

Добротность ниобиевых полуволновых коаксиальных резонаторов 325 МГц при низких значениях СВЧ-сигнала

А. Сухоцкий^{1,*}, Д. Быченко¹, Г. Вольнец¹, Е. Гурневич¹, С. Максименко¹, М. Гусарова², М. Лалаян², С. Полозов², А. Бурин³, А. Поболь³, А. Бутенко⁴, Е. Сыресин⁴, Г. Трубников⁴

¹Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

⁴Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*aliakseisuhotski@mail.ru

Аннотация. В работе представлены экспериментальные результаты измерений добротности сверхпроводящих объемных полуволновых коаксиальных резонаторов из ниобия. В сотрудничестве между ОИЯИ, НИЯУ МИФИ, ИЯП БГУ и ФТИ НАН Беларуси в 2023 году были разработаны и изготовлены три идентичных резонатора, работающих на частоте 325 МГц. Резонаторы исследовались в сверхпроводящем состоянии при температуре жидкого гелия (4.2 К) при низких амплитудах СВЧ-сигнала. Особенности отклика резонатора как в непрерывном волновом режиме, так и в режиме затухания были проанализированы для оценки собственной добротности. В данном исследовании ускоряющее поле E_{acc} варьировалось в диапазоне 10^{-4} – 10^{-1} МВ/м. Экспериментально измеренная добротность исследуемых резонаторов достигала $Q_0 = (6.0 \pm 0.1) \cdot 10^8$.

Ключевые слова: сверхпроводимость, резонатор, добротность.

1. Введение

Современные сверхпроводящие технологии позволяют изготавливать различные типы объемных резонаторов для широкого круга практических задач. Наибольшее применение сверхпроводящие резонаторы находят в ускорительной технике, где они работают при градиентах ускоряющего поля более 1 МВ/м. Помимо этого, существует множество важных практических приложений, где сверхпроводящие резонаторы используются в более низких значениях поля [1, 2]. На данный момент комплексные исследования свойств сверхпроводящих резонаторов при малых амплитудах электромагнитных полей встречаются крайне редко.

В данной работе проведены исследования электромагнитного отклика прототипа ниобиевого коаксиального полуволнового резонатора 325 МГц с $\beta = 0.21$ [3]. Перед криогенными испытаниями проводилась химическая полировка прототипа, промывка под высоким давлением, отжиг при 120 °С в течение 48 ч [4] с поддержанием вакуума 10^{-4} Па в рабочем объеме резонатора.

Основной характеристикой, показывающей качество изготовления и подготовки резонатора, является его собственная добротность Q_0 . Как правило, для сверхпроводящих резонаторов [5–7] Q_0 изменяется в зависимости от амплитуды электромагнитного поля. Типичным показателем является график зависимости Q_0 от градиента ускоряющего поля E_{acc} . Для разных типов резонаторов данная зависимость $Q_0(E_{acc})$ отличается и имеет свои характерные особенности. В частности, выделяют три области в диапазоне изменения E_{acc} , каждая из которых характеризуется определенным наклоном Q_0 . Явление наклона в промежутке низких градиентов (Low Field Q-slope), при котором добротность растет с ростом градиента, достаточно хорошо изучено для эллиптических резонаторов.

2. Описание эксперимента

Испытания проводились в криостате погружного типа (Рис. 1 и 2) при рабочей температуре около 4.2 К.



Рис. 1. Внутренний сосуд криостата с азотным экраном.



Рис. 2. Резонатор в сборке с вводом мощности и полевой антенной с креплением к крышке погружного криостата.

Испытательная конфигурация резонатора включала в себя петли ввода мощности и полевой антенны. Ориентация и глубина погружения петли ввода мощности определялись исходя из предыдущих экспериментов с данным типом резонаторов.

По мере охлаждения резонатора его резонансная частота контролировалась векторным анализатором цепей с усилением сигнала от полевой антенны малошумящим стационарным усилителем.

