

## ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ПОЛУВОЛНОВЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ НА ЧАСТОТУ 325 МГц ПРИ МАЛЫХ АМПЛИТУДАХ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ

*А. Сухоцкий<sup>a,1</sup>, Д. Быченко<sup>a,б,2</sup>, Е. Гурневич<sup>a</sup>, Г. Вольнец<sup>a</sup>,  
С. Гусев<sup>a</sup>, С. Максименко<sup>a</sup>, В. Петраковский<sup>б</sup>, А. Покровский<sup>б</sup>,  
И. Поболь<sup>б</sup>, В. Залесский<sup>б</sup>, Е. Тамашевич<sup>в</sup>, М. Гусарова<sup>д</sup>,  
М. Лалаян<sup>д</sup>, С. Полозов<sup>д</sup>, Д. Никифоров<sup>е</sup>, Ю. Беспалов<sup>е</sup>,  
А. Бутенко<sup>е</sup>, Е. Сыресин<sup>е</sup>, Г. Трубников<sup>е</sup>*

<sup>a</sup> Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск

<sup>б</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>в</sup> Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

<sup>в</sup> Берлинский центр материалов и энергии им. Г. Гельмгольца, Берлин

<sup>д</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

<sup>е</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Прототип ниобиевого полуволнового коаксиального резонатора ( $\beta = 0,21$ ) на частоту 325 МГц был разработан, изготовлен и протестирован при малых амплитудах высокочастотного поля. Электромагнитные свойства прототипа в сверхпроводящем состоянии исследовались при помощи высокостабильного ВЧ-генератора и детекторов мощности в режиме непрерывной волны и режиме затухания. На основе полученных экспериментальных данных отклика резонатора в сверхпроводящем состоянии рассчитаны его важнейшие характеристики: собственная добротность и ускоряющее поле. Экспериментально измеренная добротность исследуемого прототипа составила  $Q_0 = (3,5 \pm 0,1) \cdot 10^8$  при значениях входной мощности до +20 дБм.

The first results of characterization at low microwave field amplitudes of niobium prototype of a 325 MHz coaxial half-wave resonator with  $\beta = 0.21$  are presented and discussed. The electromagnetic properties in the superconductive state were investigated in a continuous wave regime and the decay mode using an RF generator and power detectors. The features of the cavity response in the superconducting state are analyzed for estimation of its main characteristics. The experimentally measured quality factor of the studied prototype is  $Q_0 = (3.5 \pm 0.1) \cdot 10^8$  at microwave power values up to +20 dBm.

PACS: 74.90.+n; 42.60.Da

---

<sup>1</sup>E-mail: [aliakseisuhotski@mail.ru](mailto:aliakseisuhotski@mail.ru)

<sup>2</sup>E-mail: [dzmitrybychanok@yandex.by](mailto:dzmitrybychanok@yandex.by)

## ВВЕДЕНИЕ

Полуволновые коаксиальные резонаторы (ПКР) широко используются в составе сверхпроводящих секций современных ускорителей тяжелых заряженных частиц [1, 2]. В данной работе представлены результаты сотрудничества научных коллективов из ОИЯИ, НИЯУ МИФИ, НИИЯП БГУ и ФТИ НАНБ по проектированию, разработке, производству и исследованиям свойств прототипа ПКР, работающего на частоте 325 МГц. Прототип ПКР-325 (рис. 1, а) был спроектирован и изготовлен в классической коаксиальной конфигурации [3]. На его основании в настоящее время изготавливаются 2 опытных образца сверхпроводящих полуволновых резонаторов ( $\beta = 0,21$ ) с рабочей частотой 325 МГц для использования в составе резонаторных ускорительных секций линейного ускорителя протонов и ионов — нового инжектора ускорительного комплекса нуклотрон-НИСА.

Контроль электромагнитных свойств на малых мощностях высокочастотного сигнала является важным промежуточным этапом в процессе изготовления резонатора. В предварительных экспериментах по измерению высокочастотных характеристик ПКР обычно используются векторные анализаторы цепей (ВАЦ). ВАЦ — это быстрый и удобный инструмент для контроля резонансной частоты и оценок добротности во время предварительных «теплых» испытаний резонаторов [3, 4]. Тем не менее использование ВАЦ сильно ограничено при измерениях свойств высокодобротных систем. Коаксиальные полуволновые резонаторы в сверхпроводящем состоянии имеют типичную добротность более  $10^8$ , и даже современные анализаторы цепей не позволяют проводить удовлетворительные измерения их характеристик. В этом случае для исследований свойств ПКР традиционно используется другая схема измерений, основанная на использовании высокостабильного ВЧ-генератора и измерителей мощности. В следующих разделах рассмотрены основные особенности методики высокочастотных измерений прототипа сверхпроводящего ПКР-325 в непрерывном режиме (continuous wave — CW) и в режиме затухания.

