

## НАСТРОЙКА ОТКЛОНЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ВЧ-ДЕФЛЕКТОРА В S-ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

А.А. Анисимов<sup>1</sup>, А.Ю. Смирнов<sup>1</sup>, Н.П. Собенин<sup>1</sup>, А.А. Завадцев<sup>2</sup>, Д.А. Завадцев<sup>2</sup>,  
В.Л. Кравчук<sup>2</sup>, В.В. Парамонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия;  
<sup>2</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Приведены результаты настройки отклоняющей структуры в виде круглого диафрагмированного волновода с отверстиями в диафрагмах для стабилизации плоскости поляризации гибридной волны  $H_{11}$ . Структура, состоящая из 16 ячеек с вводами мощности, была настроена на рабочей частоте с коэффициентом отражения менее, чем -35 дБ. Среднеквадратичная неравномерность амплитуды отклоняющего поля не превышает 1 %, а вид волны  $2\pi/3$  в ячейках сохраняется с погрешностью менее 1 градуса.

### ВВЕДЕНИЕ

ВЧ-дефлектор работает в режиме бегущей волны на виде колебаний  $\Theta = 2\pi/3$  на дипольной гибридной волне  $H_{11}$ . Для стабилизации плоскости поляризации волны используется конструкция с двумя цилиндрическими отверстиями [1, 2]. В работах [3-6] рассмотрены основные электродинамические характеристики (ЭДХ) ВЧ-дефлектора как с указанным способом стабилизации плоскости поляризации дипольной волны, так и с другими конструктивными решениями. Для проверки правильности расчетов электродинамических характеристик отклоняющей структуры и отработки стратегии ее настройки на рабочую частоту с трансформаторами типа волны (ТТВ) были изготовлены макеты ячеек и ТТВ из алюминия и меди. Необходимость таких предварительных исследований связана с жесткими требованиями, налагаемыми на качество согласования как на входе в структуру, так и в самой структуре.

### 1. РЕЗОНАНСНЫЙ МАКЕТ

С целью проверки правильности расчета ЭДХ ВЧ-дефлектора были изготовлены резонансные макеты, состоящие из двух ячеек и двух полуячеек. Сначала резонансный макет изготавливался из алюминия, а затем из меди. Измерения проводились с учетом температуры и влажности окружающей среды. На Рис.1 и Рис.2 представлены фотографии ячеек, из которых собиралась отклоняющая структура, и медного резонансного макета.

На медном резонансном макете проведены измерения отношения погонного поперечного шунтового сопротивления к добротности методом малых возмущений. Измерения проведены как по результатам измерения резонансной частоты  $\Delta f$  (резонансный метод), так и изменения модуля коэффициента отражения  $\Delta S_{11}$  (нерезонансный метод). В качестве возмущающих тел первоначально использовался диэлектрический шарик, перемещаемый по оси макета, а также два цилиндрических тела, ориентированные по направлению электрических силовых линий в плоскости поляризации волны. В последнее время разработана методика измерений поперечного шунтового сопротивления с использованием в дополнении к диэлектрическому цилиндру и кольцевого зонда, который позволяет точнее учесть вклад составляющей магнитного поля [7].



Рис.1. Макет из трех ячеек



Рис.2. Ячейки регулярной части дефлектора

### 2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОГЛАСОВАНИЯ ТТВ С РЕГУЛЯРНОЙ ЧАСТЬЮ ВЧ-ДЕФЛЕКТОРА

На Рис.3 представлена структура ВЧ-дефлектора, состоящая из 14 регулярных ячеек и двух ТТВ. Вспомогательные волноводы на рабочей частоте являются запердевыми для волны  $H_{10}$  [3, 4].

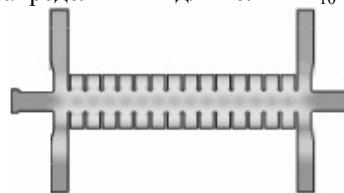


Рис.3. Распределение комплексного электрического поля вдоль структуры (при согласованных ТТВ)

При настройке структуры на бегущей волне важно обеспечить согласование не только на ее входе, но и на выходе. В противном случае в структуре возникнут резонансные колебания, которые не успеют затухнуть к моменту прихода следующего сгустка. Таким образом, при согласовании ТТВ важно, чтобы отражения внутри структуры отсутствовали. Качество согласования можно оценить по равномерности поля на оси структуры, вводя коэффициент качества в виде:

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \cdot 100\%,$$

где  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  – максимальная и минимальная величины напряженности отклоняющего поля на оси  $z$  структуры  $E_{\text{ук}}(z) = E_y(z) \cdot e^{\alpha D}$ , где  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $D$  – период структуры. Таким образом,  $K$  можно рассматривать как коэффициент отражения  $S_{11}$  внутри структуры.

