

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗОНАТОРА НА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ ДЛЯ ПИТАНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ НА ОСНОВЕ ДИАФРАГМИРОВАННОГО ВОЛНОВОДА

А. М. Барняков^a, А. Е. Левичев^a, С. Л. Самойлов^{a, 1}, Д. И. Чекменёв^a

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

Приведена схема питания ускоряющей секции (УС) на основе диафрагмированного волновода резонатором бегущей волны (РБВ). Представлен расчет ускоряющего поля в УС при работе с РБВ, подобраны основные характеристики для согласования волноводного тракта с РБВ. Проведен расчет для разных длин УС, и определена оптимальная длина УС.

The paper presents a power supply circuit for an accelerating structure (AS) based on a travelling wave disk loaded waveguide by a travelling wave cavity (TWC). The calculation of the accelerating field in the AS when working with a TWC is presented, the main characteristics for matching the waveguide with the TWC are discussed. The calculation is performed for different AS lengths and the optimal AS length is determined.

PACS: 84.30.Jc

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире развитие линейных ускорителей электронов и позитронов для научных, промышленных и медицинских целей требует новых подходов к проектированию основных элементов для получения максимальных темпов ускорения. Одним из основных узлов является ускоряющая секция (УС), где происходит основное взаимодействие ускоряющего поля с частицами. Чаще всего УС, на вход которой подается СВЧ-мощность, выполнена на основе диафрагмированного волновода, работающего в виде колебания $2\pi/3$ [1].

Основным источником питания УС является клистрон. Для увеличения выходной мощности в выходной волноводный тракт устанавливаются компрессоры мощности. Классическим примером является SLED [2]. Изготовление подобных устройств требует большого объема бескислородной меди 5N, алмазной обработки внутренних поверхностей и высоких точностей при обработке основных элементов конструкции. При эксплуатации необходимо будет поддерживать температуру SLED на уровне $\pm 0,1^\circ\text{C}$ и иметь фазовый манипулятор СВЧ-сигнала с переключением фазы за 1 нс. При таких требованиях очень сильно возрастает стоимость оборудования.

¹E-mail: S.L.Samoilov@inp.nsk.su

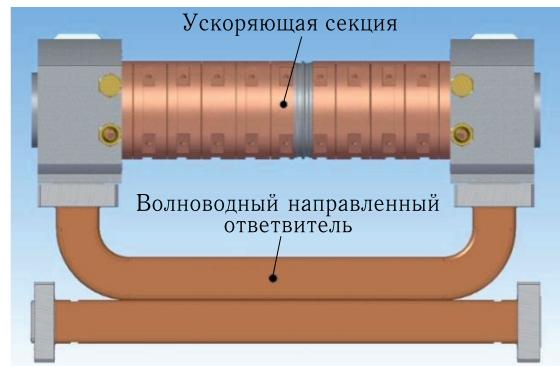


Рис. 1. Ускоряющая структура, встроенная в резонатор бегущей волны

Как альтернативу для частных задач предлагается использовать встроенную УС в резонатор бегущей волны [3]. На рис. 1 приведена схема конструкции с основными элементами.

РЕЗОНАТОР БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Резонатор бегущей волны (РБВ) представляет собой свернутый в кольцо волновод (свернутый, как правило, в электрической плоскости, т. е. в плоскости узкой стенки), возбуждаемый через отверстия связи направленного ответвителя [4] от источника СВЧ-мощности. Схема РБВ представлена на рис. 2.

Пример геометрии простейшего РБВ для численного моделирования с распределением электрического поля показан на рис. 2, а. Численное моделирование проводилось в среде CST Studio [5]. Здесь и далее на рисунках и в тексте значения полей приводятся для СВЧ-мощности 0,5 Вт.

Распределение электрического поля в волноводе РБВ представлено на рис. 3. Распределение амплитуды напряженности электрического поля в волноводе РБВ при-

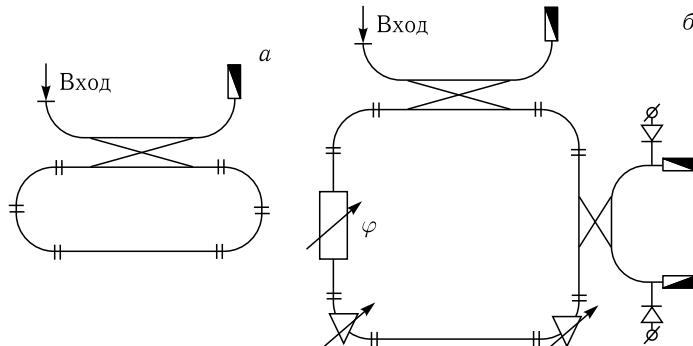


Рис. 2. Схема простейшего РБВ (а) и РБВ с фазовращателем, измерительным ответвителем и компенсаторами неоднородностей (б)