## 1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ СВОЙСТВ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО РЕЗОНАТОРА

Для эффективного проведения промежуточных вакуумных, температурных и ВЧ-испытаний ПКР был спроектирован и изготовлен тестовый криостат [5]. Общий вид резонатора с подключенным вводом мощности и приемной антенной в тестовом криостате представлен на рис. 1, б.

Промежуточные эксперименты с прототипом ПКР-325 показали, что измерения в частотной области с использованием современных ВАЦ позволяют удовлетворительно характеризовать резонаторы с добротностью до  $10^7$ . Для измерений более добротных систем используется другая экспериментальная установка (см. блок-схему на рис. 2). Она основана на высокостабильном ВЧ-генераторе, датчиках мощности и системе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

В данной схеме сигнал от генератора поступает на ввод мощности резонатора. При помощи двунаправленного ответвителя и датчиков мощности можно проводить пря-

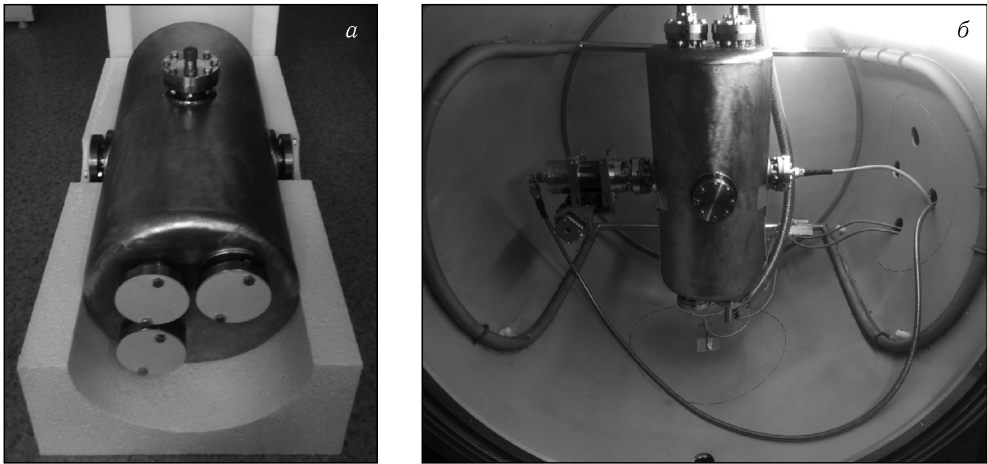


Рис. 1. а) Прототип коаксиального полуволнового резонатора; б) резонатор с подключенным вводом мощности и приемной антенной перед экспериментом в тестовом криостате

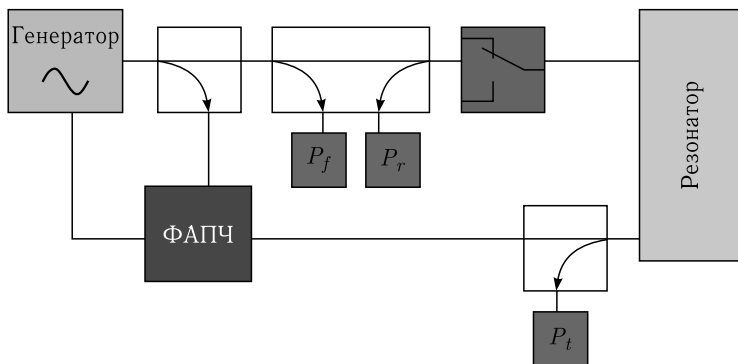


Рис. 2. Структурная схема стенда для измерения добротности прототипа НВР в сверхпроводящем состоянии

мые измерения падающей  $P_f$ , отраженной  $P_r$  и прошедшей  $P_t$  через резонатор мощности. В СВ-режиме эти величины используются для расчета коэффициента связи  $\beta$  ввода мощности.

## 2. МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОБРОТНОСТИ

При использовании схемы на рис. 2 экспериментально измеряемыми величинами являются падающая, отраженная и прошедшая мощность  $P_f$ ,  $P_r$ ,  $P_t$  соответственно. Общие соотношения между  $P_f$ ,  $P_r$ ,  $P_t$  и характеристиками сверхпроводящих резонаторов можно найти в работах [6, 7]. Для случая ПКР-325 ( $\beta = 0,21$ ) выражения для расчета добротности  $Q_0$  принимают следующий вид:

$$Q_0 = Q_L \left[ 1 + \beta \left( 1 + \frac{P_t}{P_{\text{diss}}} \right) + \frac{P_t}{P_{\text{diss}}} \right], \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент связи ввода мощности;  $P_{\text{diss}}$  — мощность потерь на стенках резонаторов;  $Q_L$  — нагруженная добротность

$$\beta = \frac{1 - \sqrt{P_r/P_f}}{1 + \sqrt{P_r/P_f}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{diss}} = P_f - P_r - P_t. \quad (3)$$

