

Применение открытых резонаторов в системах умножения СВЧ - мощности

Б.Е.Балакин, И.В.Сырачев

Филиал Института ядерной физики СО РАН, Протвино, Россия

В работе представлены результаты работ по созданию новой системы им-пульсной компрессии СВЧ-мощности сантиметрового диапазона для линейного коллайдера ВЛЭПП — VPM, на основе бочкообразных открытых резонаторов.

1. Введение

Одной из главных задач при проектировании будущего линейного коллайдера является создание сверхмощных импульсных СВЧ-источников. Интенсивные разработки таких источников ведутся в ускорительных лабораториях, связанных с этой тематикой: ВЛЭПП (ФИЯФ, Россия), NLC (SLAC, США), JLC (KEK, Япония), DESY (Германия). На сегодняшний день основным кандидатом на роль источника СВЧ-мощности для питания будущего линейного коллайдера является импульсный СВЧ-клистрон. Обычно длительность выходного СВЧ-импульса клистрона в несколько раз превышает время, необходимое для заполнения секции ускорителя. Этот факт позволил разработать так называемые системы “временной компрессии” (СВК), которые за счет укорочения длительности выходного импульса клистрона в несколько раз увеличивают СВЧ-мощность, поступающую в ускоряющую секцию. Использование СВК в системе СВЧ-питания ускорителя позволяет снизить требования на уровень выходной мощности клистрона, либо сократить их количество, необходимое для работы всего коллайдера.

Разработка умножителя СВЧ-мощности в рамках программы ВЛЭПП явилась попыткой создания на основе имеющегося опыта простой, высокоэффективной и малогабаритной системы. Принцип действия данного устройства тот же, что используется при работе SLED и SLED II и детально описан в литературе [1,2]. Главным отличием является то, что для обеспечения одномодового режима работы устройства предложено использовать высокодобротный открытый резонатор (БОР) [3].

2. Бочкообразный открытый резонатор

Геометрия БОР выбирается таким образом, чтобы эффективно возбуждались колебания с большими азимутальными индексами (“волны шепчущей галереи”), а колебания со слабой азимутальной зависимостью не могли формироваться. В результате многократного отражения электромагнитных волн от стенки резонатора поля колебаний с большими азимутальными индексами оказывается сосредоточенным в относительно малом объеме вблизи отражающей поверхности резонатора и защищено от излучения в свободное пространство каустическими поверхностями. Детальная теория БОР изложена в [4]. Здесь мы только отметим, что добротность такого резонатора, обусловленная омическими потерями в стенках, может быть определена из геометрических соображений с использованием коэффициентов отражения Френеля. Для колебания TM_{mnq} получим

$$Q_{im} = \frac{a}{\sigma_s}, \quad (1)$$

где a — радиус резонатора; σ_s — толщина скин-слоя. Нетрудно видеть, что для медного резонатора, если отношение $2a/\lambda$ более 10, то добротность колебания более 100 000.

Для экспериментальных исследований БОР были изготовлены несколько типов резонаторов. При их изготовлении была использована специальная технология для обеспечения высокого качества поверхности и максимально возможного соответствия профиля резонатора теоретическому. Измерения БОР проводились на специально разработанном автоматизированном стенде. Для идентификации собственных колебаний измерялись азимутальное и радиальное распределения полей рабочего колебания в резонаторе. Собственная добротность измерялась фазовым методом. Ошибка измерения добротности не превышала $\pm 3\%$. В Табл.1 сведены результаты измерений [5].

Таблица 1. Параметры трех типов БОР.

№№	Тип колебания	Диаметр (мм)	Высота (мм)	Частота (ГГц)	$Q_0/10^5$
1	E 51.1.1	400	160	1400	3.1
2	E 25.1.1	263	140	11.424	1.9
3	E 31.1.1	258	120	14.000	2.0

