

УДК 536.581.3

РЕФРИЖЕРАТОР ГЛУБОКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СУБТЕРАГЕРЦЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2024 г. А. С. Марухно^а, *, В. С. Эдельман^б, **

^аИнститут прикладной физики Российской академии наук
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

^бИнститут физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук
Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2

*e-mail: a.maruhno@ipfran.ru

**e-mail: vsedelman@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.07.2024 г.

После доработки 15.07.2024 г.

Принята к публикации 11.09.2024 г.

Описан криостат растворения, предназначенный для проведения в сумеречное время, когда наблюдение в оптическом диапазоне еще невозможно, работу в миллиметровом диапазоне на оптическом телескопе с зеркалом диаметром 6м. Криостат, охлаждающий детектор вплоть до температуры 0.1К, построен по схеме растворения ^3He в ^4He с циркуляцией ^3He благодаря его конденсации на холодной стенке, охлаждаемой сорбционной откачкой чистого жидкого ^3He из отдельного объема. Рабочие условия обеспечиваются контактом со стабилизирующим блоком, в котором накапливается 0.6 л жидкого ^4He при активной работе рефрижератора Гиффорда–Мак-Магона за время между циклами измерений. Во время измерений рефрижератор выключается, что полностью исключает вибрации, мешающие измерениям.

DOI: 10.31857/S0032816224050244 EDN: EQUZUA

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования наземной астрономии в субтерагерцевом (субТГц) диапазоне частот проводят такие крупнейшие центры, как Европейская южная обсерватория [1] и Восточноазиатская обсерватория [2]. В России развитие этого направления предусмотрено постановлением правительства № 3684р. В нем сформулированы актуальные задачи фундаментальной науки: исследование холодной Вселенной, реликтового излучения, межзвездных газовых облаков. Исследования в этой области могут способствовать решению задач в прикладных военных, промышленных и коммерческих проектах по развитию, например радиолокации и телекоммуникационных систем. Данный диапазон частот технически недостаточно освоен,

практически отсутствуют адекватные задачам промышленные антенные системы, приемная аппаратура с шумами на уровне 10^{-17} Вт/Гц^{1/2} и ниже, оптические окна с подавлением инфракрасного излучения. Введение жестких санкционных ограничений требует развития отечественных научно-исследовательских работ в этом направлении.

Цель нашей работы – внести вклад в разработку первого прототипа Российской субТГц-обсерватории [3] на основе оптического Большого альта-азимутального телескопа (БТА) [4]. Этот крупнейший в Евразии оптический телескоп расположен в месте с приемлемым астроклиматом на высоте 2070 м. Он обладает развитой инфраструктурой, квалифицированными научными и инженерными кадрами.

2. ПРЕДПОСЫЛКИ МИЛЛИМЕТРОВОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ В САО РАН

Среднеквадратичное отклонение (СКО) от заданной формы у шестиметрового зеркала БТА на два порядка превышает требования, предъявляемые к субТГц-антеннам. Предварительные исследования показали, что алюминиевое покрытие зеркала обеспечивает эффективное отражение до 94% мощности субТГц-сигнала, что позволит использовать его для субТГц-исследований [5].

Атмосфера Земли существенно поглощает субТГц-волны, и наземные наблюдения возможны только в узких окнах прозрачности для волн с длинами волн 0.8, 1.3, 2, 3 мм. Исследования в окнах 0.8 и 1.3 мм доступны для исследований в высокогорных пустынях, например в Чили, где расположен телескоп ALMA [1]. Проведенный в 2014 году цикл прямых измерений поглощения показал, что на площадке БТА можно наблюдать астрономические объекты в диапазонах 2–3 мм с общим поглощением в 0.1 Непер в зимний период в течение 60% времени, в переходный сезон – 45% времени и летом – около 7% времени [6]. Есть ограниченная возможность наблюдений в окне прозрачности 1.3 мм в холодные ясные периоды февраля-марта, но не для волн с длиной волны 0.8 мм. Оптический телескоп предназначен для проведения научных исследований в темное время суток, а субТГц-исследования можно проводить в предзакатное и рассветное время. Это увеличит эффективное время работы телескопа на 4–5 часов в сутки. Оптическая схема БТА позволяет выполнение наблюдений в первичном фокусе и в двух фокусах Несмита. Время перестройки оптической схемы составляет 3–4 минуты, что делает возможным в течение одной ночи вести наблюдения с помощью аппаратуры, установленной в разных фокусах телескопа.

В рамках реализации проекта разрабатывается приемная система, включающая высокочувствительный детектор – болометр на основе структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС), систему криостатирования с рабочей температурой ниже 0.3К, считывающую электронику и квазиоптическую систему согласования сигнала, полученного от телескопа с детектором.

