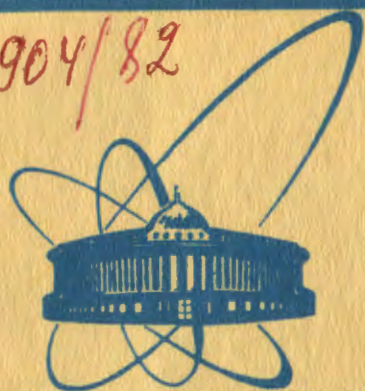


22/II-82

904/82



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

13-81-722

Н.К.Жидков, А.Наврот*

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ
ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ
И ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ ВНУТРИ КАМЕРЫ
УСКОРИТЕЛЯ В СПЕКТРОМЕТРЕ
ЯДЕР ОТДАЧИ

* Институт ядерных исследований, Варшава, ПНР.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе описывается способ охлаждения телескопов из полупроводниковых детекторов и их предусилителей, расположенных в вакуумной камере синхрофазотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Начиная с 1964 года, после изобретения Гровером с сотрудниками Лос-Аламосской лаборатории тепловой трубы^{1/}, она нашла широкое применение в технике. Тепловой трубой /ТТ/ называют герметизированную конструкцию /трубу/, частично заполненную жидким теплоносителем, которая осуществляет перенос тепла при испарении жидкости в нагреваемой части ТТ /в зоне нагрева, или испарения/ и конденсации ее паров в охлаждаемой части ТТ /в зоне охлаждения, или конденсации/. Движение пара от зоны испарения к зоне конденсации происходит за счет разности давлений насыщенного пара, определяемой разностью температур в зонах испарения и конденсации. Возвращение жидкости в зону испарения осуществляется либо за счет внешних воздействий /силы тяжести, центробежной силы, рис.1а/, либо за счет капиллярной разности давлений по капиллярной структуре /фитилю/, расположенной внутри ТТ, чаще всего на ее стенках /рис.1б/. Фитилем могут служить различные пористые материалы /сетки, спеченные пористые структуры/, канавки на внутренней поверхности корпуса трубы, а также более сложные структуры /каналы, артерии/, способные осуществить перенос жидкости из зоны конденсации в зону нагрева за счет действия капиллярных сил^{1-3/}.

Тепловые трубы с фитилем для возврата жидкости могут работать независимо от ориентации в поле тяжести и в невесомости, поэтому они получили большое применение в космической технике^{1,3/}.

Так как изменения температуры по длине трубы происходят по линии насыщения, а давление пара при 1 атм и выше меняется незначительно, то перепад температуры пара может составлять менее 1°С на 1 м длины; таким образом, ТТ способна переносить большие тепловые мощности при малых градиентах температуры. Особенно велики переносимые мощности в ТТ с жидкометаллическими теплоносителями. Полученный поток тепла в настоящее время достигает 15 кВт/см^{2/4/}. Эффективная теплопроводность натриевой ТТ составляет $\lambda_{\text{эфф}} = 10^8$ Вт/(см°С)^{4/}. Это значение коэффициента эффективной теплопроводности в $3 \cdot 10^5$ раз выше тепло-

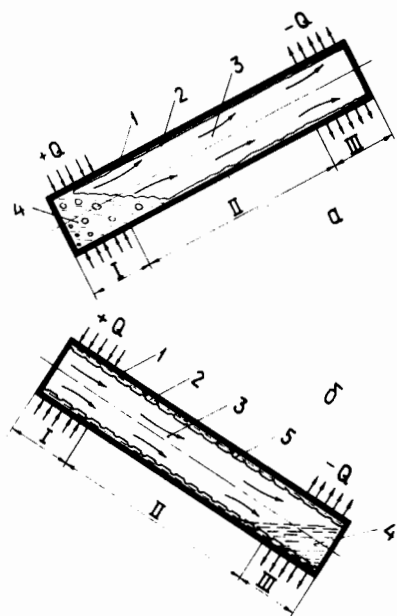


Рис.1. Схема работы тепловой трубы: I - зона нагрева /поглощается тепло $+Q$ /; II - адiabатическая зона; III - зона охлаждения /выделяется тепло $-Q$ /. Элементы конструкции: 1 - герметичный корпус; 2 - пленка жидкого теплоносителя; 3 - движение паров теплоносителя в канале ТТ; 4 - жидкий теплоноситель; 5 - фитиль. Теплоноситель перемещается из зоны конденсации в зону нагрева под действием гравитационных сил /а/ или по фитилю, против действия гравитационных сил /б/.

проводности меди $\lambda_{Cu} \approx 3 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot ^\circ\text{C})$ при $t = 1000^\circ\text{C}$ ^{/5/}. Диапазон рабочих температур определяется выбором теплоносителя и конструкционных материалов и простирается от $t \approx -200^\circ\text{C}$ при использовании азота до $t = 2400^\circ\text{C}$ при использовании серебра в качестве теплоносителя^{/4/}.

