

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 621.384.663

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕЗОНАТОРНОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА ДЛЯ EuPRAXIA@SPARC_LAB

© 2022 г. Ш. Биланишвили*

Кутаисский международный университет, Кутаиси, 4600 Грузия

*E-mail: Shalva.Bilanishvili@kiu.edu.ge

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 16.08.2021 г.

EuPRAXIA@SPARC_LAB [1, 2] предоставит в LNF уникальную комбинацию, предлагающую три различных варианта: электронный пучок высокой яркости с энергией 1 ГэВ, генерируемый в новом высокочастотном линейном ускорителе X-диапазона; лазерная система класса PW; компактный источник света, управляемый непосредственно плазменным ускорителем. Лазер на свободных электронах (FEL) с плазменным и обычным высокочастотным линейным ускорителем обеспечивает пучок с параметрами в диапазоне зарядов 30–200 пКл, частоте повторения 10–100 Гц и энергии электронов 1 ГэВ. Контроль заряда и отслеживание траектории на уровне нескольких пикокулон и нескольких мкм является обязательным в этой машине. В частности, в области взаимодействия с плазмой, где требуется разрешение датчика менее чем 1 мкм. В качестве возможного решения предлагается резонаторный датчик положения пучка (сВРМ) [3]. Создан прототип в диапазоне частот С-диапазона. Модель датчика был оптимизирован для работы с малозарядными и единичными сгустками, чтобы соответствовать требованиям проекта. Здесь представлен процесс достижения требуемых характеристик. Моделирование проводилось для изучения радиочастотных свойств и электромагнитного отклика устройства.

Ключевые слова: резонаторный датчик положения пучка, аппаратура, электромагнитное моделирование

DOI: 10.56304/S2079562922010079

ВВЕДЕНИЕ

При разработке резонаторного датчика положения пучка каждая размерная величина выбирается так, чтобы улучшить общую разрешающую способность системы и обеспечить простую и эффективную механическую структуру. С увеличением резонансной частоты резонатора размер всей функциональной структуры уменьшается. Структура резонаторного датчика положения пучка, разработанная для частот С-диапазона, будет компактной, но при этом достаточно большой, чтобы ее можно было обрабатывать с достаточной точностью [4].

Рабочая частота датчика была выбрана равной 5.1 ГГц, чтобы уменьшить возможные помехи с рабочей частотой линейного ускорителя X-диапазона 11.994 ГГц. Другими важными характеристиками, которые имеют решающее значение в процессе разработки прототипа, являются: коэффициент нагруженной добротности Q_L , чувствительность и требуемое разрешение, которые были определены в соответствии со спецификациями пучка для проекта EuPRAXIA@SPARC_LAB. Эти

параметры для прототипа монитора перечислены в табл. 1.

Как показано на рис. 1, датчик состоит из двух полостей, измеряющих положение и заряд. Рабочими модами являются TM_{110} (дипольная мода первого порядка) для так называемого позиционного резонатора и TM_{010} (монополь) для резонатора, измеряющего заряд. Когда пучок проходит через датчик, он индуцирует сигналы, пропорциональные произведению заряда и смещения положения в резонаторе положения, а также заряду только в резонаторе, измеряющем заряд. Положе-

Таблица 1. Требуемые параметры для резонаторного датчика положения пучка

Параметр	Значения
Частота f , ГГц	5.1
Коэффициент нагруженной добротности Q_L	≈ 500
Чувствительность, В нКл ⁻¹ мм ⁻¹	5
Разрешение, мкм	1

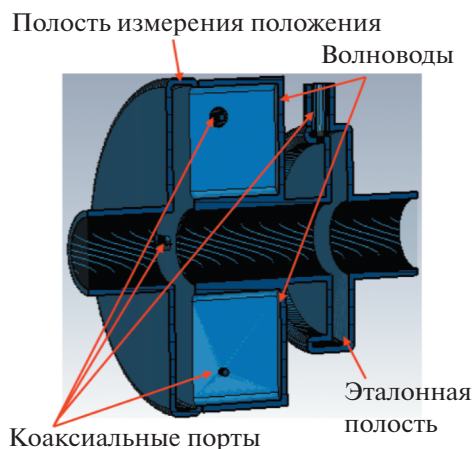


Рис. 1. Схематический вид половинного разреза резонаторного датчика положения пучка (показан: медный корпус).

