



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

И.А. Звонарев, Л.М. Севрюкова

**ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРЯЮЩИХ СВЧ-РЕЗОНАТОРОВ**

Лабораторный практикум

по курсу *"Высокочастотная сверхпроводимость в ускорителях
заряженных частиц"*

Москва - Протвино
1999

Звонарев И.А., Севрюкова Л.М. Измерение электрофизических параметров сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов. Лабораторный практикум. – Протвино, 1999. 27 с., 11 рис., 2 табл.

Данное учебное пособие является второй частью лабораторного практикума по курсу лекций "Высокочастотная сверхпроводимость в ускорителях заряженных частиц" и включает описание наиболее трудных лабораторных работ.

Каждая лабораторная работа содержит общие теоретические положения, описание экспериментального стенда, входящего в состав экспериментально технологического комплекса оборудования Отраслевой проблемной лаборатории технологии и исследования сверхпроводящих резонаторов Минатома Российской Федерации при ГНЦ Институт физики высоких энергий. Кроме того, описание каждой лабораторной работы содержит задание, порядок выполнения работы и контрольные вопросы.

Пособие рассчитано в основном на студентов учебно-научного центра (УНЦ) ГНЦ Институт физики высоких энергий, на базе которого обучаются студенты кафедр №2 и №14 Московского инженерно-физического института, но может использоваться студентами физических и радиотехнических специальностей.

Рекомендовано к изданию в качестве учебного пособия редсоветом Московского государственного инженерно–физического института.

Рецензенты: профессор *А.А. Глазков*, профессор *Э.С. Масунов*,
профессор *В.А. Тепляков*, к.т.н. *О.К. Беляев*.

ISBN 5–88738–026–8

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1999

© Московский государственный
инженерно–физический институт
(технический университет), 1999

Содержание

Лабораторная работа 1

Определение собственной добротности сверхпроводящего резонатора с одной связью 3

Лабораторная работа 2

Измерение добротности сверхпроводящего резонатора методом декремента 8

Лабораторная работа 3

Определение собственной добротности сверхпроводящего резонатора по схеме импульсной модуляции..... 16

Лабораторная работа 4

Измерение поверхностного сопротивления сверхпроводящих материалов на высоких частотах 21

Лабораторная работа 5

Измерение напряженности электрического поля на оси ускоряющей структуры24

Лабораторная работа 1

Определение собственной добротности сверхпроводящего резонатора с одной связью

Цель работы: Освоение методики измерения собственной добротности сверхпроводящего резонатора (СПР) с одной связью.

1. Теоретические положения

Одним из важных параметров сверхпроводящих резонаторов является собственная добротность резонатора. Определение этого параметра обусловлено прежде всего непосредственной связью между ним и поверхностным сопротивлением СПР.

При измерении добротностей обычно определяется не собственная добротность (Q_0), а нагруженная добротность (Q_H), которая зависит от суммарных потерь в резонаторе и во внешних измерительных цепях, связанных с резонатором с помощью элементов связи. Вычисление же собственной добротности проводится на основании измеренных значений Q_H и параметров, характеризующих потери в элементах связи.

Для резонатора с одним элементом связи собственная и нагруженная добротности связаны соотношением [1]

$$\frac{1}{Q_H} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{BH}} \quad \text{или} \quad Q_0 = Q_H \left(1 + \frac{Q_0}{Q_{BH}}\right) = Q_H (1 + \beta_{CB}), \quad (1)$$

где Q_{BH} – внешняя добротность резонатора, зависящая от элемента связи; β_{CB} – коэффициент связи.

Простейший способ определения Q_0 заключается в измерениях Q_H при изменении связи до такой величины, при которой дальнейшее её уменьшение не оказывает существенного влияния на результат. Этот способ широко используется при определении добротности не сверхпроводящих резонаторов, а при измерениях параметров СПР даже применение регулируемого элемента связи и уменьшение связи до минимума с понижением температуры часто приводит к сильному различию величин Q_H и Q_0 . В этом случае необходимо проводить измерение коэффициента связи.

Из выражения (1) следует, что при согласованной связи резонатора с внешней цепью $\beta_{CB}=1$ и $Q_H=Q_0/2$.

В общем случае, когда согласование неоптимально, выражение для нагруженной добротности можно записать через коэффициент стоячей волны по напряжению (ρ) на резонансной частоте.

Если связь больше критической, то $\beta_{CB}=\rho$. Если связь меньше критической, то $\beta_{CB}=1/\rho$. Тогда

$$Q_H = \frac{Q_0}{1+\rho} \quad \text{при} \quad \beta_{CB}>1, \\ \text{и} \\ Q_H = \frac{Q_0}{1+1/\rho} \quad \text{при} \quad \beta_{CB}<1. \quad (2)$$

Выражение для Q_H можно записать еще через модуль коэффициента отражения на резонансной частоте от резонатора

$$|\Gamma(\omega_0)| = \frac{\rho - 1}{1 + \rho}; \quad (3)$$

$$Q_H = \frac{Q_0(1 \mp |\Gamma(\omega_0)|)}{2}. \quad (4)$$

В этой формуле необходимо брать знак минус, если $\beta_{св} > 1$ на резонансной частоте, и знак плюс, если $\beta_{св} < 1$.

Выражение (4) может быть положено в основу метода измерения собственной добротности резонаторов и параметров связи.

К измерителям добротности, используемым в этом случае, предъявляется ряд требований:

- высокая точность измерения;
- необходимость измерять собственную добротность;
- возможность наблюдать и контролировать форму резонансной кривой [2].

2. Описание экспериментальной установки

Структурная схема измерительной установки представлена на рис.1. Измерительный резонатор включается в измерительный тракт по отражательной схеме.

Основным элементом установки является высокостабильный перестраиваемый генератор СВЧ (2). Генератор СВЧ собран по схеме фазовой автоподстройки частоты. Подробное описание принципа работы высокостабильного генератора дано в лабораторной работе 3.

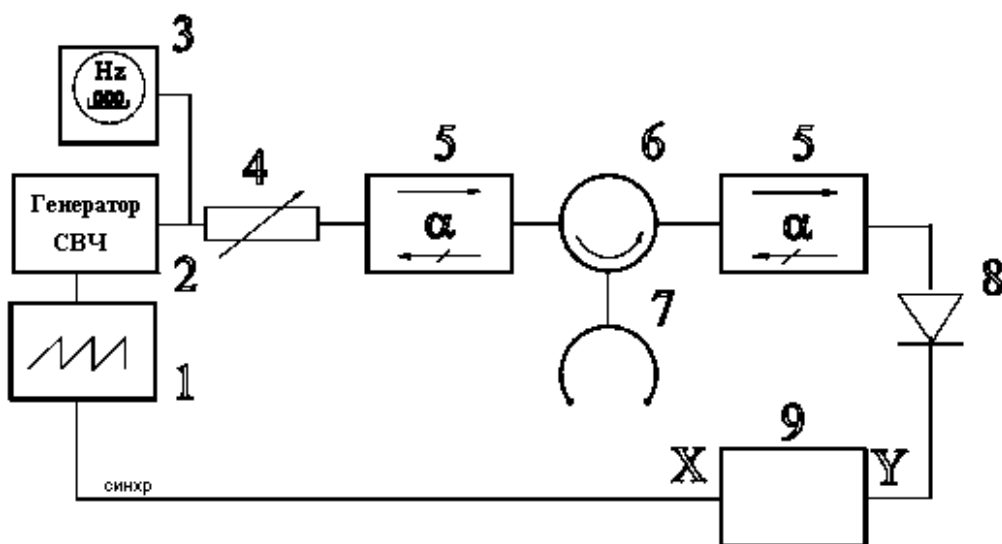


Рис.1. Структурная схема измерительной установки.

1 – генератор сигналов специальной формы; 2 – генератор СВЧ; 3 – частотомер; 4 – прецизионный аттенюатор; 5 – ферритовый вентиль; 6 – циркулятор; 7 – исследуемый резонатор; 8 – детектор; 9 – двухкоординатный самописец.

Измерение осуществляется следующим образом. Сигнал высокостабильного генератора, промодулированный по частоте пилообразным напряжением, через развязывающий аттенуатор, ферритовый вентиль и циркулятор поступает на измерительный резонатор. Отраженный сигнал через циркулятор, ферритовый вентиль поступает на детектор СВЧ.