3. КОНСТРУКЦИЯ КРИОСТАТА

При наземной радиоастрономии в субТГц-диапазоне частот мощность излучения, падающего на детектор, не превышает долей микроватта. Это позволяет использовать криостаты растворения малой производительности, в которых циркуляция ^3He в контуре растворения, заполненном смесью ^3He и ^4He , осуществляется благодаря его конденсации в объеме, охлаждаемом сорберной откачкой чистого ^3He [7, 8]. Эти приборы выполнены в виде вставки в сосуд с жидким гелием, что для использования на телескопе неудобно из-за проблем логистики. В работе [9] описан “сухой” криостат растворения, охлаждаемый импульсной трубой производства CRYOMECH, который послужил прототипом описываемого прибора. В этой работе использован двухступенчатый рефрижератор Гиффорда–МакМагона KDE412S2 CRYOCOOLER (CR) производства КНР. Этот рефрижератор имеет паспортную производительность второй ступени мощностью 1.35 Вт и температурой 4.2 К, что почти в 3 раза превышает производительность альтернативного варианта системы “сухого” предварительного охлаждения до температуры 4К так называемой импульсной трубой. Однако у него довольно высок уровень вибраций, которые можно радикально снизить, если на время измерений его выключать. В соответствии с предполагаемым графиком работы БТА режим работы криостата следующий:

- охлаждение узлов криогенного блока до температуры около 4К примерно за 9ч и конденсация гелия в ванну-стабилизатор за 4–5 ч и конденсацию ^3He за 1–2 ч при активной работе CR;
- остановка CR, охлаждение детектора до температуры на уровне 0.1 К и поддержание рабочих условий до 4–5 ч за счет испарения жидкого гелия из ванны-стабилизатора;
- повторный запуск CR. При этом затраты времени на охлаждение криогенных узлов исключены.

Упрощенная схема прибора представлена на рис. 1. В частности, не показаны контейнеры рабочих газов объемом 80 см³, в которых под давлением находятся около 5 л ^4He , около 4 л ^3He и около 1.2 л смеси, состоящей примерно из 35% ^3He и 65% ^4He . Контейнеры связаны

соответственно с соберами ^4He , ^3He и конденсором блока смеси капиллярными трубками из нержавеющей стали.

Первый этап работы прибора — это охлаждение при работающем СР стабилизатора и связанных с ним узлов до криогенных температур за 8–9 ч и затем набор в него (ожижение) примерно 0.6 л жидкого гелия из газгольдера (или баллона с гелием), рис. 2. Охлаждение осуществляется за счет конвекции гелия, охлаждаемого второй ступенью СР, связанной тонкостенной трубкой из нержавеющей стали со стабилизатором, и потоком тепла по управляемому теплопроводу. Он состоит из отоженных медной трубки и вставленного в нее медного стержня, окруженными тонкостенной трубкой из нержавеющей стали. Внутри этой сборки находится гелий. При гелиевой температуре газы полностью сорбируются активированным углем, заполняющим медную ампулу, связанную с теплопроводом тонкостенной трубкой из нержавеющей стали. При нагреве ампулы нагревателя импульсом мощностью около 1 мВт газ десорбируется и между второй ступенью и стабилизатором устанавливается эффективная тепловая связь.

По мере остывания стабилизатора охлаждаются и связанные с ним сорберы ^3He и ^4He , ванна ^4He , ванна ^3He и миксер. При этом рабочие газы собираются в сорберах и в конденсаторе контура растворения. Для ускоренного остывания ванны ^4He и ^3He связаны со стабилизатором теплопроводами, аналогичными управляемому (на рис. 1 не показаны). Дополнительно ванна ^3He и миксер соединены со стабилизатором посредством управляемого магнитного прижима, который выключается при подаче на него импульса тока [10].

Второй этап полностью аналогичен набору ^3He и его охлаждению до температуры 1 К, описанному в работе [8]. Сорбер ^4He нагревается до температуры примерно 50 К при мощности около 1 Вт. Происходит десорбция газа и его конденсация в ванне ^4He . Затем в рубашку сорбера подается теплообменный газ при нагреве соответствующего небольшого сорбера мощностью примерно 1–2 мВт, сорбер ^4He остывает и начинается откачка ванны с жидким гелием, которая остывает до температуры ниже температуры конденсации ^3He . Включается нагрев сорбера ^3He , и за счет испарения жидкого ^4He