ние луча затем определяется путем деления двух амплитуд сигнала, которые доступны при использовании правильно спроектированных соединителей. В частности, позиционный резонатор имеет четыре прямоугольных волновода, которые связаны с дипольной модой, подавляя монопольную моду, которая в противном случае ограничила бы разрешающую способность электроники [5].

Волноводы присоединены к резонатору и размещены с поворотом на 90° друг к другу на одной боковой стенке резонатора. Каждый волновод имеет переход на коаксиальную линию, которая заканчивается стандартным выходом разъема коаксиального электрического соединителя. В резонаторе, измеряющем заряд, сигнал выводится через коаксиальную линию, где внутренний проводник проходит через прокладку резонатора. Позиционный и зарядный резонаторы должны иметь

достаточно большое расстояние между собой, чтобы избежать перекрестных помех. Это расстояние необходимо увеличивать с увеличением диаметра трубы для пучка. В следующих разделах представлена конструкция датчика с ВЧ характеристиками первого прототипа датчика.

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЗАЙНА РЕЗОНАТОРНОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Конструкция волновода, который соединяет полости резонансных мод с коаксиальными портами, имеет геометрию, которая усиливает связь между модой волновода TE_{10} и дипольной модой резонатора TM_{110} и препятствует связи с монопольными модами резонатора. Таким образом, волноводы являются фильтром первой ступени синфазной связи. Даже если синфазная связь в идеале равна нулю, всегда остается некоторая остаточная связь из-за механических неточностей датчика.

Одной из конкретных причин остаточной синфазной связи являются отклонения угла юстировки волновода и ошибки сдвига в процессе изготовления датчика. Графики, представленные на рис. 2, показывают выходное напряжение на портах резонатора, вызванное взаимодействием мод TM_{010} из-за производственных ошибок, связанных с механическим положением и углом наклона волноводов.

Еще один нежелательный эффект, вызванный механическими допусками, это связь между горизонтальной и вертикальной плоскостями. В идеале, пучок, пересекающий резонатор с чисто горизонтальным (вертикальным) смещением, должен давать чистый горизонтальный (вертикальный) выходной сигнал. Однако асимметрии, вносимые

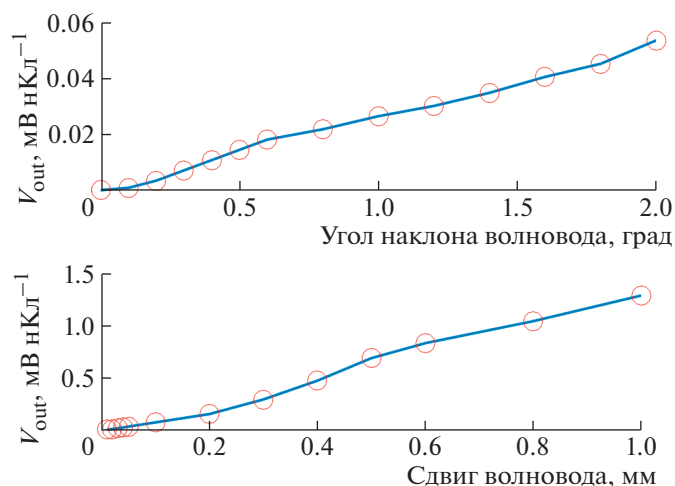


Рис. 2. Связь монопольных мод с коаксиальными портами из-за ошибок несоосности волновода.