Процесс измерения в данной схеме заключается в регистрации изменения коэффициента отражения в СВЧ-тракте с резонатором при свипировании частоты СВЧ-генератора вблизи резонансной частоты. Из получаемой при этом резонансной кривой (рис.2) определяются резонансная частота f_0 , коэффициент связи β и ширина полосы пропускания на уровне "половинной" мощности $2\Delta f_{0H}$ с помощью соотношения

$$Q_0 = \frac{f_0}{2 \Delta f_{0H}} (1 + \beta). \quad (5)$$

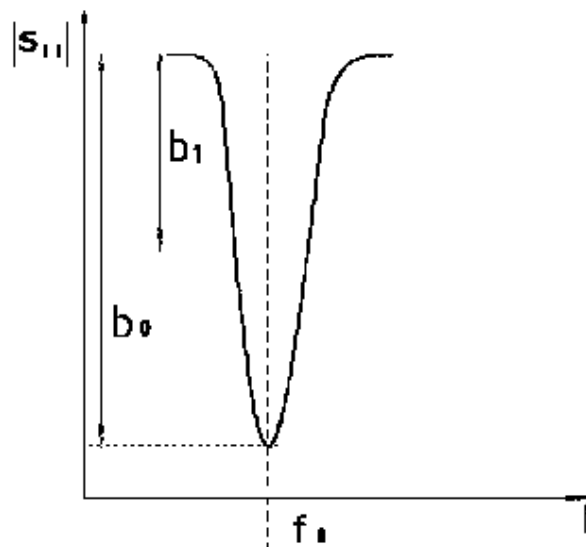


Рис.2. Вид резонансной кривой.

Для исключения влияния характеристики СВЧ-детектора определение уровня "половинной" мощности на резонансной кривой проводится прецизионным аттенуатором. При этом затухание, вносимое резонатором, замещается эквивалентным затуханием, вводимым с помощью аттенуатора.

Наиболее точное значение коэффициента связи может быть получено при связи резонатора с передающей линией меньше критической. Тогда коэффициент связи β определяется из соотношения

$$\beta = \frac{1 - 10^{-b_0/20}}{1 + 10^{-b_0/20}}, \quad (6)$$

где b_0 – ослабление, вносимое в тракт на резонансной частоте. Уровень "половинной" мощности находится как

$$b_1 = -3.01 + 10 \lg(1 + 10^{-b_0/20}). \quad (7)$$

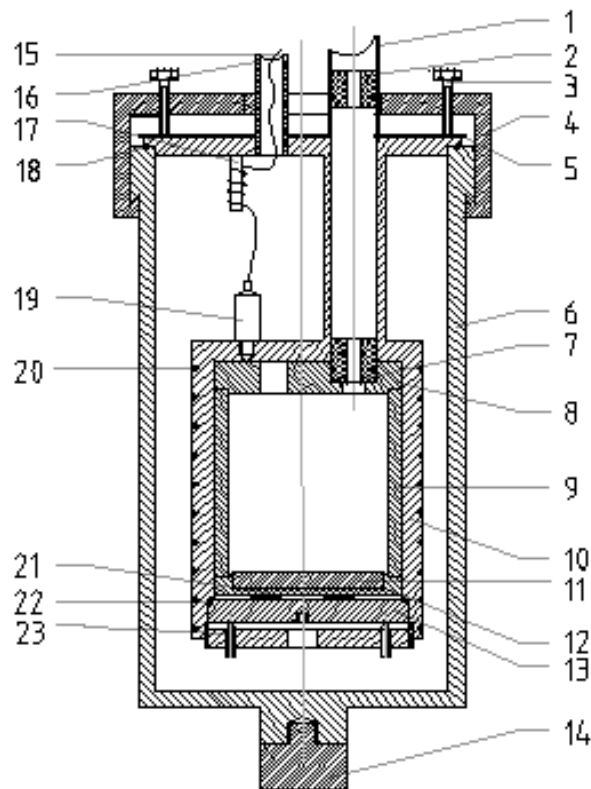


Рис.3. Конструкция измерительного резонатора:

1 – волновод; 2, 7 – полуволновые диэлектрические втулки; 3 – болты; 4 – скобы; 5 – прокладка, 6 – кожух; 8 – крышка резонатора; 9 – цилиндр; 10 – контейнер; 11 – образец; 12 – нижняя крышка; 13 – заглушка; 14 – стержень; 15 – выходы температурных датчиков и нагревателя; 16 – трубка; 17 – штырь; 18, 22 – индиевые уплотнители; 19 – датчик температуры, 20 – нагреватель; 23 – винт.

Для измерений используется специальное устройство, показанное на рис.3 [3]. Если проводятся измерения в температурном диапазоне от 300 до 70 К, можно использовать объемный резонатор, изготовленный из бескислородной меди, а в диапазоне температур 9 – 4.2 К обычно используют сверхпроводящий резонатор из ниобия.

Размеры резонатора соответствуют возбуждению колебаний H_{011} на частоте 9.2 ГГц, внутренние размеры резонатора $h=2a=43$ мм. Резонаторы выполнены в виде отрезка цилиндра и двух торцевых крышек, на одной крышке имеются отверстия связи.

Резонаторы помещаются в медный контейнер, что позволяет свести к минимуму градиенты температуры вдоль резонатора. Резонатор с исследуемым образцом собирается в контейнере и герметизируется с помощью индиевого уплотнения. Пружинная шайба создает постоянное усилие для фиксации положения частей резонатора. Контейнер с резонатором помещен в вакуумный кожух, который герметизируется с помощью индиевого уплотнения.

Контейнер для резонатора соединен с крышкой вакуумного кожуха отрезком круглого волновода, являющимся одновременно тепловой развязкой. Это позволяет в области гелиевых температур осуществлять регулирование и стабилизацию температуры резонатора без существенного увеличения расхода жидкого гелия. Измерения проводятся при медленном охлаждении в течение 3-4 часов. Контроль температуры осуществляется полупроводниковыми термометра-

ми, расположенными на контейнере. Выводы нагревателя медные и имеют надежный тепловой контакт с крышкой вакуумного кожуха.

Устройство размещается в криостате КГ-100. Откачка вакуумного кожуха проводится через тонкостенную трубку диаметром 7 мм, в которой проходят провода подключения нагревателя и датчиков температуры. Откачка резонатора осуществляется через круглый волновод.

3. Задание и порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и элементами экспериментальной установки. Проверить правильность соединения отдельных блоков установки.
2. Включить источник питания согласно инструкции.
3. Криостат со сверхпроводящим ускоряющим резонатором, т.е. откачка вакуумной рубашки криостата и откачка полости сверхпроводящего ускоряющего резонатора до давления не хуже 10^{-5} Па, а также заливка жидкого азота в азотную рубашку криостата проводятся персоналом Отраслевой проблемной лаборатории технологии и исследования сверхпроводящих резонаторов заранее.
4. Провести измерения резонансной частоты резонатора и получить резонансную кривую исследуемого резонатора.
5. По формулам (5)-(7) рассчитать значение собственной добротности исследуемого резонатора.

4. Оформление отчета

1. Начертить функциональную схему экспериментальной установки для измерения добротности сверхпроводящих резонаторов в сантиметровом диапазоне частот.
2. Привести полученный рисунок резонансной кривой резонатора и значения коэффициента затухания.
3. По полученным данным рассчитать значения нагруженной и собственной добротностей.
4. Оценить погрешность измерений.
5. Сформулировать необходимые выводы по выполненной экспериментальной работе.

5. Контрольные вопросы и задания

1. Объяснить принцип измерения сверхпроводящих резонаторов методом отражения.
2. Перечислить другие методы измерения высоких добротностей сверхпроводящих резонаторов.
3. Объяснить преимущества и недостатки измерения высоких добротностей методом отражения.
4. Для чего необходимо определение уровня "половинной" мощности на резонансной кривой с помощью прецизионного аттенюатора?
5. Почему для расчета собственной добротности сверхпроводящего резонатора необходимо знать коэффициент связи?

Литература

1. Диденко А.Н. Сверхпроводящие волноводы и резонаторы. – М.: Сов. Радио, 1973, с 69-73.
2. Буньков С.Н., Константинов В.И. и др. Установка для измерения параметров высокодобротных резонаторов - Электронная техника, сер. Электроника СВЧ, 1984, вып.8, с.53.
3. Буньков С.Н., Константинов В.И. и др. Генератор СВЧ, стабилизированный сверхпроводящим резонатором. Препринт ИФВЭ 90-145, Протвино, 1990.

Лабораторная работа 2

Измерение добротности сверхпроводящего резонатора методом декремента

Цель работы: Измерение высоких добротностей сверхпроводящих ускоряющих резонаторов с двумя устройствами связи методом декремента.

1. Теоретические положения

Использование сверхпроводящих резонаторов в ускорителях обусловлено возможностью получения высоких ускоряющих полей и собственных добротностей Q в ускоряющем резонаторе, существенным снижением потребляемой от сети мощности, переходом в ряде случаев к квазинепрерывному режиму работы ускорителей заряженных частиц и другими преимуществами по сравнению с обычными (нормально проводящими) ускоряющими СВЧ-структурами [1, 2].