Настройку ТТВ осуществляют путем изменения радиуса  $R$  ячейки ТТВ и ширины окна связи  $X$  этой ячейки с подводящим прямоугольным волноводом (Рис.4). На Рис.5 и 6 приведены результаты расчета влияния этих размеров на коэффициент качества  $K$  и модуль коэффициента отражения на входе структуры  $S_{11}$ . Пунктирной линией обозначены зависимости для окна связи  $X = 32,95$  мм, непрерывной линией – для  $X = 33,03$  мм, светлой штриховкой – для  $X = 33,15$  мм, темной штриховкой –  $X = 33,25$  мм. Лучшие условия согласования (минимальное значение величины  $K = 0,86\%$  и  $S_{11} = -37$  дБ) получаются при значениях  $R = 52,53$  мм и  $X = 33,03$  мм.

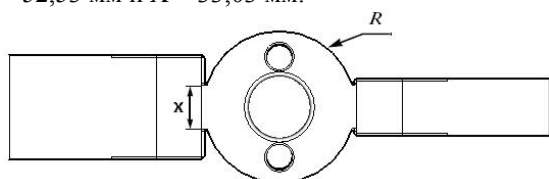


Рис.4. Эскиз ТТВ

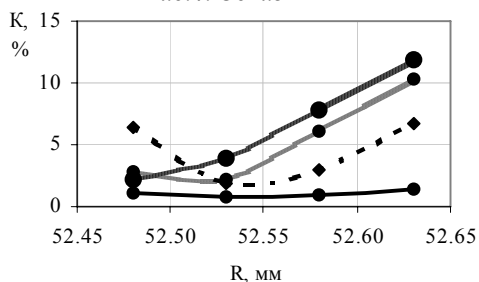


Рис.5. Зависимость коэффициента качества на входе структуры от радиуса ячейки ТТВ при разных величинах окна связи

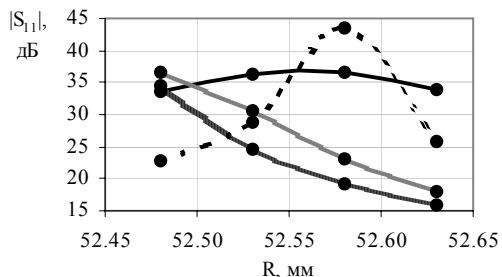


Рис.6. Зависимость коэффициента отражения на входе структуры от радиуса ячейки ТТВ при разных величинах окна связи

В процессе настройки структуры с ТТВ нужно отслеживать правильность настройки на рабочий вид колебаний, то есть, чтобы величина сдвига фазы на период структуры соответствовала  $120^\circ$ . На Рис.7 и Рис.8 представлены амплитуды комплексной величины поперечной составляющей электрического поля на оси структуры и сдвига фазы на период структуры вдоль ее длины для настроенного ( $R = 52,53$  мм,  $X = 33,03$  мм) и ненастроенного ( $R = 52,33$  мм,  $X = 33,23$  мм) вариантов. Распределение поля на Рис.7 представляет собой амплитуду комплексной радиальной компоненты электриче-

ского поля. Причем расчет поля проводился с учетом электрических потерь в стенках структуры, которые соответствуют расчетному значению коэффициента затухания  $\alpha = 0,168 \text{ м}^{-1}$  и хорошо прослеживаются в распределении поля для структуры с настроенным ТТВ (см. Рис.7,б).

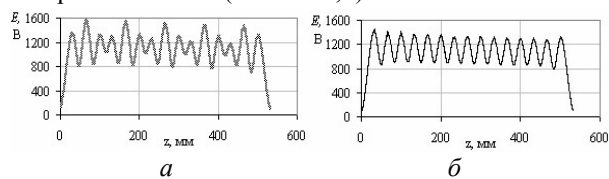


Рис.7. Комплексная величина поперечного электрического поля на оси структуры в функции ее длины для ненастроенного (а) и настроенного (б) вариантов

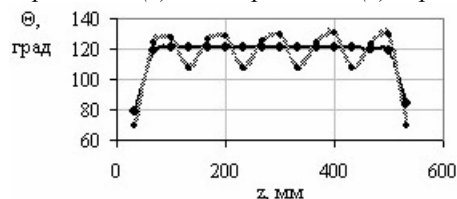


Рис.8. Распределение сдвига фазы на период структуры по ее длине для ненастроенного (штриховая линия) и настроенного (сплошная линия) вариантов