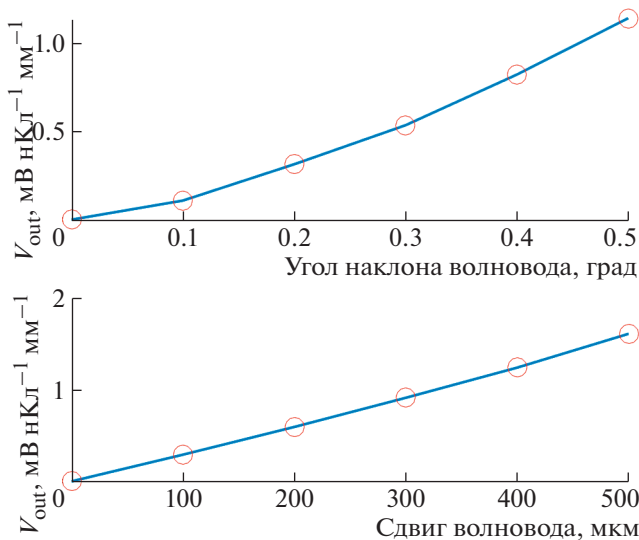


Рис. 3. Связь дипольных мод с ортогональным портом как функция угла и ошибок положения волновода.

в геометрию механическими допусками, вызывают перекрестное соединение между плоскостями.

Основное отличие от синфазной связи состоит в том, что даже симметрично совершенная структура имеет некоторую остаточную связь между ортогональными портами из-за квадрупольной моды TM_{210} . Волноводы прочно связывают эту моду, но невозможно различить, является ли смещение пучка горизонтальным или вертикальным. Из-за очень низкого импеданса связи пучка этой моды остаточная ортогональная связь оказывает незначительное влияние на измерение положения. На рис. 3 показана дипольная мода с перекрестной связью на ортогональном порте, полученная для чисто параллельного смещения луча, для различных ошибок выравнивания волновода.

Моделирование Кильватера

После проведения моделирования кильватерного поля [6] мы исследовали реакцию резонатора на возбуждение сгустком заряженных частиц, движущихся по пучковой трубе, по сравнению с возбуждением на портах, используемых в моделировании S -параметров.

Моделируемый пучок представлял собой гауссов импульс длиной 1 мм, содержащий заряд 1 нКл. Перемещая положение сгустка в пучковой трубе, мы могли определить влияние асимметричного введения в конструкцию.

Рисунок 4 показывает типичный сигнал, выходящий с одного из портов, со смещением пучка 1 мм по оси y . Как мы видим, сигнал состоит из разных мод, с разными амплитудами возбуждения и скоростью затухания.

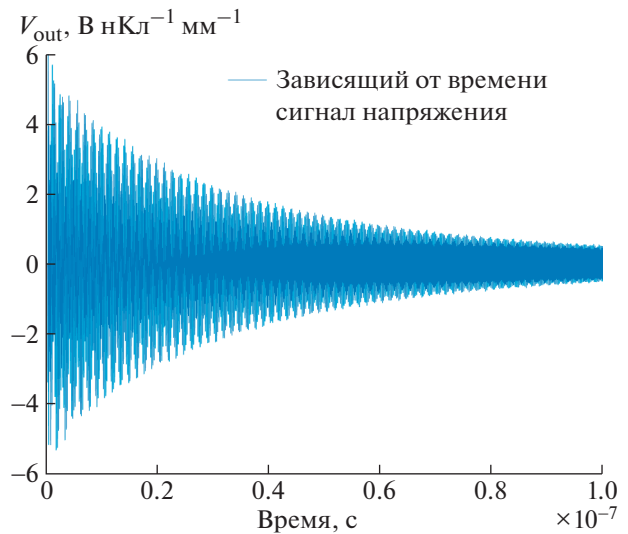


Рис. 4. Необработанный сигнал порта из позиционной полости для смещенного на 1 мм пучка.

Действительно, взяв быстрое преобразование Фурье сигнала порта позиционного резонатора (рис. 5), мы можем увидеть моды, которые доминируют на выходе. Доминирующая частота моды составила 5.1 ГГц, что соответствует дипольной моде низшего порядка.