К наиболее важным электродинамическим величинам, характеризующим резонатор, относятся: резонансная частота, собственная и нагруженная добротности и поверхностное сопротивление. Все эти параметры можно рассчитать, используя компьютерные программы, или измерить экспериментально. Как правило, для измерения добротностей выше $Q > 10^6$ используется метод декремента, так как он обеспечивает наибольшую точность.

В основу метода положено измерение времени переходного процесса в резонаторе τ . Для этого резонатор возбуждается с помощью частотно-модулированного генератора [3,4].

Нагруженная добротность определяется по формуле

$$Q_n = 2\pi \frac{f_0 \tau}{\ln(P_1/P_2)} = \pi \frac{f_0 \tau}{\ln(U_1/U_2)}, \quad (1)$$

где P_1, P_2 и U_1, U_2 – мощность и напряжение на нагрузке детектора в момент времени t_1 и t_2 ; τ – время, в течение которого мощность или амплитуда колебаний в резонаторе уменьшаются до соответствующих значений.

Обычно полагают $\ln(P_1/P_2)=1$ и $\ln(U_1/U_2)=1$, определяя тем самым τ как время, в течение которого колебательный процесс затухает в e раз.

Если для регистрации сигнала, поступающего из ускоряющего резонатора, используется детектор с квадратичной характеристикой, то выражение для максимальной относительной погрешности определения имеет вид

$$\frac{\delta Q_n}{Q_n} = \frac{\delta f_0}{f_0} + \frac{\delta \tau}{\tau} + \frac{U_2}{U_1 \cdot \ln(U_1/U_2)} \delta \left(\frac{U_1}{U_2} \right), \quad (2)$$

где $\delta f_0, \delta \tau$ и $\delta(U_1/U_2)$ – абсолютные погрешности определения соответственно частоты, времени и отношения напряжений на нагрузке детектора. Относительная погрешность определения резонансной частоты, как правило, менее 0.01%, поэтому основная ошибка связана с измерением времени τ и отношения напряжений U_1/U_2 .

Погрешность, обусловленная непостоянством частоты возбуждающих колебаний, определяется по выражению

$$\frac{\delta Q_n}{Q_n} \Big|_{\tau} = \frac{\delta \tau}{\tau} = \left\{ \ln \left[1 + 4Q_n^2 \left(\frac{\delta f_z}{f_z} \right)^2 \right] \right\} / \ln(U_1/U_2) . \quad (3)$$

Как видно из этого выражения, для уменьшения дополнительной ошибки в измерении добротности сверхпроводящего ускоряющего резонатора, обусловленной нестабильностью частоты возбуждающих колебаний, до "n" % следует использовать источник колебаний СВЧ со стабильностью частоты за время измерений, удовлетворяющей одному из условий:

$$\frac{\partial f_z}{f_z} \leq \frac{1}{10 \cdot Q \sqrt{n}}, \quad \text{при } \ln(U_1/U_2)=1;$$
$$\frac{\partial f_z}{f_z} \leq \frac{n}{100 \cdot Q}, \quad \text{при } \ln(U_1/U_2)=2.$$
(4)

Таким образом, если точность измерений должна составлять несколько процентов, то к средней стабильности частоты источника СВЧ-колебаний также предъявляют жесткие требования.

2. Описание экспериментальной установки

Для экспериментального определения высоких добротностей сверхпроводящих резонаторов разработан специальный стенд измерения СВЧ-параметров сверхпроводящих резонаторов, внешний вид которого приведен на рис. 1, а функциональная схема – на рис.2 [5]. Стенд состоит из СВЧ-системы, вакуумной и криогенной систем.



Рис. 1. Внешний вид стенда измерения электрофизических параметров сверхпроводящих ускоряющих резонаторов.

В схеме, изображенной на рис.2, реализован метод декремента. Исследуемый резонатор помещается в гелиевый вертикальный криостат при помощи вставки, изображенной на рис.3, где предусмотрена возможность регулировки глубины погружения штырей. Конструкция и принцип действия вставки описаны ниже.

Измерительная система стенда построена по гетеродинной схеме измерения добротности сверхпроводящего ускоряющего резонатора методом декремента затухания с медленным свипированием частоты.

При наличии высокостабильного источника СВЧ-колебаний измерительная система легко перестраивается на определение добротности сверхпроводящих ускоряющих резонаторов по схеме импульсной модуляции. Таким образом, обеспечивается принцип модульности в структуре построения стенда.

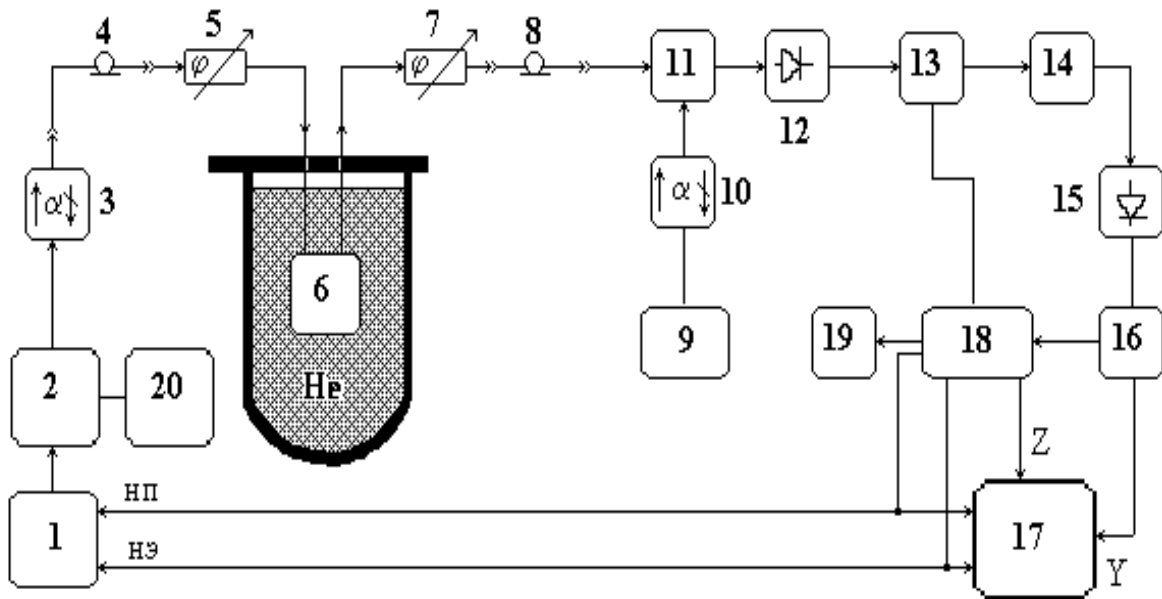


Рис. 2. Функциональная схема измерительной системы стенда.

Рассмотрим несколько подробнее блок-схему измерительной системы стенда, представленную на рис.2.

СВЧ-колебания с генератора (2), промодулированные по частоте пилообразным напряжением модулятора (1), через ферритовый вентиль (3), коаксиальный кабель (4) и фазосдвигающее устройство (5) подаются на сверхпроводящий ускоряющий резонатор с помощью штыря связи.

СВЧ-колебания генератора-гетеродина (9), отличающиеся от резонансной частоты СПР на 500 МГц, через ферритовый вентиль (10) и тройник (11) подаются на смесительный диод, куда поступают и колебания, прошедшие через сверхпроводящий ускоряющий резонатор (6), штырь связи, фазосдвигающее устройство (7), кабель (8) и тройник (11).

Со смесителя (12) сигнал с частотой 500 МГц, промодулированный по амплитуде огибающей резонансной амплитудно-частотной характеристикой сверхпроводящего ускоряющего резонатора, поступает на управляемый калиброванный аттенуатор (13), который ослабляет сигнал по мощности в ϵ раз. Затем ослабленный сигнал усиливается усилителем (14), детектируется детектором (15) и через тройник (16) подаётся на осциллограф (17) и блок измерения добротности (18). Когда сигнал с детектора (15) достигает максимальной величины, блок измерения добротности вырабатывает прямоугольный импульс, который резко прерывает нарастающее пилообразное напряжение, модулирующего по частоте СВЧ-колебания генератора (2) и

тем самым быстро уводит частоту генератора от резонансной частоты сверхпроводящего ускоряющего резонатора.

На экране осциллографа появляется экспоненциальная огибающая свободных колебаний в сверхпроводящем ускоряющем резонаторе. Этот сигнал соответствует ослабленным в ϵ раз по мощности СВЧ-колебаниям на входе детектора, после чего приставка вырабатывает импульс, который отключает ослабление калиброванного аттенюатора, и сигнал со смесителя проходит через аттенюатор без ослабления по мощности.