2. ВЫБОР ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Для обеспечения передачи большого количества тепла в заданном интервале температур теплоноситель должен обладать высокой теплотой парообразования, иметь достаточно высокую плотность пара при рабочих температурах, хорошо смачивать капиллярную структуру фитиля, иметь большой коэффициент поверхностного натяжения и невысокую вязкость. Для оценки возможностей теплоносителя по теплопереносу используют^{/2,4/} так называемые коэффициенты переноса жидкости N_Q^* и пара N_Q^{II} , определяемые следующим образом:

$$N_Q^* = \sigma_{\text{ж}} \cdot \gamma \cdot \rho_{\text{ж}} / \eta_{\text{ж}}; \quad N_Q^{\text{II}} = \sigma_{\text{ж}} \cdot \gamma \cdot \rho_{\text{II}} / \eta_{\text{II}},$$

где $\sigma_{\text{ж}}$ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости; γ - скрытая теплота парообразования; $\rho_{\text{ж}}$ и ρ_{II} - плотности жидкости и пара; $\eta_{\text{ж}}$, η_{II} - коэффициенты вязкости жидкости и пара соответственно.

Выбирая теплоноситель для заданного интервала температур, надо стремиться к тому, чтобы теплоноситель имел наибольшие значения величин $N_Q^*(t)$ и $N_Q^{\text{II}}(t)$. Максимум теплопереноса у ТТ с данным теплоносителем располагается в интервале температур с границами, соответствующими максимумам кривых $N_Q^*(t)$ и $N_Q^{\text{II}}(t)$. Ориентировочные диапазоны рабочих температур для некоторых теплоносителей ТТ приведены в работе^{/2/}.

Следует отметить, что в области низких температур теплоносители обладают сравнительно плохими теплопередающими свойствами. Теплоты преобразования и коэффициенты поверхностного натяжения у них малы, а вязкости жидкостей велики. Так, например, для трех теплоносителей, работающих при различных температурах, скрытые теплоты парообразования γ на линии насыщения /при давлении насыщенных паров $8,7 \text{ кг}/\text{см}^2$ / очень сильно различаются по величине^{/6/}:

- 1/ для лития (Li) $\gamma = 18079 \text{ кДж}/\text{кг}$, $t = 1730^\circ\text{C}$;
- 2/ для аммиака (NH_3) $\gamma = 1187 \text{ кДж}/\text{кг}$, $t = 20^\circ\text{C}$;
- 3/ для фреона-13 (CF_3Cl) $\gamma = 118 \text{ кДж}/\text{кг}$, $t = -30^\circ\text{C}$.

Тем не менее при низких температурах эффективность тепловой трубы значительно выше, чем у меди.

При выборе теплоносителя необходимо стремиться к тому, чтобы давление насыщенных паров было достаточно высоким для обеспечения большого переноса тепла и малого перепада температуры по длине трубы. Теплоноситель также должен иметь высокую чистоту, так как загрязнения могут снизить поверхностное натяжение, смачиваемость и ухудшить коррозионные свойства теплоносителя. В коррозионном отношении теплоноситель должен быть совместим с материалами стенки ТТ и фитиля во всем диапазоне рабочих температур. Коррозионные свойства многих материалов приведены в работах^{/2,7/}.

К теплоносителю могут быть предъявлены требования достаточной термической стойкости и стойкости в условиях ионизирующего излучения. Под действием нагрева или ионизирующего излучения теплоносители могут разлагаться на газообразные или твердые продукты. В первом случае вследствие появления газов в ТТ возникает неизотермическая зона /в области теплоотвода появляется газовая пробка, которая уменьшает теплоотвод/, во втором - возможна закупорка фитиля продуктами разложения.

На теплопередачу большое влияние оказывают геометрические размеры трубы, размеры зон подвода и отвода тепла, характеристики фитиля. Другие факторы, влияющие на теплопроводность ТТ, рассмотрены в^{/1,2,4/}.

3. КРАТКИЕ СВОЙСТВА СПЕКТРОМЕТРА ЯДЕР ОТДАЧИ

В основе спектрометра ядер отдачи лежит метод многократного прохождения внутреннего пучка ускорителя через тонкую мишень, расположенную внутри камеры ускорителя^{/8/}, и регистрации ядер, вылетающих из мишени в результате реакций упругого и неупругого рассеяния ядер пучка на ядрах мишени и фрагментации ядер мишени.

