использовались два плоских металлических плунжера [14, 15, 18] (волнопродукторы 8 на рис. 2), основания которых были закреплены на нижней части двух смежных боковых граней. Характерные размеры плунжеров $1 \times 3 \times 40$ мм³. Плунжеры располагались на расстоянии 3 мм от поверхности грани. Каждый плунжер приводился в движение своим электромагнитным приводом, переменное синусоидальное напряжение на который подавалось от двухканального функционального генератора (см. схему на рис. 3). Разность фаз

между поступающими на плунжеры переменными напряжениями составляла 90° . Катушка, управляющая движением плунжера, была установлена в специальном углублении (кармане) на боковой стенке контейнера 7 (рис. 2в), а на ножке плунжера напротив катушки клеем БФ-4 был закреплен кубик из неодимового магнита 9 (рис. 2а). Плунжеры совершали возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости вдоль поверхности слоя жидкого гелия. Частота накачки привода f_g в разных экспериментах составляла $f_g = 20\text{--}50$ Гц. Как и в работе [17], амплитуда и крутизна генерируемых на поверхности жидкости волн оценивалась по результатам измерений амплитуды колебаний отраженного от поверхности жидкости в ячейке лазерного луча (лазер и приемный детектор располагались снаружи, напротив окон криостата, как показано на рис. 1). По нашим оценкам в большинстве проведенных измерений при накачке на частоте $f_g = 49.9$ Гц амплитуда стоячих капиллярных волн достигала $H \approx 0.02$ мм, крутизна волны достигала $kH \approx 0.06$, где k – волновой вектор.

Как показано на рис. 3, коллекторные токи, регистрируемые каждым из пяти сегментов коллектора, проходят через независимые усилители тока, далее поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), и затем оцифрованный сигнал через шину PCI (peripheral component interconnect) поступает в память компьютера.

Постоянное электрическое напряжение, которое прикладывалось к разным граням параллелепипеда (рис. 2б), поступало от пяти независимых источников постоянного напряжения с общей землей [20]. Значения напряжений на каждой грани ячейки можно было менять от нуля до -450 В, тем самым создавая различные конфигурации приложенного электрического поля, при которых отрицательные ионы двигались в объеме жидкого гелия от источника зарядов к приемному коллектору.

Регулировкой распределения напряжений на нижней U_{down} и верхней U_{up} гранях ячейки можно было задавать величину и направление перпендикулярной составляющей приложенного электрического поля $E_{\perp} \sim \Delta U_{\perp} / L = |U_{\text{down}} - U_{\text{up}}| / L$, где $L = 3$ см – глубина слоя жидкости в ячейке. Это позволяло “прижимать” движущиеся в жидкости от источника к коллектору инжектированные заряды к свободной поверхности жидкости или ко дну ячейки, чтобы усилить (или свести к минимуму) влияние вихревых течений, порождаемых волнами на поверхности слоя, на распределение токов по различным сегментам приемного коллектора. Выходные сигналы с усилителей тока $I_i(t)$ ($i = -2, -1, 0, +1, +2$) оцифровывались с помощью АЦП и записывались в память компьютера (рис. 3). Для выделения постоянной составляющей тока $I_i(t)$ на фоне наводок от переменных полей, возникающих при включении колебаний плунжеров, регистрируемые зависимости $I_i(t)$ подвергались фурье-фильтрации на низких частотах.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

На рис. 4 приведен пример результатов тестовых испытаний работоспособности установки, который иллюстрирует, как изменяется с повышением температуры жидкости от 1.5 до 2.19 К распределение токов отрицательных ионов по пяти сегментам приемного коллектора $I_i(T)$ и полный ток коллектора $I_{\text{sum}}(T)$ при выключенной (пунктирные кривые) и включенной (сплошные кривые) волновой накачке на частоте $f_g = 49.9$ Гц. Длина капиллярной волны, возбуждаемой на поверхности слоя жидкости, $\lambda \approx 0.2$ см, крутизна капиллярных волн $kH \approx 0.05$.