Время от начала ослабления экспоненты до того момента, когда сигнал неослабленной части экспоненты сравнивается по величине с начальным значением ослабленного, будет равняться постоянной времени затухающих колебаний в сверхпроводящем ускоряющем резонаторе, за которое мощность их уменьшается в ϵ раз. В этом случае нагруженная добротность выражается по формуле

$$Q = 2\pi f_0 \tau, \quad (5)$$

где τ – время, в течение которого свободные колебания сверхпроводящего ускоряющего резонатора по мощности уменьшаются в ϵ раз, а f_0 – его резонансная частота.

СВЧ-схема стенда

Возбуждающий сигнал поступает в исследуемый сверхпроводящий ускоряющий резонатор со свип-генератора (СГ), в качестве которого используется стандартный СВЧ-генератор сантиметрового диапазона (Г4-80), генераторным элементом которого является отражательный клистрон (К-351). Для контроля и измерения резонансной частоты сверхпроводящего ускоряющего резонатора маломощный выход СГ соединён с входом частотомера типа ЧЗ-38. Для работы в режиме медленного свипирования частоты СГ вход ЧМ (частотная модуляция) генератора соединён с выходом модулятора пилообразного напряжения. Ферритовый вентиль (Э8-14) служит для согласования генератора с остальным трактом. Фазосдвигающее устройство выполнено в виде участка раздвижной коаксиальной линии, позволяющей улучшать согласование по мощности сверхпроводящего ускоряющего резонатора и свип-генератора (СГ). Раздвижная линия изготовлена на основе ВЧ-разъемов СР-50-164ПВ.

Измеряемый резонатор подключается к тракту с помощью вставки в криостат (рис. 3), которая содержит штыри связи с регулируемой длиной, что даёт возможность уменьшать или увеличивать, если это необходимо, связь резонатора с трактом. Прошедший через сверхпроводящий ускоряющий резонатор сигнал поступает на детектор.

Продетектированный сигнал, представляющий экспоненциальный спад СВЧ-мощности в исследуемом резонаторе, поступает на измерительный вход электронной приставки измерения добротности, которая управляет работой всей системы.

Электронная приставка для измерения высоких добротностей представляет собой отдельно разработанный измерительный блок, координирующий и задающий работу всей измерительной системы стенда. Для работы с блоком нужно ознакомиться с описанием принципа работы блока и органов управления работой блока из "Технического описания и инструкции по эксплуатации блока измерения высоких добротностей".

Криогенная система стенда

Криогенная часть установки состоит из криостата КР-300, коллектора для сбора испаряющегося гелия, сосуда с жидким гелием под давлением, указателя уровня жидкого гелия и азота в криостате и измерителя температуры.

Уровень жидкого гелия в криостате контролируется с помощью указателя уровня гелия, изготовленного на основе угольных терморезисторов.

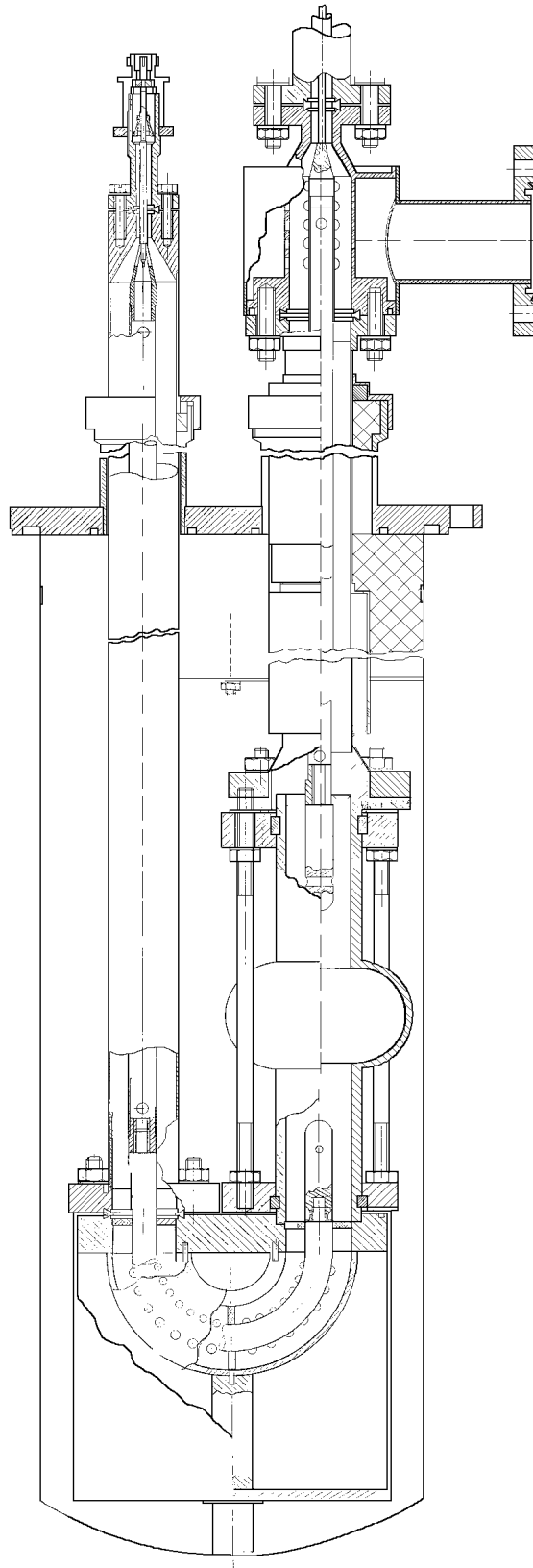


Рис.3. Вставка в криостат для исследования электродинамических характеристик СПР.

Вакуумная система стенда

Вакуумная система позволяет получить в СПР вакуум порядка $8.5 \cdot 10^{-9}$ Па. Высокий вакуум в СПР необходим для исключения влияния остаточных газов на результаты измерений. Вакуумная система содержит магниторазрядный насос, криогенный насос, клапан КЭУТ-50-2, затвор ЗПТ-160, высоковакуумный трубопровод, турбомолекулярный насос и механический насос для получения форвакуума. Основное назначение турбомолекулярного насоса – создать предварительное разряжение для запуска магниторазрядного и криогенного насосов. Для получения сверхвысокого вакуума используется прогрев высоковакуумного трубопровода, дна криогенного насоса и затвора ЗПТ-160. Для измерения вакуума применены преобразователи типа ПМТ-6-3ф и три преобразователя типа ПММ-46.

Вакуумная система обеспечивает откачку ускоряющих резонаторов до 10^{-7} Па, а с использованием криогенной откачки – 10^{-10} Па. Параметры криогенного насоса приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование параметров	Допустимые значения по ТУ	Фактические значения
Предельное остаточное давление, Па	1×10^{-8}	1×10^{-10}
Расход жидкого азота при давлении 10^{-6} Па, л/ч	0.21	0.21
Расход жидкого гелия в установившемся режиме при давлении 10^{-6} Па, л/ч	4×10^{-3}	4×10^{-3}

В основе работы насоса лежит принцип криоконденсационной откачки молекул газа, которые при соударении с поверхностью, охлажденной до низкой температуры (криопанелью), теряют свою кинетическую энергию и конденсируются на ней, образуя твердый или жидкий слой "замороженных" молекул газа. В результате этого предельное остаточное давление, создаваемое насосом, определяется упругостью паров откачиваемых газов над криопанелью.

При температуре жидкого гелия почти для всех газов упругость паров существенно ниже 10^{-10} Па. Исключение составляют гелий и водород, парциальные давления которых снижаются до 10^{-10} Па за счет их криосорбции предварительно осажденными активными слоями легкоконденсирующегося газа.

3. Задание и порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и элементами экспериментального стенда измерения электрофизических параметров сверхпроводящих ускоряющих резонаторов СМ - диапазона.
2. Криостат со сверхпроводящим ускоряющим резонатором, т.е. откачка вакуумной рубашки криостата и откачка полости сверхпроводящего ускоряющего резонатора до давления не хуже 10^{-5} Па, а также заливка жидкого азота в азотную рубашку криостата проводятся персоналом Отраслевой проблемной лаборатории технологии и исследования сверхпроводящих резонаторов заранее.
3. Переключить СВЧ свип-генератор в режим частотной модуляции (ЧМ).
4. СВЧ генератор-гетеродин переключить в режим НГ.
5. Вентили **В1** и **В2** подключить к разъемам "Вых. mW" СВЧ-генераторов.
6. После того как схема собрана, и правильность подключений проверена преподавателем, на все приборы подается сетевое напряжение.