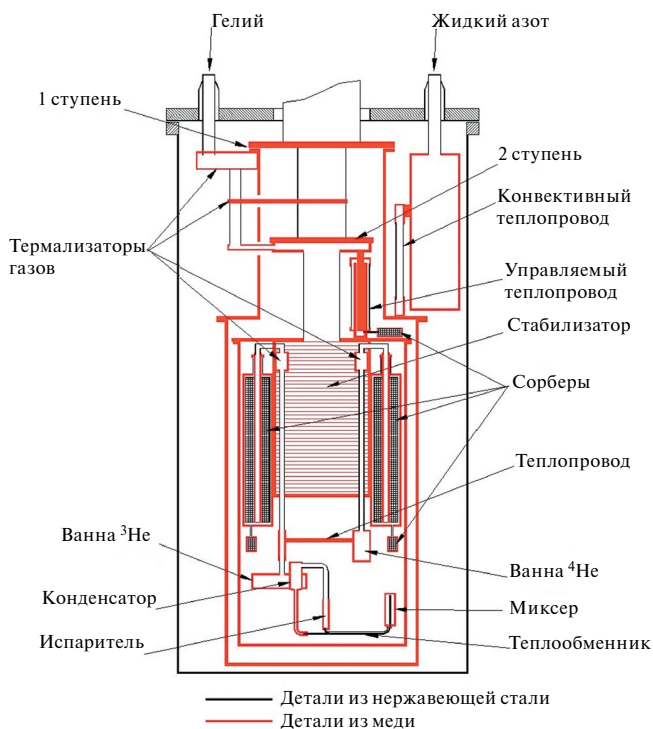


Рис. 1. Схема низкотемпературной части криостата.

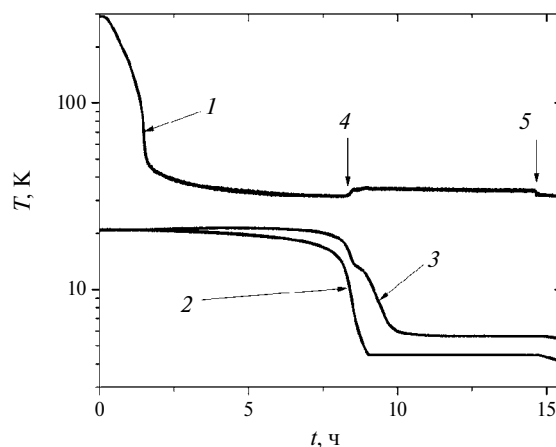


Рис. 2. Зависимость от времени (начиная с момента включения СР) температур первой ступени (1), стабилизатора (2) и ванны ^3He (3). Стрелками 4 и 5 помечены моменты начала и окончания набора жидкого гелия в стабилизатор. Начальная температура всех узлов комнатная. Показания термометров 2 и 3 соответствуют истинной температуре при ее значении ниже примерно 10 К.

конденсируются ^3He и смесь. Ванна ^3He и контур смеси заполняются и охлаждаются вплоть до температуры 1–1.2 К. Одного цикла десорбции–конденсации достаточно, если в приборе находится около 1.5 л ^3He . Если же его больше, то жидкость в ванне ^4He заканчивается раньше,

чем будет заполнена и остынет ванна ^3He , тогда процедуру следует повторить. Соответственно процесс заполнения жидкостью ванны ^3He и его предварительное охлаждение занимает 1–2 ч.

При достижении температуры ванны ^3He уровня 1–1.2 К выключается нагрев сорбера и в его рубашку подается теплообменный газ. Ванна ^3He , испаритель и миксер остывают до температуры 0.4–0.6 К. Включается нагрев испарителя мощностью 0.3–0.5 мВт и активируются циркуляция ^3He в контуре растворения, приводящая к охлаждению миксера и находящегося с ним в тепловом контакте детектора. На этом этапе нагрузка на стабилизатор падает до уровня порядка 1 мВт. Это позволяет выключить CR и тем самым устранить вибрации. Эффект включения/выключения CR наглядно виден на рис. 3 – температура миксера скачком возрастает, а затем падает.

При выключенном CR рабочие условия поддерживаются благодаря испарению жидкого гелия, накопленного в стабилизаторе. Если ванна для жидкого азота пуста, то время, за которое гелий полностью испарится, составляет до 5 ч, рис. 4. Если же в нее залит жидкий азот, то это время достигает 8 ч. Тепловая связь азотной ванны с экраном, связанным с первой ступенью CR, осуществляется благодаря азоту, находящемуся при комнатной температуре в конвективном теплопроводе под давлением около 70 ати. Однако такой тепловой связи

недостаточно, чтобы поддерживать температуру экрана на уровне температуры кипения жидкого азота, поскольку подвод тепла из комнаты к первой ступени намного эффективнее, чем от ванны с азотом. Связать же эту ванну непосредственно с экраном опасно. При рабочей температуре первой ступени около 40 К, если ванна не заполнена жидким азотом, в ней будет конденсироваться атмосферный кислород, что чревато непредсказуемыми последствиями. В нашем случае это исключено, так как пустая ванна не охлаждается до такого уровня.