Установка собрана на одном из линейных промежутков синхрофазотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Размеры вакуумной камеры линейного промежутка /высота ~ 0,5 м, ширина ~ 2,5 м/ позволяют разместить внутри камеры мишень и телескопы из полупроводниковых детекторов с предусилителями /рис.2/. Спектрометр содержит 4 телескопа, которые в рабочем положении располагаются в горизонтальной плоскости /на рис.2 указан только один телескоп/. Телескопы можно поворачивать вокруг вертикальной оси, проходящей через мишень, что позволяет измерять выход ядер из мишени под различными углами относительно направления пучка ускорителя. Светимость мишени составляет $\sim 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при сбросе на нее $5 \cdot 10^{10}$ частиц/цикл; это позволяет измерять дифференциальные сечения с величинами $\leq 100 \text{ нб/ср}$ и исследовать следующие процессы: упругое рассеяние ядер; фрагментацию ядер мишени; кумулятивный эффект^{/9/}, а также поиск сверхвозбужденных состояний ядер пучка и новых изотопов типа $\text{He}^{10}/10/$.

Суммарная толщина применяемых кремниевых полупроводниковых детекторов в одном телескопе составляет ~ 2 см, что определяет интервал энергий регистрируемых ядер.

Схематически конструкция части спектрометра, установленной на ускорителе, показана на рис.2. Вакуумный бокс /3/ через шиббер /2/ соединен с вакуумной камерой /1/ линейного промежутка. В открытом состоянии шиббер имеет отверстие диаметром 380 мм, что накладывает ограничения на размеры конструкции, вводимой через него в камеру линейного промежутка.

В исходном состоянии шиббер закрыт, в боксе атмосферное давление; имеется доступ к телескопам, предусилителям, системе кабелей и разъемов. Телескоп /6'/, предусилители /7'/ с помощью тепловой трубы /8'/ подвижно крепятся к фиксатору /10'/, который может перемещаться вдоль штанги /11/, которая, в свою очередь, имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении. В исходном состоянии конец штанги вместе с деталью /9/ занимает положение /9'/.

В рабочем положении ускоренный пучок ядер /4/ проходит через мишень /5/, ядра отдачи регистрируются телескопом /6/; сигналы усиливаются предусилителями /7/ и по кабелям передаются в комнату с электронной аппаратурой.

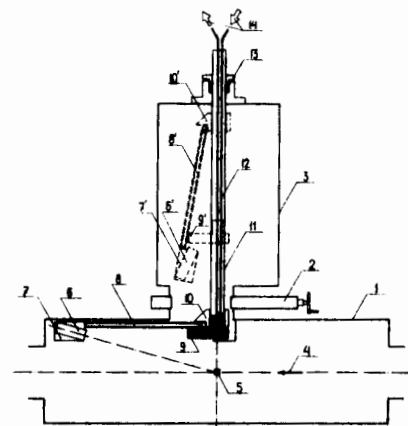


Рис.2. Схема расположения детекторов, предусилителей и мишени спектрометра ядер отдачи на ускорителе: 1 - линейный промежуток ускорителя; 2 - вакуумный шиббер; 3 - вакуумный бокс; 4 - пучок ускорителя; 5 - мишень; 6/6' - телескоп из полупроводниковых детекторов; 7/7' - предусилители; 8/8' - тепловая труба; 9/9' - деталь, охлаждаемая рассолом (KCl), неподвижно закреплена на конце штанги 11; 10/10' - фиксатор, в положении 10 он жестко фиксирует конец ТТ 8 и деталь 9; 11 - штанга /труба из нержавеющей стали/, при движении штанги вверх элементы 6-10 занимают положение 6'-10'; 12 - магистраль с рассолом, проходит внутри штанги 11, рассол охлаждает деталь 9; 13 - вакуумное уплотнение; 14 - герметизированные ввод и вывод рассола в магистраль 12.

Для охлаждения диффузионных насосов, установленных на ускорителе, применяется рассол (KCl), охлажденный до температуры $\sim -30^\circ\text{C}$. Рассол через выходы /14/ подается в магистраль /12/ и охлаждает деталь /9/ /рис.2/. Тепло от предусилителей /7/ и детекторов /6/ с помощью ТТ /8/ отводится на деталь /9/. Всего в спектрометре ядер отдачи используется 4 набора телескопов, предусилителей и ТТ.

Применение ТТ является надежным, удобным в конструктивном отношении и безопасным для работы ускорителя способом охлаждения.

4. КОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛОЙ ТРУБЫ

Конструкция ТТ приведена на рис.3. Корпус ТТ выполнен из медной трубы длиной 600 мм с внешним диаметром 16 мм, толщиной стенки 2 мм, герметизированной с обеих концов медными пробками. К внутренней стенке трубы плотно прилегает фитиль, состоящий из двух слоев /витков/ сетки из нержавеющей стали с ячейками 150 меш /меш - единица измерения, указывает количество ячеек сетки, приходящихся на один дюйм/. Внутри тепловой трубы содержится ~ 18 г теплоносителя фреона-22 (CHF_2Cl).