7. Установить максимальные значения коэффициентов связи со сверхпроводящим ускоряющим резонатором.
8. Частоту СВЧ-генератора - гетеродина установить равной $f_0 \pm f_{пч}$, $f_{пч}=500$ МГц.
9. Начальную частоту СВЧ свип-генератора установить равной f_0 для данного сверхпроводящего ускоряющего резонатора.
10. Включить свипирование. При этом генератор импульсов срыва (ГИС) отключен. Схема работает в режиме обзора-поиска.
11. Медленно поворачивая ручки настройки свип-генератора, найти резонансную огибающую сверхпроводящего резонатора. Манипулируя ручками настройки обоих генераторов, добиться максимальной амплитуды сигнала из резонатора.
12. Включить генератор импульсов срыва (ГИС) и одинаково уменьшить связи со сверхпроводящим резонатором до прекращения срыва.
13. Отключить ГИС и с помощью раздвижных линий добиться максимального сигнала на экране.
14. Снова включить ГИС и определить порог срабатывания формирователя импульсов НЭ, который запускает ГИС. Установить устойчивый срыв генератора пилообразного напряжения (ГПН) на пороге срабатывания.
15. Снова отключить ГИС и установить сигнал на экране равный **1 мкВ**, уменьшая связи со сверхпроводящим ускоряющим резонатором. После этого схема готова к измерениям высоких добротностей.
16. Необходимо ознакомиться с приемами безопасной работы со сжиженными и сжатыми газами (см. Приложение 1), затем медленно залить жидкий гелий в криостат со сверхпроводящим ускоряющим резонатором. По датчикам уровня жидкого гелия определить степень заполнения криостата.
17. Тщательно следить по датчикам температуры за ходом охлаждения ускоряющего резонатора. При достижении температуры **9.2 К** зафиксировать переход его в сверхпроводящее состояние и немедленно уменьшить величину связи с ним до порога уровня срабатывания схемы.
18. Включить передачу импульса на аттенуатор. Затем, манипулируя частотой свипирования и длительностью пилы, увеличить сигнал из сверхпроводящего ускоряющего резонатора.
19. Записать на самопишущем приборе или напечатать с ЭВМ резонансную кривую сверхпроводящего ускоряющего резонатора, по которой рассчитать добротность сверхпроводящего резонатора при температурах 8; 7; 6; 5 и 4.2 К
20. Провести замеры времени, в течение которого мощность свободных колебаний в сверхпроводящем резонаторе уменьшается наполовину или в e раз. Рассчитать значение нагруженной добротности сверхпроводящего резонатора.

4. Оформление отчета по лабораторной работе

1. Начертить функциональную схему экспериментального стенда измерения параметров сверхпроводящих ускоряющих резонаторов СМ-диапазона.
2. Начертить временные диаграммы для работы стенда измерения параметров сверхпроводящих ускоряющих резонаторов СМ-диапазона.
3. Нарисовать экспоненциальную огибающую свободных колебаний сверхпроводящего ускоряющего резонатора на экране осциллографа при измерении добротности резонатора.
4. Привести формулы и расчет добротности резонатора по результатам эксперимента.
5. Построить зависимость добротности сверхпроводящего ускоряющего резонатора от температуры в диапазоне 9 - 4.2 К.
6. Оценить погрешность измерений.

5. Контрольные вопросы и задания

1. Объяснить принцип измерения сверхпроводящих резонаторов методом декремента затухания.
2. Перечислить другие методы измерения высоких добротностей сверхпроводящих резонаторов.
3. Объяснить преимущества и недостатки измерения высоких добротностей методом декремента затухания.
4. Для чего необходимо устанавливать значения связи с резонатором как можно меньше?
5. Почему для расчета добротности выбирают время, в течение которого амплитуда колебательного процесса затухает в e раз ?

Литература

1. Диденко. А.Н. Сверхпроводящие волноводы и резонаторы. – М.: Сов. Радио, 1973.
2. Диденко А.Н., Севрюкова Л.М., Ятис А.А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ-структуры. – М., Энергоатомиздат, 1981.
3. Куликов Е.И. Измерение добротности полых резонаторов с малым затуханием. Измерительная техника, 1959, 6, с. 55
4. Пудалов В.М. Измерение добротности СП СВЧ-резонаторов методом декремента. ПТЭ, 1982, 4, с. 160-163.
5. Sevryukova L.M. IHEP Activities on Application of HF Accelerator Cavities. 1. The Complex of Experimental and Technological Equipment: IHEP Preprint 90-131, Protvino, 1990, 24 p.

Лабораторная работа 3

Определение собственной добротности сверхпроводящего резонатора по схеме импульсной модуляции

Цель работы: Освоение методики измерения собственной добротности сверхпроводящего резонатора (СПР) по методу импульсной модуляции.

1. Теоретические положения

Для резонатора с двумя элементами связи собственная и нагруженная добротности связаны соотношением

$$Q_H = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{\text{внешн1}}} + \frac{1}{Q_{\text{внешн2}}} = Q_0(1 + \beta_1 + \beta_2), \quad (1)$$

где $Q_{\text{внешн1}}$ и $Q_{\text{внешн2}}$ – внешние добротности резонатора, характеризующие потери во входной и выходной цепях связи.

При работе генератора на частоте, совпадающей с собственной частотой резонатора, коэффициент отражения на входе равен

$$\Gamma_1(\omega_0) = \frac{\frac{1}{Q_{\text{внешн1}}} - \frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_{\text{внешн2}}}}{\frac{1}{Q_{\text{внешн1}}} + \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{\text{внешн2}}}}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) получаем, что

$$Q_{\text{внешн1}} = \frac{2Q_H}{1 + \Gamma_1(\omega_0)}. \quad (3)$$

Значение $Q_{\text{внешн2}}$ можно выразить через коэффициент передачи мощности через резонатор на резонансной частоте

$$Q_{\text{внешн2}} = \frac{4Q_H^2}{Q_{\text{внешн1}} \cdot K(\omega_0)}, \quad (4)$$

или

$$Q_{\text{внешн2}} = \frac{2Q_H [1 + \Gamma_1(\omega_0)]}{K(\omega_0)}. \quad (5)$$

Из выражений (1), (3) и (5) найдем собственную добротность в виде

$$Q_0 = \frac{2Q_H [1 + \Gamma_1(\omega_0)]}{1 - \Gamma_1^2(\omega_0) - K(\omega_0)}, \quad (6)$$

откуда видно, что найти собственную добротность можно, измерив коэффициент отражения на входе резонатора, нагруженную добротность и коэффициент передачи мощности через резона-

тор. Коэффициент передачи и коэффициент отражения измеряются с помощью направленных ответвителей.

Одним из возможных путей испытания СПР является подача на него СВЧ-сигнала и наблюдение отраженного и прошедшего через резонатор сигналов (рис.1) [1].

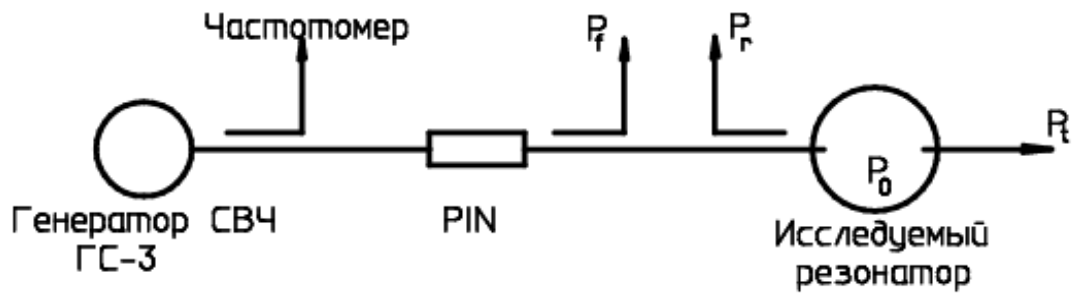


Рис. 1. Вариант схемы измерительной установки.

Частота и амплитуда этих сигналов содержит основную информацию о реакции исследуемого СПР на вводимый СВЧ-сигнал. На рис. 2 показаны формы огибающих падающего, отраженного и прошедшего радиоимпульсов в случае идеального СПР, детектированных при малых уровнях СВЧ, при различных степенях связи резонатора с внешними цепями.