Рис. 4. Сплошные кривые описывают зависимость от температуры токов отрицательных ионов, регистрируемых центральными сегментами, при включенной волновой накачке; пунктирные кривые – в отсутствие накачки

Величина и распределение приложенных к граням рабочей ячейки постоянных напряжений при выключенной и включенной накачке одинаковы: напряжение на источнике $U_{\text{source}} = U_{s2} = -100$ В, на боковой, противоположной источнику грани напряжение $U_{s1} = 0$, напряжение на верхней грани $U_{\text{up}} = -50$ В, а на нижней $U_{\text{down}} = -100$ В. Коллектор находится под нулевым потенциалом. Движущиеся от источника зарядов к коллектору отрицательные ионы прижимаются вертикальной составляющей приложенного электрического поля к свободной поверхности слоя жидкости $E_{\perp} \sim |U_{\text{down}} - U_{\text{up}}|/L \sim 17$ В/см.

Видно, что при плавном повышении температуры предварительно охлажденного слоя He-II от 1.5К до 2.19 К распределение токов отрицательных ионов по сегментам приемного коллектора при включенной волновой накачке сильно изменяется в узком интервале температур вблизи 1.7 К в отличие от распределения токов по сегментам в отсутствие накачки. Это может быть связано с тем, что при температурах вблизи 1.7 К вероятность захвата движущихся в слабом продольном электрическом поле электронных пузырьков квантовыми вихрями, порождаемыми неколлинеарными капиллярными волнами, экспоненциально уменьшается по сравнению с вероятностью захвата электронных пузырьков квантовыми вихрями при температурах He-II ниже 1.7 К [8], т.е. инжектированные в сверхтекучий гелий отрицательные ионы могут служить пробными частицами – трассерами для обнаружения квантовых вихрей в He-II.

При температурах выше 1.7 К, где захватом отрицательных ионов квантовыми вихрями можно пренебречь, основную роль должно играть упругое рассеяние инжектированных зарядов на вихревых структурах, например валах завихренности, которые формируются в объеме нормальной компоненты He-II так же, как и в объеме He-I при $T > T_{\lambda}$, в результате взаимодействия между обычными, классическими вихрями, порождаемыми нелинейными волнами на поверхности слоя жидкости [10, 11], а также рассеяния на клубках квантовых

вихрей, возникающих в объеме сверхтекучей компоненты He-II в результате сильного взаимодействия (трения) между нормальной и сверхтекучей компонентами при температурах выше 1 К.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка, конструкция которой описана в данной статье, позволяет возбуждать капиллярно-гравитационные волны на поверхности жидкого ^4He и изучать взаимодействие инжектированных в жидкий гелий отрицательных зарядов (электронных пузырьков) с вихрями, порождаемыми этими волнами, в широком интервале температур от 4 до 1.5 К. Существенные изменения в распределении токов отрицательных ионов по центральным сегментам приемного коллектора при плавном повышении температуры слоя жидкости в узком интервале вблизи 1.7 К при включенной волновой накачке (рис. 4) могут быть связаны с изменением механизма взаимодействия электронных пузырьков с квантовыми вихрями. Это позволяет утверждать, что, нелинейные капиллярные волны, распространяющиеся на поверхности сверхтекучей жидкости, возбуждают не только классические, но и квантовые вихри, т.е. разработанная и изготовленная нами установка пригодна для изучения как классической, так и квантовой турбулентности в сверхтекучем He-II.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны А.В. Лохову за помощь в создании и тестировании установки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ИФТТ РАН.