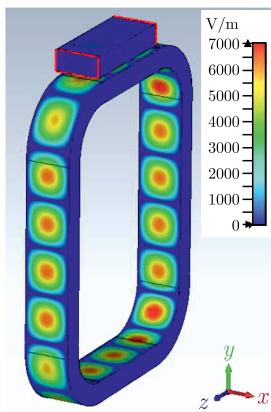


Рис. 3. Распределение электрического поля в РБВ

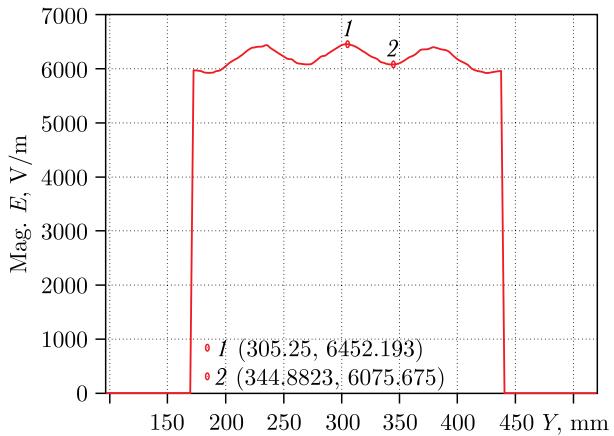


Рис. 4. Амплитуда напряженности поля E вдоль центра участка волновода РБВ

ведено на рис. 4. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВн) равен отношению максимума амплитуды напряженности электрического поля к минимуму и составляет $6450/6075 = 1,06$. Амплитуда напряженности электрического поля бегущей волны в регулярном волноводе — 670 В/м, т. е. множитель амплитуды поля для приведенного примера РБВ будет приблизительно равен $6300/670 = 9,4$. Собственная добротность РБВ от длины его периметра практически не зависит и по величине близка к добротности прямоугольного волновода, для медного волновода сечением 72×34 мм на частоте 2856 МГц это значение составляет около 18 000. Однако нагруженная добротность с увеличением длины кольца резонатора падает, поэтому для достижения максимально возможного увеличения амплитуды напряженности поля стоит делать РБВ компактным настолько, насколько это конструктивно возможно.

При этом повороты кольца должны быть достаточно плавными: для согласования (КСВн ($f = 2856$ МГц) $< 1,05$) поворота в плоскости узкой стенки волновода сечением 72×34 мм его радиус должен быть не менее 25 мм по внутренней стенке.

В качестве устройства ввода мощности используется волноводный направленный ответвитель со связью по широкой стенке. На рис. 5 представлена модель ответвителя: в плечо 1 подается СВЧ-мощность от генератора, в противоположном плече 2 — согласованная нагрузка, остальные два плеча, 3 и 4, являются частью кольца РБВ. Мощность от генератора через отверстия связи 5 отводится в плечо 3, создавая бегущую волну в кольце резонатора. В данном моделировании для настройки ответвителя менялись размеры отверстий связи и расстояния между ними. Подстройка частоты РБВ происходила за счет изменения его длины.