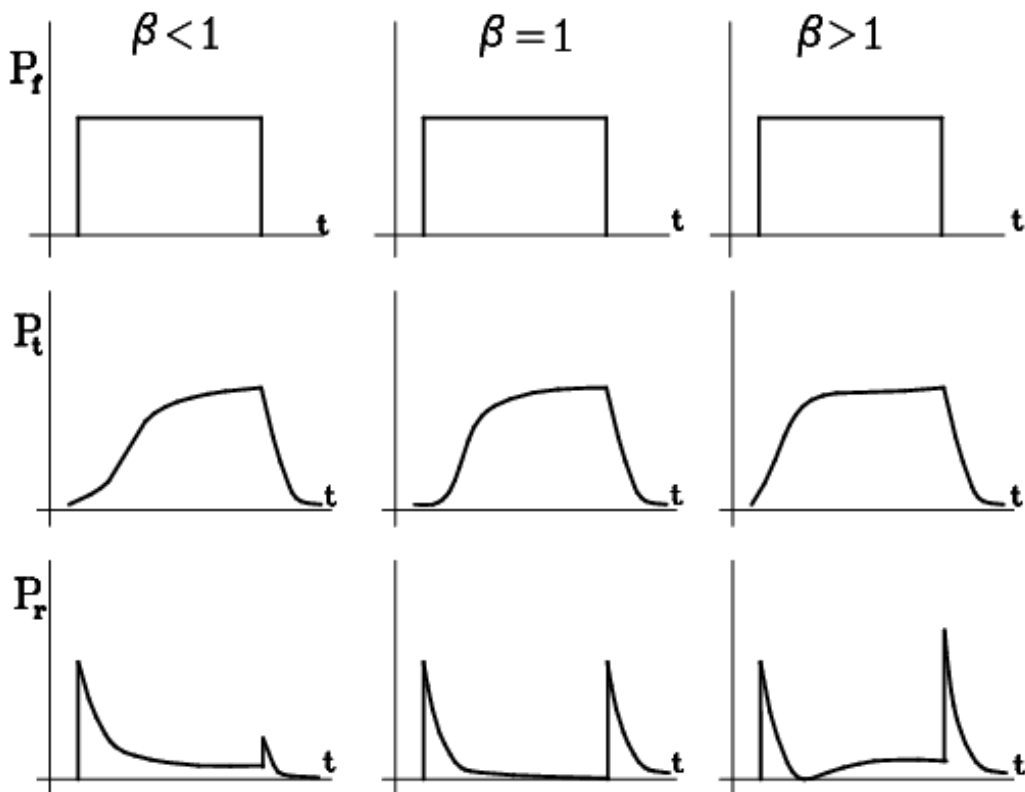


Рис. 2. Характерные формы импульсов падающего (P_f), прошедшего (P_t) отраженного сигнала при различных степенях связи резонатора с внешними цепями.

Видно, что в начальный момент идет полное отражение сигнала от резонатора, а затем амплитуда прошедшего сигнала нарастает, и после отключения падающего сигнала происходит экспоненциальный спад прошедшего сигнала, по длительности которого можно судить о нагруженной добротности исследуемого резонатора.

Зная значения P_f , P_i и P_r , можно определить значения коэффициентов связи и добротность резонатора.

2. Описание экспериментальной установки

На рис.3 показан внешний вид измерительной установки. При наличии высокостабильного источника СВЧ-колебаний измерительная система, описанная в лабораторной работе 2, легко перестраивается на определение добротности сверхпроводящих ускоряющих резонаторов по схеме импульсной модуляции.



Рис.3. Внешний вид измерительной установки.

В качестве высокостабильного генератора (рис.4) используется транзисторный генератор СВЧ с фазовой автоподстройкой частоты по сигналу высокостабильного ВЧ-генератора (Ч6-31).

Синхронизированный генератор состоит из:

- транзисторного генератора СВЧ;
- электронно-счетного частотомера ЧЗ-54 с блоком преобразователем ЯЗЧ-87;
- синтезатора частоты Ч6-31.

Для осуществления режима синхронизации генератора СВЧ по гармонике синтезатора Ч6-31 используется преобразователь частоты ЯЗЧ-87, в котором проведены следующие доработки:

- исключен режим измерения ИМ (импульсная модуляция) и проведена перекоммутация переключателя режимов;
- введен умножитель частоты синхросигнала;
- исключен фильтр нижних частот в УПТ;
- введена цепь синхронизации гетеродина сигналом с умножителя частоты.

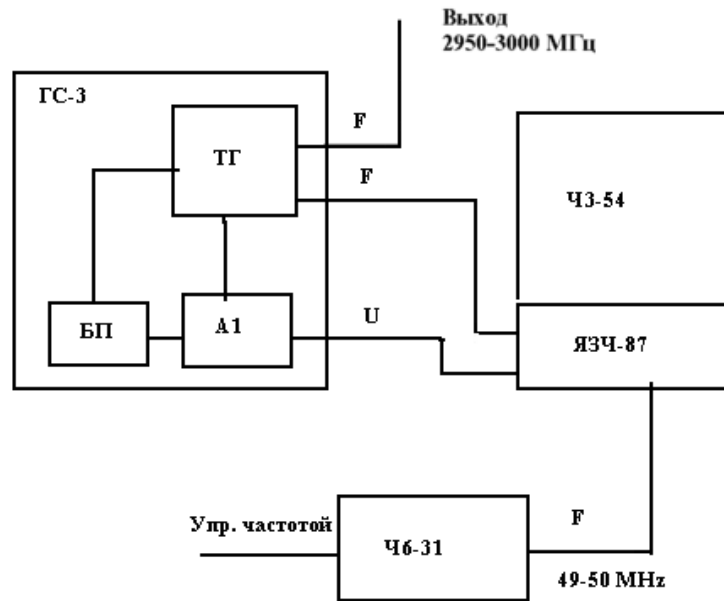


Рис.4. Структурная схема синхронизированного генератора.

ТГ – транзисторный генератор; **А1** – схема управления частотой генератора;

БП – блок питания; **Ч6-31** – синтезатор частоты; **ЧЗ-54** – электронно-счетный частотомер; **ЯЗЧ-87** – преобразователь частоты.

3. Задание и порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и элементами экспериментальной установки. Проверить правильность соединения отдельных блоков установки.
2. Включить источник питания согласно инструкции.
3. Криостат со сверхпроводящим ускоряющим резонатором, т.е. откачка вакуумной рубашки криостата и откачка полости сверхпроводящего ускоряющего резонатора до давления не хуже 10^{-5} Па, а также заливка жидкого азота в азотную рубашку криостата проводятся персоналом Отраслевой проблемной лаборатории технологии и исследования сверхпроводящих резонаторов заранее.
4. Провести измерения резонансной частоты резонатора.
5. Измерить нагруженную добротность используя методику измерения высоких добротностей методом декремента.
6. Получить значения падающего, прошедшего и отраженного сигналов (в относительных единицах).
7. Рассчитать значение собственной добротности исследуемого резонатора.

4. Оформление отчета

1. Начертить функциональную схему экспериментальной установки для измерения добротности сверхпроводящих резонаторов в сантиметровом диапазоне частот.
2. Привести полученные рисунки падающего, прошедшего и отраженного сигналов.
3. По полученным данным рассчитать значения нагруженной и собственной добротностей.
4. Оценить погрешность измерений.
5. Сформулировать необходимые выводы по выполненной экспериментальной работе.

5. Контрольные вопросы и задания

1. Объяснить принцип измерения сверхпроводящих резонаторов методом декремента.
2. Перечислить другие методы измерения высоких добротностей сверхпроводящих резонаторов.
3. Объяснить преимущества и недостатки измерения высоких добротностей методом декремента.
4. Чем объяснить внешний вид отраженного и прошедшего сигнала?
5. Почему для расчета собственной добротности сверхпроводящего резонатора необходимо знать коэффициент связи ?

Литература

1. Padamsee H., Knobloch J., Hays T. RF Superconductivity for accelerator. 1998, pp. 157-165.
2. Диденко А.Н. Сверхпроводящие волноводы и резонаторы. – М.: Сов. Радио, 1973, с. 69-73.
3. Буньков С.Н., Константинов В.И. и др. Установка для измерения параметров высокодобротных резонаторов. Электронная техника, сер. Электроника СВЧ, 1984, вып.8, с.53.
4. Буньков С.Н., Константинов В.И. и др. Генератор СВЧ, стабилизированный сверхпроводящим резонатором: Препринт ИФВЭ 90-145, Протвино, 1990.

Лабораторная работа 4

Измерение поверхностного сопротивления сверхпроводящих материалов на высоких частотах

Цель работы: Освоение методики измерения поверхностного сопротивления сверхпроводников в диапазоне 7-10 ГГц.

1. Теоретические положения

Поверхностный импеданс металлов и сверхпроводников является одной из наиболее важных физических характеристик, которые полностью определяют амплитудные и фазовые соотношения между полями на поверхности.

Электродинамические свойства сверхпроводников в СВЧ-диапазоне определяются комплексным поверхностным импедансом [1]

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R}_s + i\mathbf{X}_s, \quad (1)$$

где \mathbf{R}_s – активная часть поверхностного сопротивления; \mathbf{X}_s – реактивная часть поверхностного сопротивления (реактанс).

Исследование и практическое использование металлов и сверхпроводников в технике СВЧ связано с изучением активной составляющей поверхностного сопротивления \mathbf{R}_s , глубины проникновения электромагнитного поля δ и их температурных и частотных зависимостей.