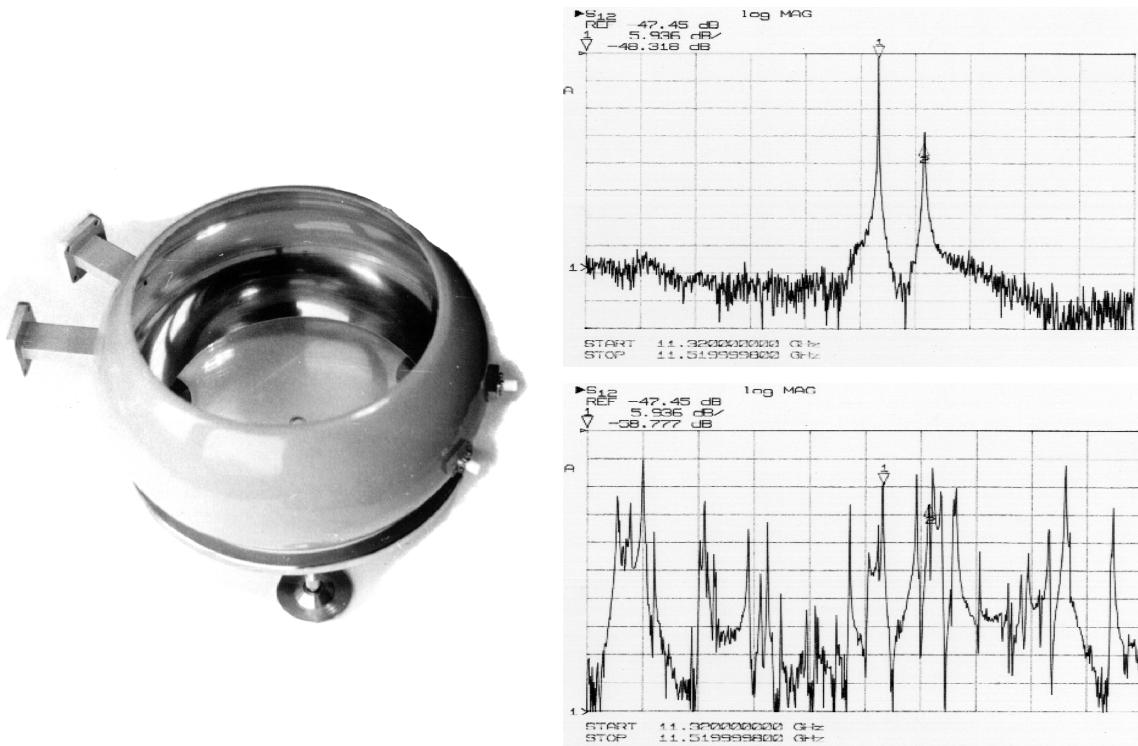


Рис.1. 11.424 ГГц бочкообразный открытый резонатор (пояснения в тексте).

На рисунке 1 представлены: общий вид 11.424 ГГц открытого резонатора (рис. 1, слева), частотный спектр резонатора с открытыми торцами (рис. 1, справа вверху) и с закороченными проводящими поверхностями торцами (рис. 1, справа внизу).

3. Умножитель СВЧ--мощности на открытом резонаторе

Одна из серьезных проблем, которую необходимо решать при работе с любым открытым СВЧ-резонатором — это наличие нерезонансного излучения из отверстия связи, потому что, благодаря специфике открытых систем только часть питающей СВЧ-энергии идет на возбуждение колебаний в них, остальная же излучается через его торцы в свободное пространство, формируя нерезонансный фон. Структура поля колебаний типа “шепчущая галерея”, БОР позволяет преодолеть эту проблему. Большое число азимутальных вариаций такой моды позволяет организовать возбуждения резонатора в режиме “бегущей волны”. Этот режим реализуется путем возбуждения резонатора через большое число отверстий связи, расположенных в общей стенке резонатора и питающего волновода, огибающего резонатор по всему периметру в его средней части. Правильный выбор ширины волновода обеспечивает равенство фазовых скоростей в резонаторе и волноводе, чем достигается максимальная связь резонатора с волноводом и их хорошее согласование. В этом случае можно ожидать и существенное подавление нерезонансного фона, так как поле возбуждающей волны оказывается “прижатым” к стенке резонатора.

Режим бегущей волны также позволяет отказаться от дублирования накопительных резонаторов и развязывающего моста, что выгодно отличает VPM от оригинальной схемы SLED. Измеренное значение КСВН для различных модификаций VPM лежит в пределах 1.1 - 1.2. Большое число отверстий связи и сама их геометрия позволяют надеяться, что система будет иметь достаточный запас по электрической прочности при работе на высоком уровне СВЧ-мощности. В рамках международного научно-технического сотрудничества в Филиале ИЯФ СО РАН были разработаны и изготовлены два умножителя СВЧ-мощности VPM (JLC) на частоту 11.424 ГГц для использования на ускорительном стенде JLC (Япония), (см. рис.2).