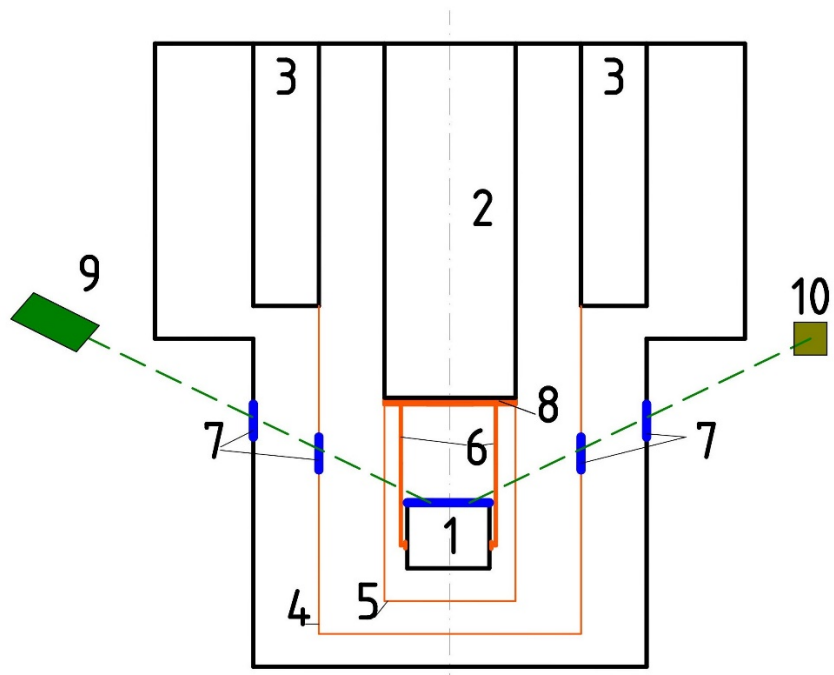
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шикин В.Б. // УФН. 1977. Т. 121. С. 457.
2. Шикин В. Б., Монарха Ю.П. Двумерные заряженные системы в гелии. Москва: Наука, 1989.
3. Glaberson W.I., Strayer D.M., Donnelly R.J. // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 20. P. 1428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.20.1428>
4. Pratt W.P., Zimmermann W., Jr. // Phys. Rev. 1969. V. 177. P. 412. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.177.412>
5. Кешишев К.О., Ковдря Ю.З., Межов-Деглин Л.П., Шальников А.И. // ЖЭТФ. 1969. Т. 56. С. 94.
6. Aitken F., Bonifaci N., von Haefen K., Eloranta J. // J. Chem. Phys. 2016. V. 145. P. 044105. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4959293>

7. *Aitken F., Bonifaci N., Mendoza-Luna L.G., von Haefenb K.* // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015. V. 17. P. 18535. <https://doi.org/10.1039/C5CP02539G>
8. *Walmsley P.M., Levchenko A.A., Golov A.I.* // *Journal of Low Temperature Physics.* 2006. V. 145. P. 143. <https://doi.org/10.1007/s10909-006-9235-3>
9. *Андреев А.Ф., Компанеев Д.А.* // *ЖЭТФ.* 1971. Т. 61. С. 2459.
10. *Borghesani A.F.* // *International Series of Monographs on Physics.* 2007. V. 137. P. 560.
11. *Walmsley P.M., Golov A.I., Hall H.E., Levchenko A.A., Vinen W.F.* // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99. P. 265302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.265302>
12. *Eltsov V.B., de Graaf R., Hänninen R., Krusius M., Solntsev R.E., L'vov V.S., Golov A.I., Walmsley P.M.* // *Progress in Low Temperature Physics: Quantum Turbulence.* V. 16. P. 46. [https://doi.org/10.1016/S0079-6417\(08\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6417(08)00002-4)
13. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика, Москва: Наука, 1986.
14. *Filatov S.V., Parfenyev V.M., Vergeles S. S., Brazhnikov M.Yu., Levchenko A.A., Lebedev V.V.* // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 054501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.054501>
15. *Remizov I.A., Sultanova M.R., Levchenko A.A., Mezhev-Deglin L.P.* // *Low Temp. Phys.* 2021, V. 47. P. 378. <https://doi.org/10.1063/10.0004229>
16. *Думе А.Ф., Межов-Деглин Л.П., Ревенко В.И.* // *ПТЭ.* 1979. № 6. С. 160.
17. *Brazhnikov M.Yu., Levchenko A.A., Mezhev-Deglin L.P.* // *ИЕТ.* 2002. V. 45. № 6. P. 31. <https://doi.org/10.1023/A%3A1021418819539>
18. *Султанова М.Р., Ремизов И.А., Межов-Деглин Л.П., Левченко А.А.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2023. Т. 118. С. 596. <https://doi.org/10.31857/S1234567823200089>
19. *Ремизов И.А., Межов-Деглин Л.П., Султанова М.Р.* РФ Патент 2754201, 2021.
20. *Ремизов И.А., Межов-Деглин Л.П., Султанова М.Р.* РФ Патент 2783476, 2021.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1. а** – Схема криогенной части установки: 1 – цилиндрический контейнер, 2 – гелиевая ванна криостата, 3 – азотная ванна, 4 – азотный экран, 5 – гелиевый экран, 6 – медные хладопроводы, 7 – кварцевые оптические окна, 8 – дно гелиевой ванны криостата, 9 – гелиевый лазер, 10 – полупроводниковый болометр, **б** – фотография криостата.
- Рис. 2. а** – Эскиз контейнера с экспериментальной ячейкой; **б** – схема экспериментальной ячейки; **в** – фотография ячейки в объеме контейнера: 1 – цилиндрический контейнер, 2 – прижимное прозрачное окно из кварцевого стекла, 3 – медный диск, 4 – прозрачная верхняя грань рабочей ячейки, 5 и 6 – нижняя грань и вертикальные боковые грани ячейки, 7 – электромагнитная катушка, 8 – плунжеры, 9 – неодимовый магнит, 10 – принимающий пятисегментный коллектор, 11 – источник зарядов, 12 – медные втулки для крепления хладопроводов, 13 – шайба для крепления резистивного термометра, 14 – ввод капилляра системы заполнения контейнера холодным ^4He .
- Рис. 3.** Электрическая блок-схема установки.
- Рис. 4.** Сплошные кривые описывают зависимость от температуры токов отрицательных ионов, регистрируемых центральными сегментами -1 (зеленая кривая) и 0 (сиреневая кривая) приемного коллектора при включенной волновой накачке на частоте $f_g = 49.88$ Гц. Токи, регистрируемые сегментами -2, 1 и 2, малы и слабо зависят от температуры. Синяя кривая описывает зависимость от температуры суммарного тока приемного коллектора I_{sum} .