Для исследования СВЧ свойств материалов наиболее широко используются резонансные методы, позволяющие измерять активную составляющую поверхностного импеданса и глубину проникновения электромагнитного поля. В зависимости от диапазона частот, размеров исследуемых образцов из низкотемпературных сверхпроводящих материалов (свинец, ниобий) или высокотемпературной сверхпроводящей керамики (ВТСП) от температурного диапазона используются различного вида резонаторы: объемные, коаксиальные, микрополосковые, металлодиэлектрические, диэлектрические, открытые резонаторы и т.д.

При этом обязательно проводятся измерение собственной добротности резонатора, резонансной частоты или их изменений при внесении в резонатор исследуемых образцов.

Более распространенным способом измерения поверхностного сопротивления является метод объемного резонатора, крышка которого изготовлена из исследуемого сверхпроводящего материала [2]. Чаще всего при этом используются цилиндрические резонаторы из ниобия с колебаниями \mathbf{H}_{01m} типа, в которых реализуются наиболее высокие уровни добротностей. При замене одной торцевой крышки исследуемым металлом добротность резонатора меняется. При этом добротность определяется следующим соотношением:

$$\frac{1}{Q_0} = \alpha_1 R_s^a + \alpha_1 R_s^b + \alpha_2 R_s^h, \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты, зависящие от типа колебания и геометрии резонатора; \mathbf{R}_s^a и \mathbf{R}_s^b – поверхностные сопротивления крышек резонатора; \mathbf{R}_s^h – поверхностное сопротивление цилиндрической стенки резонатора.

2. Описание экспериментальной установки

Исследование поверхностного импеданса проводилось с использованием экспериментальной установки, описанной в лабораторной работе 1 [3].

В работе проводится измерение поверхностного сопротивления латунной крышки медного резонатора с колебаниями \mathbf{H}_{011} , но и возможна замена медного резонатора на сверхпроводящий резонатор.

Поверхностное сопротивление меди рассчитывается по измерению собственной добротности в лабораторной работе 1 из выражения

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{R_S [2h^3 \mu_{01}^2 J_0^2(\mu_{01}) - 4l^2 \pi^2 a^3 J_0(\mu_{01}) J_1(\mu_{01})]}{\varepsilon_0 \omega_0^3 \mu_0^3 a^3 h^3 [-J_0(\mu_{01}) J_2(\mu_{01})]}, \quad (3)$$

выражение (3) можно представить в виде

$$\frac{1}{Q_0} = R_S \left(\frac{1}{\Gamma_1} + 2 \frac{1}{\Gamma_2} \right), \quad (4)$$

где Γ_1 и Γ_2 – коэффициенты, учитывающие потери в цилиндрической стенке и в крышках резонатора. Тогда из (3) и (4) получаем

$$\frac{1}{\Gamma_1} = \frac{2\mu_{01}^2 J_0^2(\mu_{01}) h^3}{h^3 \varepsilon_0 \omega_0^3 \mu_0^2 a^3 [-J_0(\mu_{01}) J_2(\mu_{01})]} = \frac{2\mu_{01}^2}{\varepsilon_0 \omega_0^3 \mu_0^2 a^3}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{\Gamma_2} = \frac{2\pi^2 l^2 [-J_0(\mu_{01}) J_2(\mu_{01})]}{h^3 \varepsilon_0 \omega_0^3 \mu_0^2 [-J_0(\mu_{01}) J_2(\mu_{01})]} = \frac{2l^2 \pi^2}{\varepsilon_0 \omega_0^3 \mu_0^2 h^3}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) можно оценить относительный вклад элементов резонатора в общие потери.

Для нашего случая $h=2a$, $l=1$ получаем, что относительный вклад потерь, вносимых крышкой в общие потери резонатора, составляет 0.072, а относительный вклад цилиндрических стенок – 0.856. Следует отметить, что эти вычисления справедливы при идеальном контакте между крышкой и резонатором.

Приведенные выше соотношения используются при расчете поверхностного сопротивления исследуемых образцов по результатам измерения добротности

$$R_{S2} = \Gamma_2 \left(\frac{1}{Q_0^S} - \frac{1}{Q_0} \right) + R_{S1}, \quad (7)$$

где Q_0 и Q_0^S – собственные добротности резонатора без смены крышки и с крышкой из другого материала соответственно; R_{S1} – поверхностное сопротивление стенок резонатора; R_{S2} – поверхностное сопротивление крышки из исследуемого материала.

Поверхностное сопротивление стенок резонатора рассчитывается из соотношения (3), когда весь резонатор изготовлен из одного материала (в нашем случае из меди).

3. Задание и порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и элементами экспериментальной установки. Проверить правильность соединения отдельных блоков установки.
2. Включить источник питания согласно инструкции.
3. В качестве исследуемой поверхности взять латунную крышку резонатора.
4. Криостат со сверхпроводящим ускоряющим резонатором, т.е. откачка вакуумной рубашки криостата и откачка полости сверхпроводящего ускоряющего резонатора до давления не хуже 10^{-5} Па, а также заливка жидкого азота в азотную рубашку криостата проводятся персоналом Отраслевой проблемной лаборатории технологии и исследования сверхпроводящих резонаторов заранее.
5. Провести измерения резонансной частоты резонатора и получить резонансную кривую исследуемого резонатора и коэффициент затухания.
6. Рассчитать значение собственной добротности исследуемого резонатора.
7. Рассчитать поверхностное сопротивление крышки резонатора, взяв за значение опорной добротности добротность медного резонатора из лабораторной работы 1.

4. Оформление отчета

1. Начертить функциональную схему экспериментальной установки для измерения поверхностного сопротивления сверхпроводящих материалов в сантиметровом диапазоне частот.
2. Составить таблицу, содержащую результаты измерений температурной или частотной зависимости поверхностного сопротивления (по заданию преподавателя).
3. Построить зависимости поверхностного сопротивления данного сверхпроводящего материала от частоты или от температуры.
4. Сформулировать необходимые выводы по выполненной экспериментальной работе.

5. Контрольные вопросы и задания

1. Объяснить принцип измерения поверхностного сопротивления сверхпроводящих резонаторов.
2. Почему для расчета поверхностного сопротивления необходимо знать собственную добротность сверхпроводящего резонатора?
3. Какие основные факторы определяют погрешность измерения?
4. Как погрешность измерения поверхностного сопротивления зависит от соотношения поверхностных сопротивлений крышки и стенок резонатора?
5. Как рассчитывается поверхностное сопротивление стенок резонатора?

Литература

1. Диденко А.Н. Сверхпроводящие волноводы и резонаторы. – М.: Сов. Радио, 1973, с. 69-73.
2. Вендик О.Г., Гайдуков М.М., Карманенко С.Ф. и др. СВЧ-поверхностное сопротивление сверхпроводящих пленок. Письма в ЖТФ, 1989. Т.15, вып.7, с. 69.
3. Буньков С.Н., Константинов В.И., и др. Установка для измерения параметров высокочастотных резонаторов. Электронная техника, сер. Электроника СВЧ, 1984, вып.8, с. 53.
4. Буньков С.Н., Константинов В.И. и др. Генератор СВЧ, стабилизированный сверхпроводящим резонатором: Препринт ИФВЭ 90-145, Протвино, 1990.

Лабораторная работа 5

Измерение напряженности электрического поля на оси ускоряющей структуры

Цель работы: Освоение измерительного комплекса ШИПР для измерения электромагнитного поля; измерение электрической составляющей электромагнитного поля на оси ускоряющей структуры, состоящей из ячеек типа "TESLA-shape", методом малых возмущений.

1. Теоретические положения

Как известно, процедура измерений по методу малых возмущений заключается в том, что внутрь исследуемого объекта вводится малое металлическое или диэлектрическое тело и исследуется реакция объекта на возмущение полей, которое при этом происходит. Регистрируемыми величинами здесь являются измерение резонансной частоты исследуемого резонатора (метод резонансных возмущений), добротности (метод поглощающего включения) или амплитуда и фаза волны, рассеянной возмущающим телом (метод нерезонансных возмущений).

Наиболее общая форма записи теоремы малых возмущений при использовании металлического возмущающего тела имеет вид [1]

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = \frac{f_1 - f_0}{f_0} = -\frac{1}{4W} \left[\epsilon_0 \int_V \vec{E} \vec{E}_0^* dv - \mu_0 \int_V \vec{H} \vec{H}_0^* dv \right], \quad (1)$$

где f_0 – собственная частота резонатора; f_1 – собственная частота резонатора, возмущенного зондом; V – объем металлического зонда; $\mathbf{E}_0, \mathbf{H}_0$ ($\mathbf{E}_0^*, \mathbf{H}_0^*$) – напряженности невозмущенного электрического и магнитных полей (комплексно-сопряженные значения); \mathbf{E}, \mathbf{H} – напряженности возмущенного электрического и магнитных полей; W – запасенная энергия.