Для экспериментов во временной области  $Q_L$  может быть рассчитана на основании измерений постоянной затухания  $\tau$ . После отключения ВЧ-генератора в СВ-режиме система переходит в режим затухания, в котором энергия, запасенная в резонаторе, постепенно выходит через порты ввода мощности и измерительной антенны. При этом датчики мощности фиксируют изменение сигналов на антенне и при вводе мощности с течением времени. Этот процесс хорошо описывается экспоненциальным законом, постоянную затухания  $\tau$  которого легко оценить. В этом случае  $Q_L = 2\pi f\tau$ , где  $f$  — рабочая частота резонатора. Отметим также, что для экспериментов в частотной области  $Q_L$  можно рассчитать по  $S_{21}$ -спектрам, измеренным ВАЦ,  $Q_L = f/\Delta f$ , где  $\Delta f$  — ширина пика прохождения на половине максимума.

Наконец, связь между добротностью и ускоряющим полем в резонаторе определяется выражением

$$E_{\text{acc}} = \frac{\sqrt{Q_0 P_{\text{diss}}(r/Q)}}{L}, \quad (4)$$

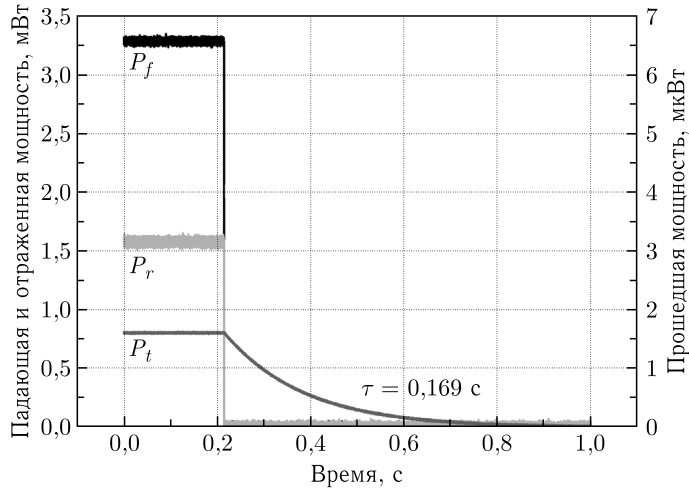
где  $r/Q$  — шунтовое сопротивление (shunt impedance);  $L$  — длина ускоряющего зазора. Величина  $r/Q$  обычно рассчитывается численно, например, при помощи моделирования в CST. Для рассматриваемого в данной работе прототипа ПКР-325  $r/Q = 306$  Ом,  $L = 2 \cdot 0,043$  м.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИОБИЕВОГО ПРОТОТИПА

Измерения в СВ-режиме позволяют получить информацию об энергетическом балансе в ПКР. На основании измеренных в СВ-режиме значений  $P_f$ ,  $P_r$ ,  $P_t$  можно оценить коэффициент связи  $\beta$  и рассчитать слагаемое в квадратных скобках в выражении (1). Для получения недостающего множителя  $Q_L$  выполняется выключение генератора и проводятся измерения скорости затухания колебаний в резонаторе со временем. При проведении экспериментов вместе с выключением генератора одновременно проводилось переключение каналов  $P_f$  и  $P_r$  на рассогласованную нагрузку. Таким образом, в режиме затухания измерялась только мощность, выходящая через измерительную антенну, а изменение энергии в резонаторе в этом случае в основном определялось потерями на поверхности ниобия. Добротность антенны при этом составила около  $10^{10}$ .

Типичный результат измерений мощностей в СВ-режиме и в режиме затухания для исследуемого прототипа ПКР-325 представлен на рис. 3 (левая и правая части графика соответственно).

На основании экспериментальных данных на рис. 3 можно сделать оценки собственной добротности прототипа. Варьирование входной мощности в пределах

Рис. 3. Временные зависимости мощностей  $P_f$ ,  $P_r$ ,  $P_t$  в СВ-режиме и режиме затухания

–18–+20 дБм позволяло построить зависимость добротности прототипа от значений ускоряющего поля. На рис. 4 представлены зависимости добротности прототипа ПКР-325 от ускоряющего поля при использовании двух различных типов генераторов: аналогового G4-107 и цифрового N9310A.