a)



б)

Рис. 1.

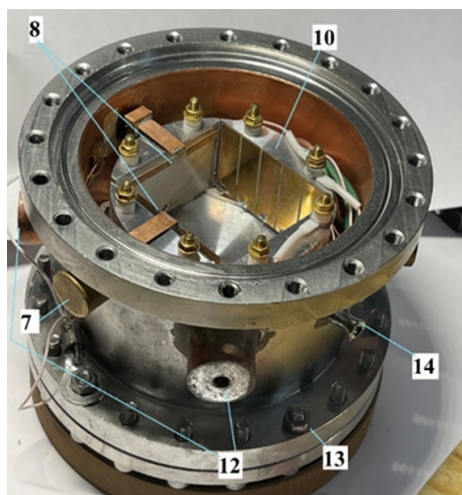
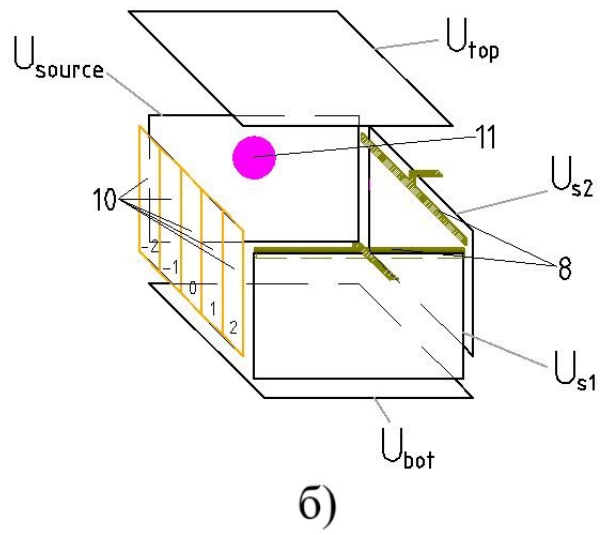
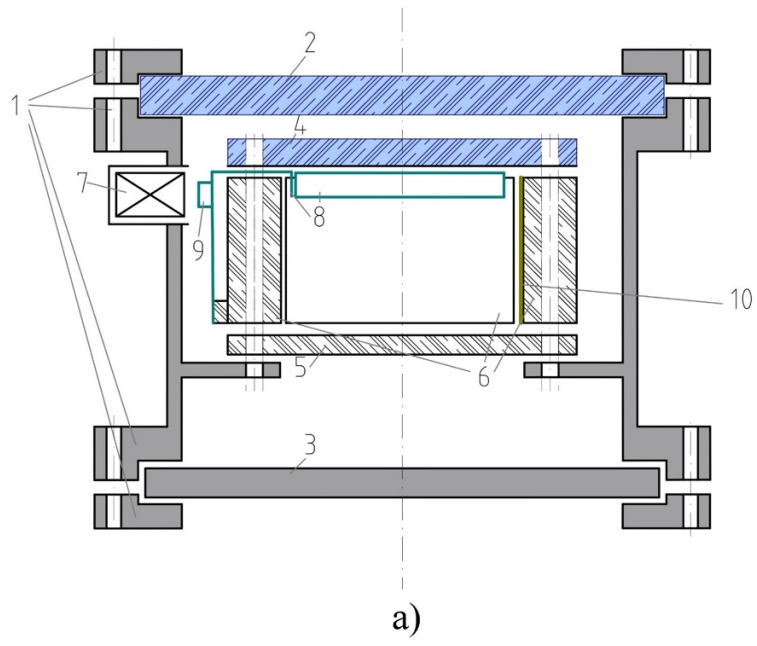