Если зонд расположен в области однокомпонентного состава поля (например, на оси резонатора), то выражение (1) упрощается до вида

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = \frac{f_1 - f_0}{f_0} = \frac{1}{W} k_z E_z^2, \quad (2)$$

где k_z – электрический формфактор зонда вдоль оси z .

Используя известную зависимость $W = PQ_0 / 2\pi f_0$, последнее соотношение можно преобразовать в формулу для определения нормированного значения напряженности электрического поля на оси резонатора

$$\xi_e = \frac{E_{0z}}{\sqrt{PQ_0}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi \cdot k_z} \frac{\Delta f}{f_0^2}}. \quad (3)$$

При исследовании распределения электрического поля замедляющей системы целесообразно использовать металлические игольчатые зонды, продольная ось которых совпадает с осью пролетного канала.

Величина формфактора такого зонда:

$$k_z \approx \frac{\pi \epsilon_0}{4\sqrt{2}} l^2 \sqrt{lR}, \quad (4)$$

где R – радиус зонда, l – его длина, $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Погрешность измерений параметра напряженности электрического поля определяется как

$$\delta \left[\frac{\Delta f_0}{f_0} \right] = 2 \frac{\Delta f_0}{f_0} \frac{\partial(\xi_E(z))}{\xi_E(z)}. \quad (5)$$

2. Описание экспериментальной установки

В лабораторной работе используется измерительный блок ШИПР, разработанный в лаборатории СВЧ-энергетики кафедры 14 МИФИ, предназначенный для экспериментального исследования ЭДХ сверхпроводящих резонаторов в полосе частот 2–4 ГГц. Установка реализует резонансный метод исследования замедляющих систем.

Разработанный блок позволяет проводить следующие процедуры:

- 1) измерение собственных частот одиночного резонатора или цепочки связанных резонаторов;
- 2) измерение добротности резонатора;
- 3) измерение параметров напряженности электрического или магнитного полей;
- 4) исследование топографии электромагнитного поля с целью идентификации вида или типа колебаний в резонансной системе.

Функциональная схема установки представлена на рис.1. Установка работает по принципу следящего автогенератора, стабилизированного по частоте исследуемым резонатором [3,4].

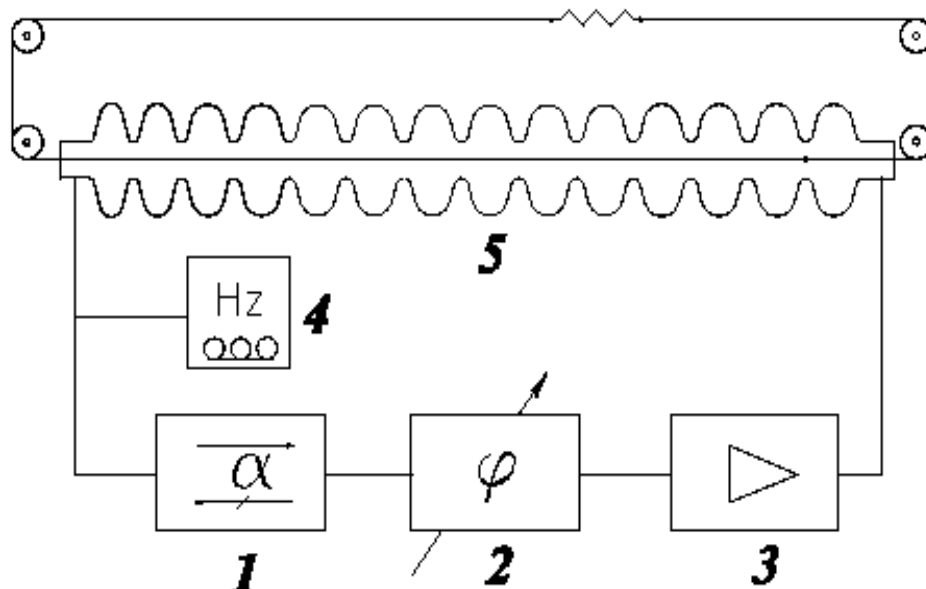


Рис.1. Функциональная схема измерительной установки.

Условия существования режима автоколебаний задаются системой уравнений

$$\begin{cases} K_y > A_i; \\ \varphi_q + \varphi_k + \varphi_y + \varphi_r = 2\pi n, \end{cases} \quad (6)$$

где K_y – коэффициент усиления СВЧ-усилителя; A_i – переходное ослабление в i -ом элементе кольца обратной связи; φ – набег фазы в элементах кольца обратной связи.

Блок усилителя-автогенератора содержит транзисторный СВЧ-усилитель (3), в цепь обратной связи которого включены: калиброванный фазовращатель (2), резонатор-фильтр и исследуемый резонатор (5).

Фазовращатель, вентиль (1) и регулируемые устройства связи обеспечивают необходимые амплитудные и фазовые соотношения (а) возникновения режима автоколебаний. Частотные изменения в системе фиксируются частотомером (4). Блок протяжки осуществляет перемещение зонда внутри резонатора.

Достоинством данной схемы является высокая стабильность частоты автоколебаний, обусловленная уменьшением электромагнитной связи резонатора с активным элементом и, как следствие, увеличение добротности системы и снижение уровня мощности ВЧ-потерь в резонаторе.

Усилитель-автогенератор установки собран в стандартном блоке типа «Вишня» и состоит из последовательно соединенных СВЧ-усилителя типа «Одиссея 1-2», калиброванного фазовращателя, коаксиального тройника и детекторной головки.

СВЧ-усилитель имеет коэффициент усиления порядка 30 дБ с неравномерностью АЧХ не хуже 2 дБ. Питание усилителя +15 и -3 В осуществляется от размещенного в блоке стабилизированного источника питания.

Калиброванный фазовращатель выполнен на основе полосковой линии с регулируемой плотностью диэлектрического заполнения. Заполнение выполнено в виде пластины из органического стекла.

Детекторная головка, присоединенная параллельно выходной цепи усилителя, служит для индикации захвата прибора в режим автоколебаний и настройки с помощью фазовращателя на максимально регистрируемую мощность.

Кроме того, в блоке смонтирован перестраиваемый по частоте резонатор-фильтр из СВЧ-генератора Г4-9. Выход и вход резонатора-фильтра выведен на лицевую панель блока.

Исследуемый резонатор устанавливается в устройство для протяжки зонда. Возмущающее тело в резонаторе подвешивается на тонкой нити. В результате мы имеем зависимость $\Delta f = F(z)$. Зная ее и используя формулу (2), мы получаем распределение нормированного значения электрической составляющей электромагнитного поля.

3. Задание и порядок проведения работы

1. Ознакомиться с аппаратурой и элементами экспериментальной установки.
2. Собрать схему согласно рис.1 и подключить частотомер.
3. Включить тумблеры "Сеть" на лицевой панели блока усилителя автогенератора и частотомера.
4. С помощью фазовращателя добиться возникновения автоколебаний на рабочей частоте исследуемой системы.
5. Установить систему протяжки зонда. Возмущающее тело должно находиться вне резонатора.

- Протягивая зонд вдоль оси резонатора, снять зависимость изменения резонансной частоты от положения зонда.
- Полученные результаты внести в таблицу, содержащую номер измерения и соответствующие ему координаты зонда и значение резонансной частоты.

4. Оформление отчета

- Начертить функциональную схему экспериментальной установки.
- Заполнить таблицу, содержащую результаты измерений.

№ эксп. точки	Резонансная частота f_0 , МГц	Девияция частоты Δf_0 , Гц
1		
...		
N		

- По данным таблицы построить график распределения электрической составляющей электромагнитного поля вдоль оси ускоряющей структуры.
- Оценить погрешность измерений.

5. Контрольные вопросы и задания

- Изложить основы метода малых возмущений.
- Как экспериментально определяется формфактор зонда?
- Каковы должны быть формы зондов для измерения продольной и поперечной составляющих электрического поля на оси резонатора?
- Какая схема применяется для измерения малых сдвигов частоты в резонаторах? Изобразить функциональную схему.
- Каковы основные условия существования в системе автоколебаний.
- Пояснить принцип действия установки ШИПР.
- Можно ли использовать схему измерения (рис.1) для определения добротности резонатора.

Литература

- Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1980, с. 424-430.
- Зверев Б.В. Серия автоматических измерительных комплексов для исследования объемных резонаторов. Письма в ЖТФ. 1981, т.7, вып.10, с. 1004-1007.
- Зверев Б.В. Способ измерения напряженности ускоряющего электрического поля. А.С. №398900, БИ.№38, 1973.
- Зверев Б.В., Заварцев А.А., Рузин В.В. Устройство для измерения электродинамических характеристик объемного резонатора. А.С. 873160, БИ № 38, 1981.
- Кравчук Л.В., Челноков А.И., Шараментов С.И. К выбору схемы измерений радиотехнических параметров ускоряющих систем: Препринт ИЯИ АН СССР П-0231, Москва, 1982.