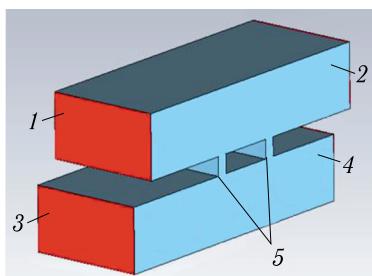


Рис. 5. Направленный ответвитель
в волноводном кольце РБВ

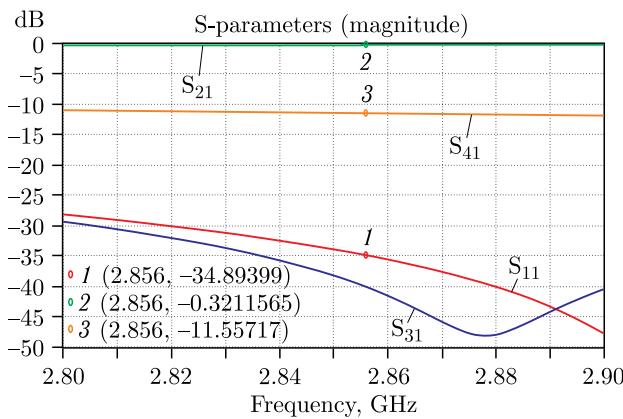


Рис. 6. S-параметры направленного ответвителя

На рис. 6 представлены следующие параметры: S_{11} — коэффициент отражения сигнала от ответвителя обратно в источник СВЧ (не должен превышать -20 дБ при хорошем согласовании ответвителя), S_{21} — коэффициент передачи сигнала от генератора в плечо 2, S_{31} — коэффициент ответвления сигнала в плечо 3 (необходимо минимизировать для хорошей направленности ответвителя), S_{41} — коэффициент ответвления сигнала в плечо 4 (переходное ослабление ответвителя). Значения S-параметров ответвителя на рабочей частоте 2856 МГц: $S_{11} = -35$ дБ, $S_{21} = -0,3$ дБ, $S_{31} = -40$ дБ, $S_{41} = -11,6$ дБ. Для получения режима бегущей волны в РБВ ответвитель следует настраивать так, чтобы параметр S_{31} был меньше параметра S_{41} хотя бы на 20 дБ и КСВн в кольце не превышал 1,2. Для того чтобы вся мощность от источника СВЧ поступала в РБВ, необходимо точно подобрать связь ответвителя — параметр S_{41} . Иначе часть мощности будет уходить в нагрузку и (или) часть будет возвращаться обратно в источник. Для рассмотренного варианта параметр S_{41} равен $-11,6$ дБ, для других вариантов он может быть другим, в зависимости от того, как будет меняться нагруженная добротность РБВ с включенными в него устройствами.

КОРОТКАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА С РБВ

Распределение электрического поля в короткой ускоряющей структуре с РБВ показано на рис. 7. Коэффициенты отражения от ответвителя и прохождения в нагрузку S_{11} и S_{21} приведены на рис. 8. Распределение амплитуды напряженности электрического поля на оси структуры представлено на рис. 9.

Параметры направленного ответвителя настраивались на минимальный КСВн в тракте РБВ и были упомянуты выше (см. рис. 5). Полученный КСВн $< 1,07$. На рабочей частоте $S_{11} = -23$ дБ и $S_{21} = -58$ дБ, т. е. более 99 % мощности уходит в структуру с РБВ. Значение максимума амплитуды напряженности поля в ускоряющей структуре — в области 10 кВ/м, и множитель амплитуды напряженности поля в ускоряющей структуре с РБВ по сравнению со структурой без РБВ примерно равен 3,7.

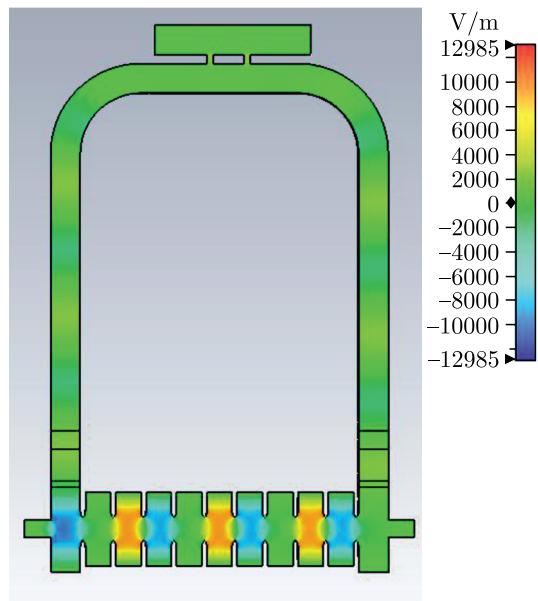
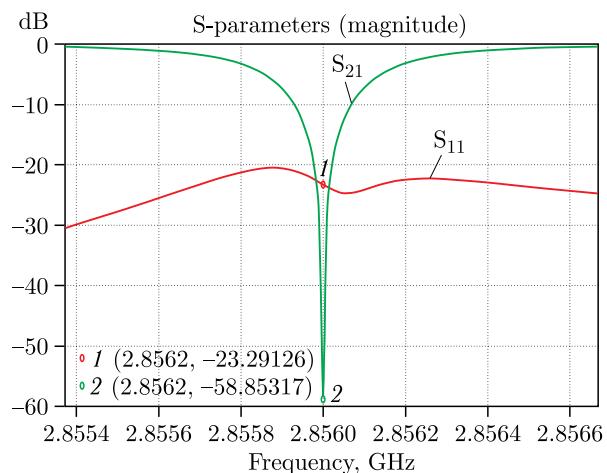