Рис. 2.

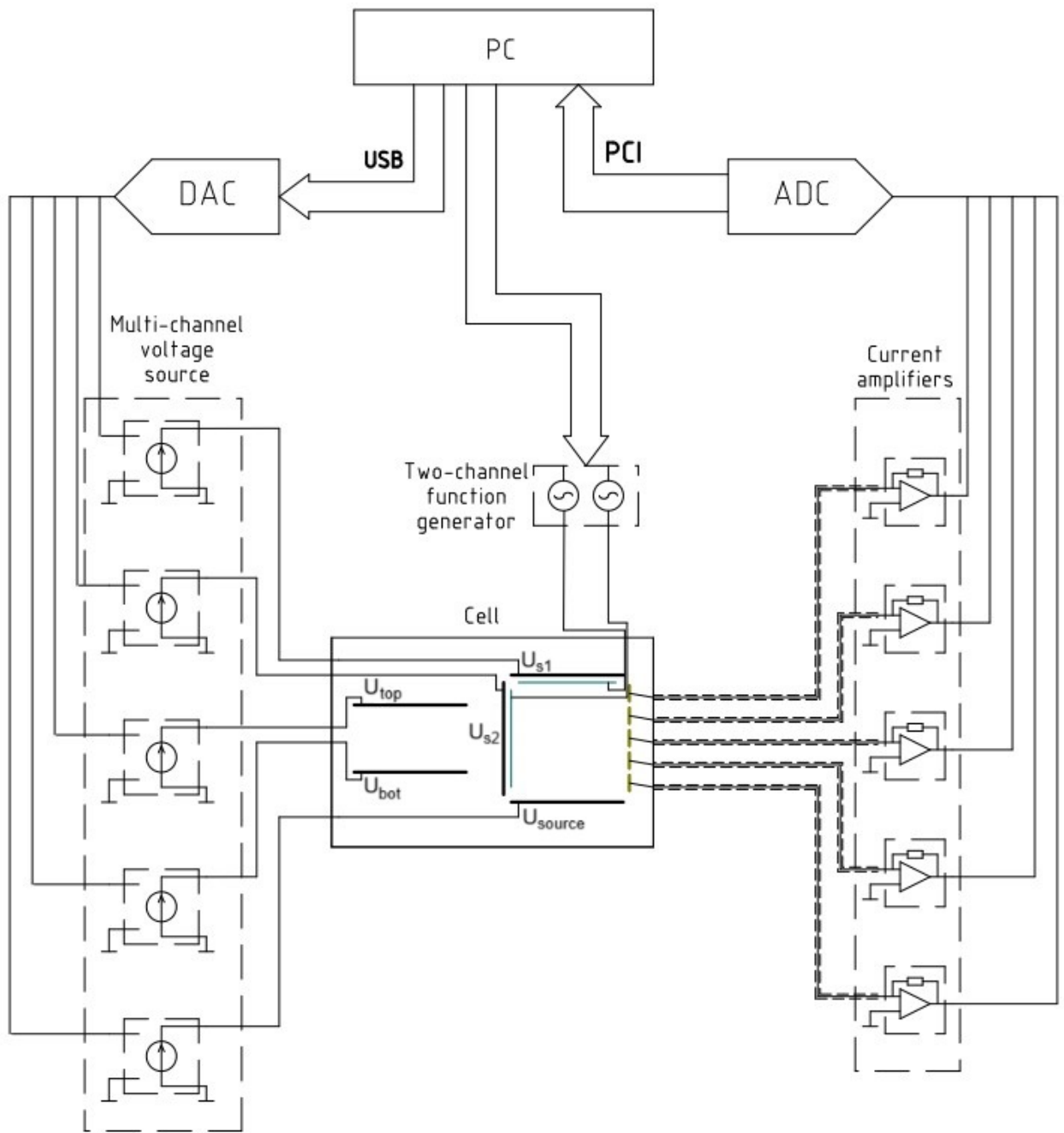