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ТТВ С РЕГУЛЯРНОЙ ЧАСТЬЮ ВЧ-ДЕФЛЕКТОРА ДО ПАЙКИ

По результатам компьютерного моделирования настройки ТТВ изготовлены два ТТВ из алюминия. Для подстройки радиуса ячейки предусмотрены подстроечные винты, а изменение окна связи можно осуществлять как расточкой его, так и приклеиванием полосок из фольги разной толщины к краю окна связи. Процедура настройки алюминиевого макета ТТВ осуществляется по тому же принципу, что и в компьютерной модели, но есть некоторые технические отличия. Например, в компьютерной модели радиус и окно связи на входном и выходном ТТВ меняли одновременно, в то время как с алюминиевыми макетами ТТВ меняли размеры последовательно – сначала настраивали выходной ТТВ, меняя его размеры  $R$  и  $X$  до получения минимально возможного значения коэффициента качества. Затем меняли местами входной и выходной ТТВ (Рис.9) и проводили настройку второго ТТВ, изменяя его размеры  $R$  и  $X$ .

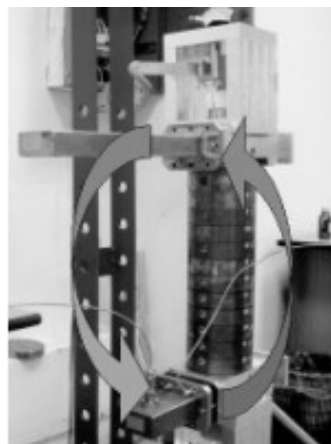


Рис.9. Настройка ТТВ дефлектора

На Рис.10 и 11 приведены полученные в результате такой настройки зависимости распределения комплексной величины поперечной напряженности электрического поля на оси структуры и отклонение сдвига фазы волны на периоде структуры от  $120^\circ$ . Видно, что для неспаянной конструкции получены хорошие результаты как в отношении коэффициента качества (менее 1%), так и сдвига фазы волны на период структуры от рабочего вида колебаний в пределах 2 градусов.

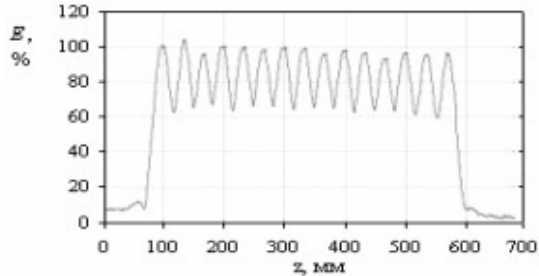


Рис.10. Поперечное отклоняющее поле по длине структуры для случая согласованных входного и выходного ТТВ

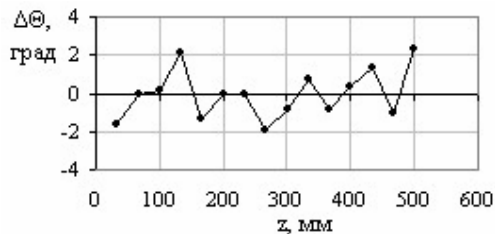


Рис.11. Отклонения фазы волны относительно  $120^\circ$  по длине структуры для случая согласованных входного и выходного ТТВ

На Рис.12 изображена расчетная зависимость коэффициента отражения отклоняющей структуры в функции частоты, определенная со стороны входного ТТВ. На рабочей частоте значение  $S_{11}$  равно 39 дБ.

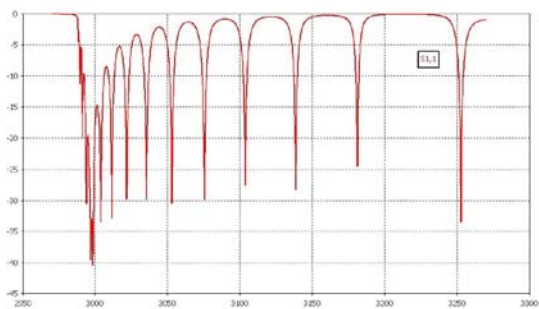


Рис.12. Расчетная зависимость коэффициента отражения в функции частоты

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЧ-ДЕФЛЕКТОРА ПОСЛЕ ПАЙКИ

На Рис.13 представлена фотография структуры в печи после ее пайки. Проведены измерения коэффициентов отражения на входе структуры и в секции до настройки. Соответствующие значения составили (-25) дБ и (-23) дБ соответственно. Сначала проводили подстройку выходного ТТВ деформацией стенки ячейки. Для настройки ячеек в обечайке каждой из них предусмотрены две концентрические цилиндрические выточки, причем цилиндр в центре ее имеет резьбу. Такое устройство (Рис.14) позволя-