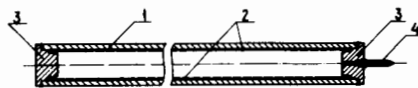
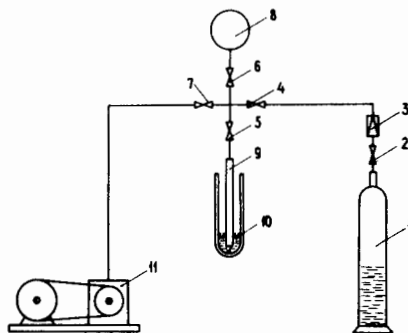


Рис. 3. Конструкция тепловой трубы: 1 - труба из меди; 2 - фитиль; 3 - пробки из меди; 4 - трубка из меди диаметром 1 мм, служит для заполнения ТТ теплоносителем.

Рис. 4. Схема заполнения тепловой трубы теплоносителем: 1 - баллон с жидким фреоном-22; 2, 4, 5, 6, 7 - вакуумные вентили; 3 - редуктор; 8 - мерный объем /тонкостенный резиновый шар/ для измерения количества газообразного фреона; 9 - корпус ТТ; 10 - сосуд Дьюара с жидким азотом; 11 - форвакуумный насос.



Перед сборкой ТТ все детали тщательно очищаются методом травления. Пробки припаиваются к концам трубы припоем ПСР-45. Во время пайки внутрь ТТ подается газообразный гелий, чтобы защитить внутреннюю поверхность от окисления.

Схема заполнения ТТ фреоном показана на рис. 4. Вначале вся система откачивается, затем промывается фреоном. В мерный объем отмеряется ~21 г газообразного фреона при давлении ~1 атм /это ~4,8 л газа, что соответствует объему шара диаметром ~21 см/. Затем закрываются вентили /6/, /4/, открываются вентили /7/, /5/. После откачки вентиль /7/ закрывается и открывается вентиль /6/. ТТ погружается в жидкий азот в сосуде Дьюара. Газообразный фреон перетекает из мерного объема в ТТ и вымораживается на ее внутренней стенке. По окончании вымораживания труба вынимается из сосуда Дьюара и медленно отепляется на воздухе. Когда из ТТ в объем /8/ выйдет ~3 г фреона /диаметр шара ~10 см/, трубка /4/ /рис. 3/ пережимается и запаивается.

В установке в рабочем состоянии ТТ находятся в горизонтальном положении /зона нагрева может располагаться ниже зоны конденсации на 0 ± 10 мм/. Изготовленные ТТ испытывались в горизонтальном положении /теплый конец находился ниже холодного на 0 ± 10 мм/ в вакууме, в интервале переданных мощностей 5 ± 40 Вт /зона нагрева 7 см/ при охлаждении зоны конденсации /с торца/ в интервале температур $0 \pm 30^\circ\text{C}$. Измерения показали, что изготовленные нами тепловые трубы имеют тепловое сопротив-

ление $0,45 \pm 0,65^\circ\text{C}/\text{Вт}$, что в 30 ± 20 раз меньше теплового сопротивления меди при данных температурах.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение тепловых труб для охлаждения детекторов и усилителей внутри камеры ускорителя в спектрометре ядер отдачи подтвердило свою эффективность и надежность при работе спектрометра в экспериментах. При необходимости увеличения теплопроводности ТТ следует вместо фреона-22 использовать в качестве теплоносителя аммиак, который в коррозионном отношении устойчив с алюминием и нержавеющей сталью.

В случае ухудшения теплопередающих свойств ТТ при длительной эксплуатации их в радиационных условиях имеется возможность перезаправки ТТ свежим теплоносителем.

В заключение выражаем глубокую благодарность доктору физико-математических наук В.А.Никитину за внимание к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловые трубы /сборник переводов с англ. и нем. под ред. Э.Э.Шпильрайна/. "Мир", М., 1972.
2. Ивановский М.Н. и др. Технологические основы тепловых труб. Атомиздат, М., 1980.
3. Елисеев В.Б. и др. Что такое тепловая труба? "Энергия", М., 1971.
4. Ивановский М.Н. и др. Физические основы тепловых труб. Атомиздат, М., 1978.
5. Таблицы физических величин /справочник под ред. академика И.К.Кикоина/. Атомиздат, М., 1976.
6. Теплотехнический справочник. "Энергия", М., 1975, т.1; Варгафик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. "Наука", М., 1972.
7. Сухотин А.М., Зотиков В.С. Химическое сопротивление материалов. "Химия", М., 1975.
8. Никитин В.А. и др. ЖЭТФ, 1964, 46, с.1608.
9. Балдин А.М. ЭЧАЯ, 1977, т.8, с.429.
10. Безногих Г.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, с.349.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 ноября 1981 года.