Рис. 3.

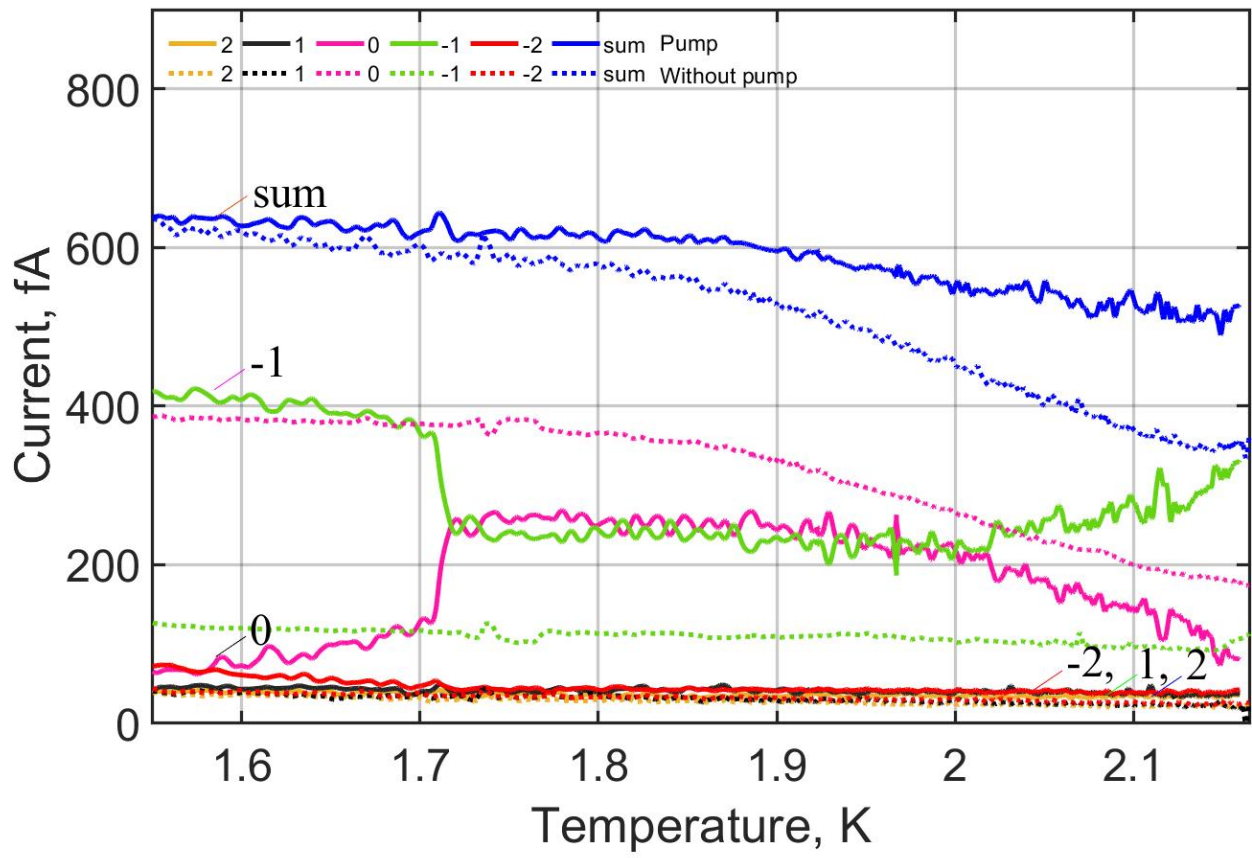


Рис. 4.