Для измерения добротности использовался ВЧ-тракт, схема которого изображена на Рис. 3.

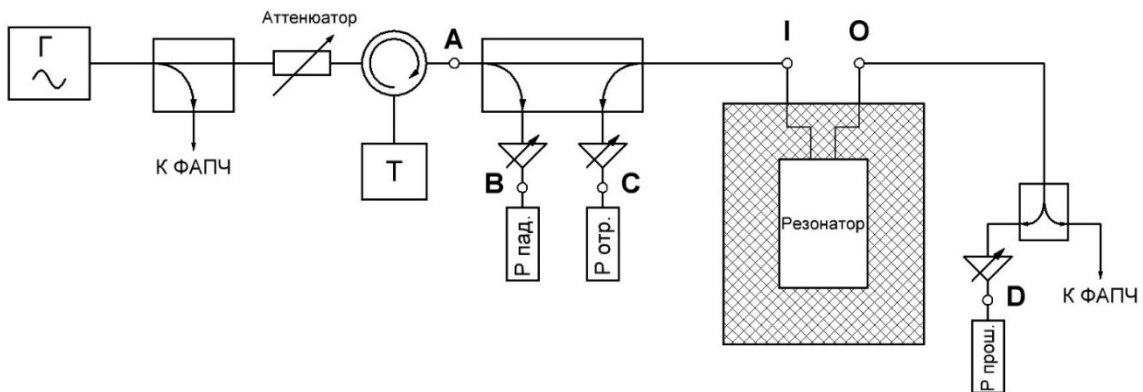


Рис. 3. Принципиальная схема ВЧ-тракта для измерения электромагнитного отклика резонатора.

3. Результаты эксперимента

На Рис. 4 представлен график зависимости резонансной частоты f_{res} прототипа от температуры при захолаживании.

Сдвиг резонансной частоты от комнатной температуры к 4.2 К составил $\Delta f_{res} = +520$ кГц.

Добротность резонатора рассчитывалась из динамического (затухание) и статического отклика резонатора. Для измерения добротности в режиме сверхпроводимости не

использовался векторный анализатор цепей, так как последний не мог обеспечить необходимое частотное разрешение для измерения спектра в условиях модуляции резонансной частоты частотами различного типа шума.

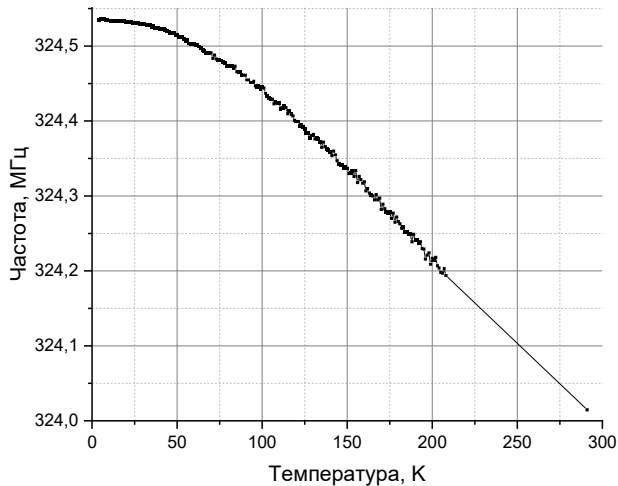


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты f_{res} резонатора от температуры.