В экспериментах с двумя различными генераторами в исследуемом диапазоне ускоряющих градиентов 0,03–0,6 МВ/м экспериментальные значения добротности прототипа оставались практически постоянными:  $Q_0 = (3,5 \pm 0,1) \cdot 10^8$ . Отметим, что полученное значение примерно в три раза меньше теоретически ожидаемого  $Q_0 \sim 10^9$  при 4,2 К. Возможная причина — малые амплитуды СВЧ-поля, использованные в эксперименте (входящая мощность до +20 дБм). Согласно [8], этот эффект хорошо

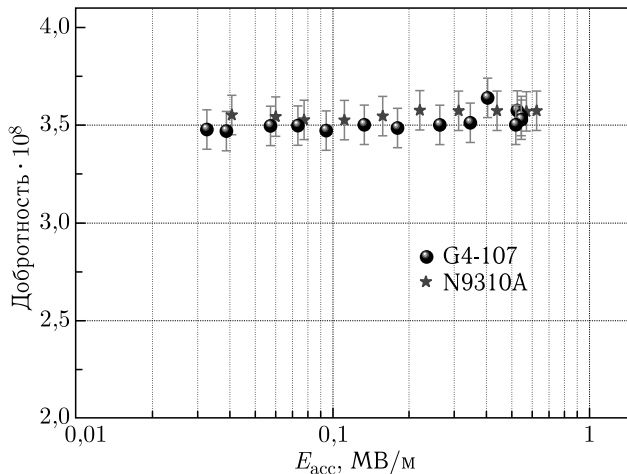


Рис. 4. Зависимость добротности прототипа от ускоряющего поля при использовании двух различных типов генераторов: G4-107 и N9310A

известен для эллиптических сверхпроводящих резонаторов, работающих на частоте 1,3 ГГц. В литературе для него часто встречается название *спад добротности при низких амплитудах поля* (LFQS-low field Q-slope).

Важно отметить, что в отличие от эллиптических резонаторов, для которых характерен значительный рост добротности [8] в области значений ускоряющего градиента 0,1–1 МВ/м, существенного увеличения добротности прототипа ПКР-325 в указанном диапазоне градиентов не наблюдалось. Дальнейшие эксперименты с более высоким уровнем падающей мощности позволят получить больше информации о LFQS для ниобиевых ПКР-325.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты демонстрируют возможность разработки и совместного производства в Республике Беларусь и Российской Федерации сверхпроводящих резонаторов для задач ускорительной техники. Совместные усилия коллективов из ОИЯИ, НИЯУ МИФИ, НИИЯП БГУ и ФТИ НАНБ привели к созданию сверхпроводящего прототипа ПКР-325 с характеристиками, близкими к проектным. Экспериментально измеренная добротность ПКР-325 при малых амплитудах СВЧ составила  $Q_0 = (3,5 \pm 0,1) \cdot 10^8$  при значениях входной мощности до +20 дБм. Представленные результаты будут использованы для дальнейшей разработки и изготовления ниобиевых резонаторов ПКР-325 для проекта NICA.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Facco A., Scarpa F., Zenere D., Losito R., Zoyagintsev V.* // Phys. Rev. ST. Accel. Beams. 2006. V. 9. P. 110101.
2. *Delany J. R., Bohn C. L., Roches C. T.* // IEEE Trans. Magn. 1991. V. 27, No. 2. P. 1924–1927.
3. *Butenko A., Syresin E., Trubnikov G., Nikiforov D., Gusarova M., Lalayan M., Matsievskiy S., Nemchenko R., Polozov S., Sobenin N., Shatokhin V., Bychanok D., Sukhotski A., Huseu S., Maksimenko S., Shvedov A., Yurevich S., Petrakovsky V., Pokrovsky A., Pobol I., Zaleski V.* // Proc. of the XXVII Russ. Part. Accel. Conf. 2021. P. THA01.
4. *Bychanok D., Sukhotski A., Huseu S., Vasilevich E., Gurnevich E., Walynets G., Liubetski N., Maksimenko S., Shvedov A., Petrakovski V., Pakrouski A., Yurevich S., Tamashevich Y., Gusarova M., Lalayan M., Polozov S., Butenko A., Syresin E.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. V. 54, No. 25. P. 255502.
5. *Bychanok D., Huseu S., Vasilevich E., Sukhotski A., Bayev V., Maksimenko S., Gusarova M., Lalayan M., Polozov S., Shvedov A., Yurevich S., Petrakovsky V., Pokrovsky A., Nikiforov D., Butenko A., Syresin E.* // Proc. of the XXVII Russ. Part. Accel. Conf. 2021. P. MOPSA16.
6. *Padamsee H., Knobloch J., Hays T.* Rf Superconductivity for Accelerators. John Wiley and Sons, Inc., 1998.
7. *Powers T.* Practical Aspects of SRF Cavity Testing and Operations. 2011. P. 60–63.
8. *Romanenko A., Schuster D. I.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 264801.

Получено 30 января 2024 г.