Если включить CR сразу после того, как закончится гелий в стабилизаторе, то время, необходимое для достижения низкой температуры сокращается примерно на 8 ч. Если пауза продлится 10 ч, то время выхода на рабочий режим сократится на 6–7 ч.

Таким образом, описываемый криостат удовлетворяет требованиям, предъявляемым к средствам охлаждения детекторов при работе на телескопе САО РАН. Хотя из-за сравнительно высокой фоновой нагрузки атмосферы на площадке БТА достаточно охлаждения детектора до температуры 0.3 К, более глубокое, до $T = 0.1$ К, охлаждение позволит отработать методику измерений имея в виду перспективы создания радиотелескопов на более подходящих площадках или на Луне.

В заключение отметим, что конструкция рефрижератора позволяет одновременно

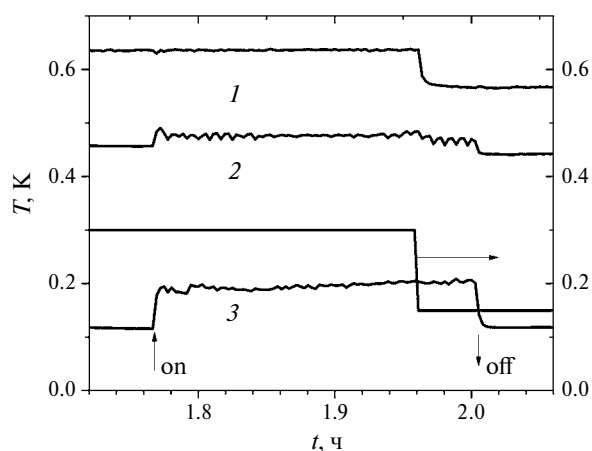


Рис. 3. Зависимость от времени температур испарителя (1), ванны ^3He (2) и миксера (3). Стрелками показаны моменты включения и выключения компрессора CR. Правая шкала – мощность, рассеиваемая в испарителе.

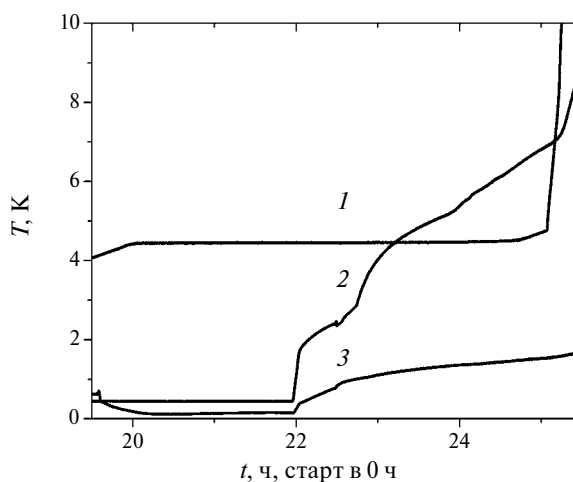


Рис. 4. Зависимость от времени температур стабилизатора (1), ванны ^3He (2) и миксера (3). Компрессор CR выключен в момент времени $t = 19$ ч 30 мин.

охлаждать разные детекторы до уровня 0.1 К (миксер), 0.4–0.45 К (ванна ^3He), 1 К (ванна ^4He) и 4.2 К (стабилизатор).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны академику Ю.Ю. Балеге, осуществляющему общее руководство программой, и коллегам из САО РАН, ИФП РАН, ИПФ РАН и ИРЭ РАН за плотное и продуктивное сотрудничество в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке российского научного фонда (грант 23-62-10013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.almaobservatory.org>
2. <https://www.eaobservatory.org>
3. Столяров В.А., Балега Ю.Ю., Мингалиев М.Г. и др. // Астрофизический бюллетень. 2024. Т. 79. № 2. С. 331.
4. <https://www.sao.ru>
5. Balega Yu., Bubnov G., Chekushkin A. et al. // Sensors. 2024. V. 24. P. 359. <https://doi.org/10.3390/s24020359>
6. Bubnov G.M., Abashin E.B., Balega Yu. Yu. et al. // IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology. 2015. V. 5. №1. P. 64. <https://doi.org/10.1109/TTNZ.2014.2380473>
7. Эдельман В.С. // ПТЭ. 2009. № 2. С. 129. <https://doi.org/10.1134/S002044120902033X>
8. Смирнов А.И., Солдатов Т.А., Эдельман В.С. // ПТЭ. 2022. № 4. С. 131. <https://doi.org/10.31857/S0032816222040255>
9. Эдельман В.С., Якопов Г.В. // ПТЭ. 2013. №5. С. 129. <https://doi.org/10.7868/S0032816213050145>
10. Эдельман В.С. ПТЭ. 2018. № 5. С. 129. <https://doi.org/10.1134/S003281621805021X>