ет осуществлять двухстороннюю деформацию стенки ячеек и изменять частоту как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

На Рис.15 приведены результаты измерения методом возмущения комплексного значения коэффициента отражения  $S_{11}$ . Измерения проведены на частоте 2997,2 МГц при температуре  $25^\circ\text{C}$  и влажности воздуха 60%, что соответствует условиям вакуума на этой же частоте при температуре структуры  $45^\circ\text{C}$ .

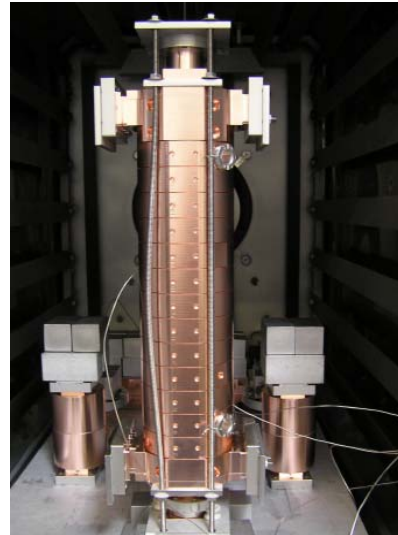


Рис.13. ВЧ-дефлектор после пайки



Рис.14. Конструкция для подстройки частоты ячеек

На Рис.16 изображено измеренное отклоняющее поле на оси структуры в сечениях диафрагм после пайки и после настройки, а также поле с коррекцией затухания. Средняя квадратичная неоднородность поля в середине регулярной части структуры составляет (при учете затухания) 1,8%. Это соответствует коэффициенту отражения в структуре (-31) дБ. А измеренный разброс в сдвиге фазы на ячейку не превышает  $1^\circ$  относительно  $120^\circ$ .

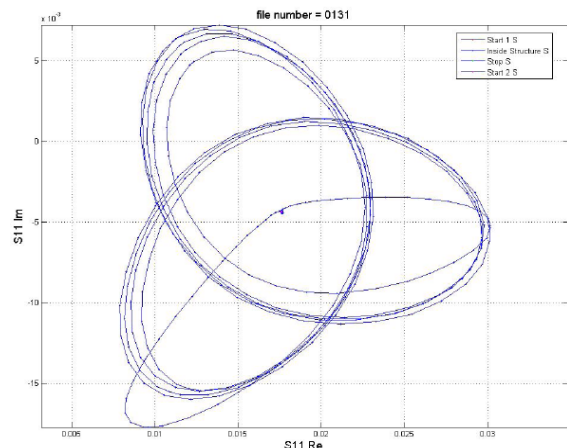


Рис.15. Комплексное значение коэффициента отражения при измерении поля методом малых возмущений

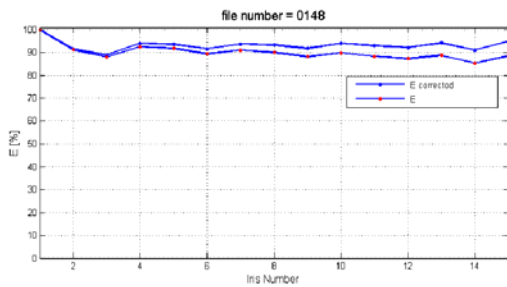


Рис.16. Поперечное электрическое поле

Измеренный на входе структуры коэффициент отражения в широкой полосе частот представлен на Рис.17, а вблизи рабочей частоты – на Рис.18. Коэффициент отражения на рабочей частоте составляет (-35) дБ.