Когда пучок смещался только по оси x или y , это был единственный значимый сигнал. Однако, когда пучок находился вне оси в обоих измерениях, появлялся дополнительный пик квадрупольной моды TM_{210} . Этот отклик является сигнатурой квадрупольной моды: смещение луча по x или y создает только симметричное поле относительно

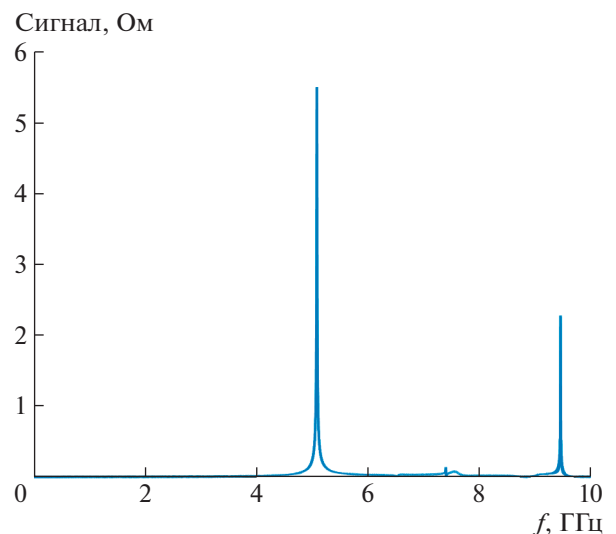


Рис. 5. Быстрое преобразование Фурье сигнала порта положения пучка.

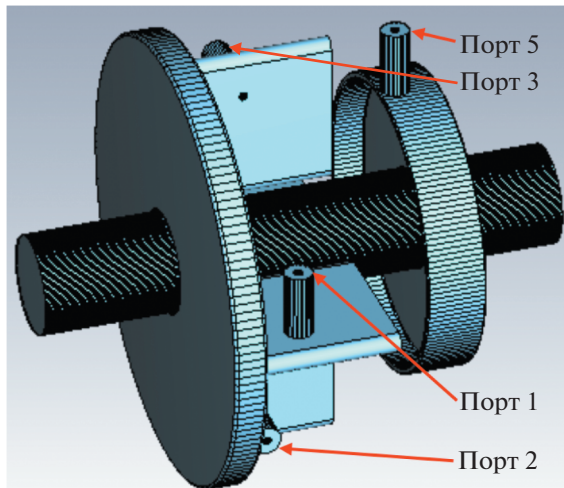


Рис. 6. Схематический вид резонаторного датчика положения пучка (показано: вакуум), порт 3 находится в той же плоскости, что и порт 1.

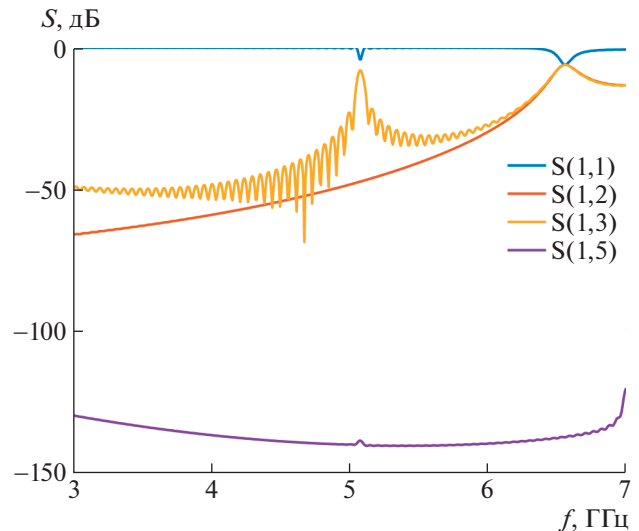


Рис. 7. S -параметры для резонаторного датчика положения пучка.