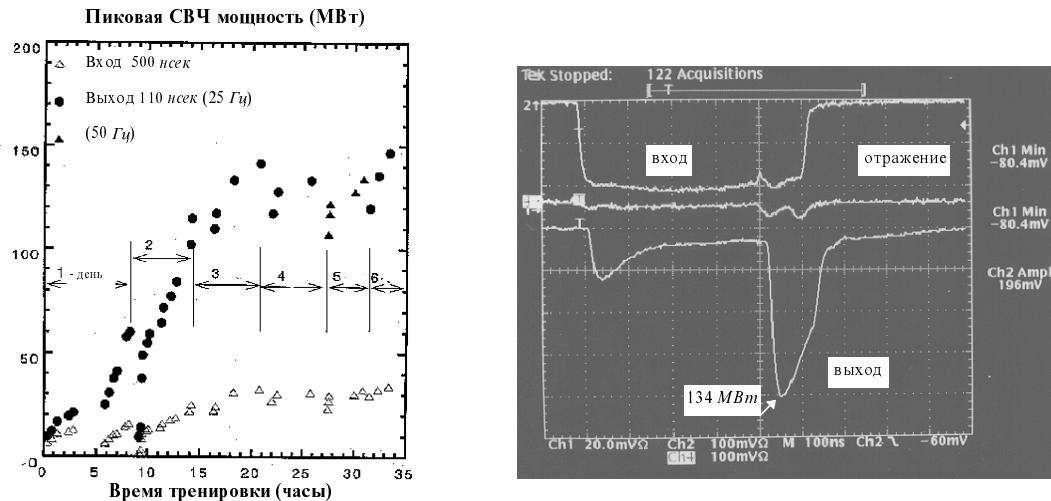
Рис. 2. 11.424 ГГц VPM(JLC).

В данной конструкции умножителя не предусматривается механической подстройки частоты резонатора, все точные настройки предполагается производить

путем изменения температуры охлаждающей жидкости с ее последующей термостабилизацией на уровне $<0.3^{\circ}\text{C}$.

Испытания VPM (JLC) на высоком уровне СВЧ-мощности проводились в КЕК (Япония) [6]. В процессе тренировки умножителя выходная СВЧ-мощность клистрона 35 МВт при длительности плоской вершины импульса 0.5 мкsec были определены как предельные выходные параметры клистрона во избежание опасности электрического пробоя выходных керамических окон клистрона. Тренировка велась при частоте следования импульсов 25 Гц (включая 5 часов при 50 Гц). Как предусматривалось в проекте, переворот фазы импульса клистрона осуществлялся за 110 нсек до его конца. Измерения СВЧ-мощности на входе и выходе умножителя проводились с помощью калиброванных СВЧ-детекторов. В результате потерь в питающем волноводе максимальная СВЧ-мощность, подводимая к умножителю, составила 31.5 МВт. За 18 часов тренировки была достигнута выходная пищевая СВЧ-мощность 134 МВт при 31.3 МВт входной СВЧ-мощности. Этот режим был достаточно стабилен, так как в течение 1 часа непрерывной работы не было зафиксировано ни одного СВЧ-пробоя умножителя. Позднее были предприняты попытки увеличить уровень входной СВЧ-мощности; несколько наблюдений пищевой выходной мощности 150 МВт и выше имели место. Но тренировка умножителя на таком уровне мощности была затруднительна, так как каждый СВЧ-пробой сопровождался значительным ухудшением вакуума в районе керамических окон клистрона.

На рис.3 приведен временной график тренировки VPM (JLC). На следующем рисунке (смотрите рис. 4) представлены формы импульсов, полученные в ходе тренировки. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с предварительными теоретическими оценками [5].



Заключение

Результаты испытаний VPM показали его надежную работу на высоком уровне СВЧ-мощности. Благодаря своей простоте и компактности, это устройство является одной из наиболее перспективных систем импульсной компрессии СВЧ-мощности для работы в сантиметровом диапазоне длин волн в системах импульсного СВЧ-питания будущих линейных коллайдеров.

Литература

- [1.] Farkas Z.D. et al. “SLED: A Method of Doubling SLAC’s Energy”; SLAC-PUB- 1453.
- [2.] Wilson P.B. et al. “ SLED II: A New Method of RF Pulse Compression”, SLAC-PUB- 5330.
- [3.] Balakin V.E. “VLEPP Status” Proc. II-nd Int. Workshop LC-90, KEK, Tsukuba, Japan, 1990.
- [4.] Вайнштейн Л.А. “Бочкообразные открытые резонаторы”, Электроника больших мощностей, сб. 3, изд-во “Наука”, 1964, с.170-215.
- [5.] Балакин В.Е., Сырачев И.В. “ Умножитель импульсной СВЧ- мощности для ВЛЭПП”, Препринт ФИЯФ 95-1.
- [6.] Syrachev I.V. et al. “The Results of RF High Power Tests of X-Band Open Cavity RF Pulse. Compression System”, Proc. Int. Conference Linac-94, Tsukuba, Japan, 1994, pp. 475-477.