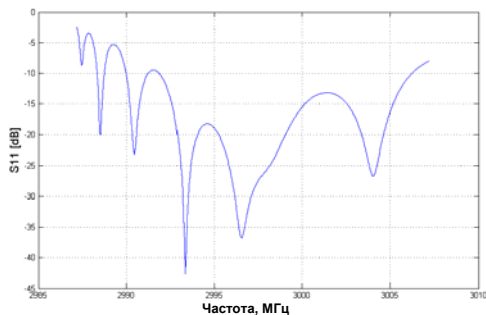


Рис.17. Коэффициент отражения в широком диапазоне частот

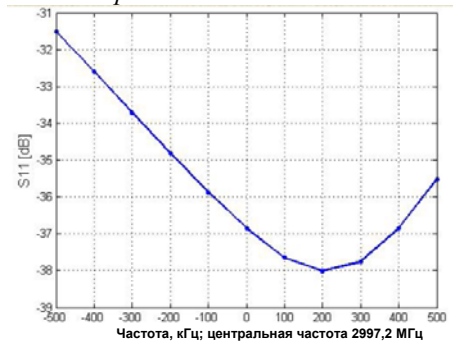


Рис.18. Коэффициент отражения ВЧ-дефлектора вблизи рабочей частоты

## ВЫВОДЫ

В ходе работы по созданию поперечной отклоняющей структуры на основе круглого диафрагмированного волновода с двумя стабилизирующими отверстиями в диафрагме был выполнен полный комплекс исследовательских, проектных и экспери-

ментальных работ, включая компьютерное моделирование, расчет геометрических размеров структуры, расчет трансформатора типа волны, расчет электродинамических характеристик, экспериментальное моделирование, инженерный проект структуры, изготовление, настройка и тестирование рабочего экземпляра дефлектора.

Измеренные параметры настроенной отклоняющей структуры после пайки полностью соответствуют расчетным параметрам, что показывает верные проектирование и изготовление дефлектора.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам DESY Frank Stephan, Christopher Gerth и Markus Huening.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. D. Denisenko, V. Paramonov. Transverse Deflection StructureParameters Study // *Proceeding of RUPAC-2008*, Zvenigorod, Russia, 2008, p.37.
2. A. Anisimov, et al. Layout of the PITZ Transverse Deflecting Phase Space and Slice Emittance Measurements // *XXV International Linear Accelerator Conference*, Tsukuba, Japan, September, 2010.
3. А.А. Анисимов и др. Структура с поперечным отклоняющим полем для лазера на свободных электронах // *Приборы и техника эксперимента*. 2010, №1, с.117-124.
4. А.А. Анисимов, et al. Travelling wave deflector for electron laser // *Problems of Atomic Sciences and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*, 2010, №2, (66), с.56-60.
5. А.А. Анисимов, et al. Stabilization of the polarization plane in travelling wave deflectors // *The first International Particle Accelerator Conference*, Kyoto, Japan, May 2010.
6. V.V. Paramonov, L.V. Kravchuk. The resonant method of stabilization for plane of deflection in the disk loaded deflecting structures // *XXV International Linear Accelerator Conference*, Tsukuba, Japan, September, 2010.
7. A.Yu. Smirnov, et al. The Measurement of Transversal Shunt Impedance of the RF Deflector // *The second International Particle Accelerator Conference*, Sun Sebastian, Spain, September, 2011.

Статья поступила в редакцию 25.09.2011 г.

## S-BAND DEFLECTING STRUCTURE TUNING

*A.A. Anisimov, A.Yu. Smirnov, N.P. Sobenin, A.A. Zavadzev, D.A. Zavadzev, V.L. Kravchuk, V.V. Paramonov*

Tuning procedure and results obtained for RF structure developed for PITZ deflector are presented. Deflector cavity operated in traveling wave  $TM_{11}$  mode is based on cylindrical disk loaded waveguide geometry with two holes in diaphragms for field polarization plane stabilization. Cavity consisted of 14 cells and two power coupling cells was tuned to reflection better than -35 dB. Field flatness obtained is less than 1 % and  $2\pi/3$  operating mode is sustained within less than 1 degree.

## НАСТРОЙКА ВІДХИЛЯЮЧОЇ СТРУКТУРИ ДЛЯ ВЧ-ДЕФЛЕКТОРА В S-ЧАСТОТНОМУ ДІАПАЗОНІ

*A.A. Anisimov, A.Yu. Smirnov, N.P. Sobenin, A.A. Zavadzev, D.A. Zavadzev, V.L. Kravchuk, V.V. Paramonov*

Наведено результати настройки відхиляючої структури у вигляді круглого діафрагмованного хвильоводу з отворами в діафрагмах для стабілізації площини поляризації гібридної хвилі  $EH_{11}$ . Структура, що складається з 16 комірок з уводами потужності, була налаштована на робочій частоті з коефіцієнтом відображення менш, ніж -35 дБ. Середньоквадратична нерівномірність амплітуди відхиляючого поля не перевищує 1 %, а вид хвилі  $2\pi/3$  в комірках зберігається з погрешністю менше 1 градуса.