Таблица 2. Основные характеристики прототипа резонаторного датчика положения пучка

Параметр	Численный расчет		
	TM ₀₁₀	TM ₁₁₀	Эталон
f , ГГц	3.419	5.100	5.100
Q_0	2800	2200	1400
Q_L	—	450	410
Время затухания, нс	—	28.17	25.6
R/Q , Ом	52	0.5	48
V_{out} , В нКл ⁻¹ мм ⁻¹	—	4.9	36
Отношение сигналов угол/положение, град/мм	—	0.0163	—
Теоретическое разрешение, нм	—	170	—

но волноводов и поэтому не взаимодействует. Однако, когда пучок смещен как по x , так и по y , симметрия нарушается и генерируется четырех-полюсная мода, некоторая часть которой может выходить в волновод [7].

Моделирование в частотной области

Моделирование в частотной области было выполнено в [8], чтобы оценить уровень перекрестной связи между коаксиальными портами. Для этого мы зарегистрировали концы каждого коаксиального ввода как волновые порты (рис. 6) и нарисовали для них S -параметры (рис. 7).

Как видно из рис. 7, уровень перекрестной связи между зарядным и позиционным резонаторами находится на уровне от -140 до -145 дБ, что означает

что расстояние между резонаторами 32.5 мм обеспечивает достаточную изоляцию между ними.

ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Предложен прототип двухрезонаторного датчика положения пучка с коэффициентом нагруженной добротности $Q_L \approx 500$ и чувствительностью 4.9 В нКл⁻¹ мм⁻¹. Приблизительное теоретическое разрешение, включая только тепловой шум, составляет ≈ 170 нм, эти характеристики указаны в табл. 2.

После изготовления первых прототипов будут выполнены лабораторные измерения и испытания пучка. Такой новый испытательный стенд для резонаторного датчика положения пучка в SPARC LAB в INFN-LNF был разработан и будет использоваться в будущих тестах прототипа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Ferrario M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2018. V. 909. P. 134.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.094>
2. *Assman R.W. et al.* // Tech. Rep. INFN No. 18-03/LNF. 2018.
3. *Bilanishvili S.* Design and Studying Physical Properties of Cavity Beam Position Monitors for Electron Accelerators. Doctoral Thesis.
4. *Lunin A.* // Proc. 8th DITANET Topical Workshop on Beam Position Monitors. 2012. CERN, Switzerland. P. 1.
5. *Marcellini F. et al.* // Proc. IBIC2012 Conf. 2012. Tsukuba, Japan.
6. Computer Simulation Technology (CST). <http://www.cst.com>.
7. *Morgan A. et al.* // Proc. BIW10. 2020. Santa Fe, New Mexico, USA.
8. ANSYS HFFS. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansyshffs>.

Design and Studying Physical Properties of Cavity BPM Pickup for EuPRAXIA@SPARC_LAB

S. Bilanishvili*

Kutaisi International University, Kutaisi, 4600 Georgia

**e-mail: Shalva.Bilanishvili@kiu.edu.ge*

Received July 19, 2021; revised August 9, 2021; accepted August 14, 2021

Abstract—EuPRAXIA@SPARC_LAB [1, 2] will make available at LNF a unique combination offering three different options: a high-brightness electron beam with 1 GeV energy generated in a novel X-band RF linac; a PW-class laser system; a compact light source directly driven by a plasma accelerator. Plasma and conventional RF linac driven FEL provide beam with parameters of 30–200 pC charge range, 10–100 Hz repetition rate, and 1 GeV electron energy. The control of the charge and the trajectory monitoring at a few pico coulomb and a few micrometers is mandatory in this machine. Particularly in the plasma interaction region, where the pickup resolution under 1 μm is required. As a possible solution, a cavity beam position monitor (cBPM) is proposed [3]. A prototype in the C-band frequency range has been designed. The pickup was optimized for low charge and single-shot bunches to meet the project requirements. Here is presented the process to achieve the required specifications. The simulations were performed to study RF properties and the electromagnetic response of the device.

Keywords: cavity beam position monitors, instrumentation, electromagnetic simulations