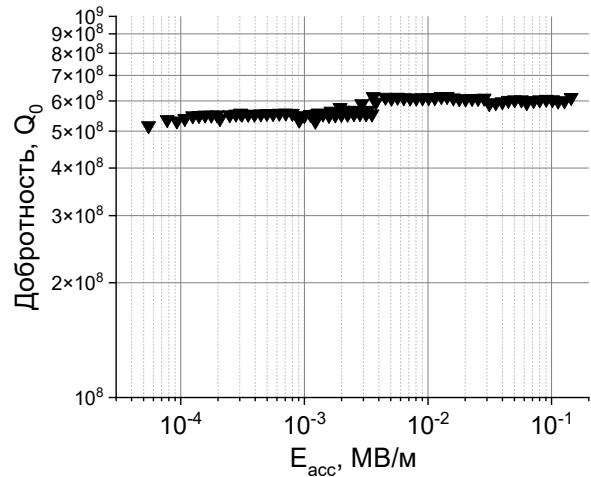


Рис. 5. Зависимость собственной добротности Q_0 резонатора от градиента ускоряющего поля.

На Рис. 5 представлены результаты измерения добротности Q_0 при различной величине градиента ускоряющего поля E_{acc} .

Коэффициент связи устройства ввода мощности при измерениях был равен $\beta = 0.6$. Экспериментальные значения добротности на всем диапазоне градиентов составляли $Q_0 = 5-6 \cdot 10^8$. Характерного LFQS в этом диапазоне для данного типа резонатора не наблюдается, что соответствует [5–7]. Мощность падающего сигнала P_{forw} варьировалась от 0 дБм до –65 дБм.

4. Заключение

Были изготовлен и исследован прототип ниобиевого коаксиального полуволнового резонатора 325 МГц с $\beta = 0.21$. Проведены криогенные испытания при температуре 4.2 К для изучения электромагнитного отклика резонатора в состоянии сверхпроводимости. Из динамического и статического отклика резонатора при различных мощностях падающего сигнала была получена зависимость добротности от градиента ускоряющего поля. Показано отсутствие характерного LFQS для данного типа резонатора после химического травления, отмывки под высоким давлением, отжига при 120 °С в течение 48 ч. Представленные результаты будут использованы для дальнейшей разработки и производства сверхпроводящих ниобиевых резонаторов аналогичной конструкции для проекта NICA.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Д. Черкунову, А. Котовой, Ю. Беспалову, Е. Тамашевичу, Д. Никифорову за помощь в проведении криогенных испытаний.

5. Список литературы

- [1] R. Russo, A. Chatel, N.Ş. Solmaz, R. Farsi, H. Furci, J. Brugger, and G. Boero, Fabrication and characterization of NbTi microwave superconducting resonators, *Micro and Nano Engineering*, vol. **19**, 100203; doi: 10.1016/j.mne.2023.100203

- [2] M. Heidari, and S.M.H. Javadzadeh, Analyzing and modeling of an ultra-compact superconducting resonator for kinetic inductance detectors applications, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. **592**, 1353987; doi: 10.1016/j.physc.2021.1353987
- [3] D. Bychanok, et al., Comparison of electromagnetic properties during fabrication of copper and niobium prototypes of 325 MHz coaxial half-wave resonator, *JACoW*, SRF2021, WEPCAV010; doi: 10.18429/JACoW-SRF2021-WEPCAV010
- [4] A. Prudnikava, Y. Tamashevich, A. Makarova, D Smirnov., J. Knobloch, In-situ Synchrotron x-ray photoelectron spectroscopy study of medium-temperature baking of niobium for SRF application, *Superconductor Science and Technology*, vol. **37**; doi: 10.1088/1361-6668/ad4825
- [5] Grassellino, Anna, et al., Q-Slope Analysis of Low-Beta SRF Cavities, *AIP Conference Proceedings*, vol. **1352**, No. 1., 161; doi: 10.1063/1.3579234
- [6] M. Ge, F. Furuta, M. Liepe, G. Hoffstaetter, Field-dependent surface resistance of a superconducting rf cavity caused by surface impurity, *arXiv preprint arXiv:1507.08704*; doi: 10.48550/arXiv.1507.08704
- [7] A. Romanenko, D.I. Schuster, Understanding quality factor degradation in superconducting niobium cavities at low microwave field amplitudes, *Physical Review Letters*, vol. **119**, 26, 264801; doi: 10.1103/PhysRevLett.119.264801