Рис. 7. Распределение электрического поля в короткой ускоряющей структуре с РБВ

Рис. 8. Коэффициенты отражения и прохождения S_{11} и S_{21}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе моделирования выяснилось, что настройка структуры с РБВ заметно усложняется из-за внесения в схему ускорителя таких дополнительных элементов, как направленный ответвитель и, собственно, РБВ. Необходимый режим бегущей волны

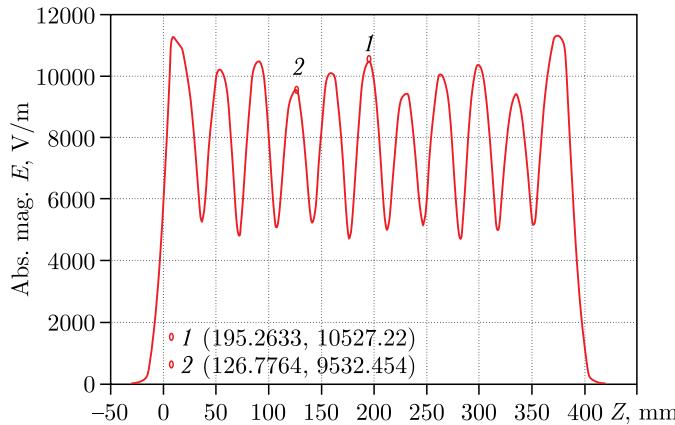


Рис. 9. Распределение амплитуды поля E вдоль оси короткой ускоряющей структуры с РБВ

в РБВ осуществить оказалось не так просто из-за того, что вблизи резонансной частоты он легко «срывается» в режим стоячей волны. Приходится производить много расчетов в поиске подходящих параметров отверстий связи ответвителя. Использование классического многодырочного ответвителя [4] с хорошей направленностью при моделировании РБВ показало те же проблемы. Как в реальности настраивать ответвитель при сборке РБВ — вопрос открытый. Стоит упомянуть, что сам по себе РБВ достаточно сложен в настройке [3], особенно в вакуумном исполнении. В отличие от численной модели реальное устройство РБВ подразумевает дополнительные элементы (фазовращатель, измерительный ответвитель, компенсаторы отражений и т. д.), увеличивающие его размеры и усложняющие конструкцию. Так же узкая полоса частот РБВ может дополнительно повысить требования к точности настройки и механической и температурной стабилизации установки. Тем не менее схема ускоряющей структуры с РБВ позволяет повысить амплитуду напряженности поля почти в 4 раза для короткой структуры. Такая схема позволяет укоротить структуру в 4 раза для достижения той же энергии пучка при том же источнике питания. Получается, что применение РБВ целесообразно при совокупности двух ограничений: на длину ускоряющей структуры (например, для увеличения значения критического тока пучка уменьшают длину структуры) и на мощность источника СВЧ. Так же немаловажным является достоинство схемы ускоряющей структуры с РБВ с вводом СВЧ-мощности через направленный ответвитель, заключающееся в том, что при электрических пробоях в ускоряющей структуре отсутствует опасность отраженной обратно в источник СВЧ-мощности волны, так как при любом рассогласовании РБВ мощность проходит напрямую от источника в нагрузку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левичев А. Е., Павлов В. М. Линейные СВЧ-ускорители. Ч. I. Электродинамика ускоряющих структур на основе круглого диафрагмированного волновода: Учеб. пособие. Новосибирск, 2015. С. 42.

2. Малыцева М.В., Павлов В.М., Самойлов С.Л. и др. Измерения резонаторов системы умножения мощности типа SLED // Сиб. физ. журн. Т. 12, № 4. С. 20–29.
3. Бабкин Е.Г., Балакин В.Е., Клюев В.Ф. и др. Резонатор бегущей волны на 14 ГГц с мощностью выше 100 МВт. Препринт ИЯФ 95-48. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1995.
4. Фельдштейн А.Л., Явин Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов. радио, 1967. С. 588.
5. <https://www.cst.com/>

Получено 28 октября 2024 г.