

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ СЕЛЕКТОР (ОРТОПЛЕКСОР) ДЛЯ С.В.Ч.-ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

© 2013 г. В. В. Филиппов, В. Л. Бережный

Институт физики плазмы, Национальный научный центр

“Харьковский физико-технический институт”

Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1

E-mail: raukraina@ukr.net

Поступила в редакцию 18.07.2012 г.

После доработки 23.10.2012 г.

Представлены результаты разработки простого в изготовлении поляризационного селектора, позволяющего проводить диагностику плазмы в торсатронах “Ураган-2М” и “Ураган-3М” в различных режимах работы установок. Поляризационный селектор имеет малые потери в рабочих диапазонах частот и высокую развязку между поляризациями. Подобные конструкции, согласованные с волноводами стандартных сечений (отношение размеров широкой и узкой стенки ~ 0.5), могут использоваться при передаче информации в тех случаях, когда необходима более широкая полоса частот для одной из поляризаций с.в.ч.-поля.

DOI: 10.7868/S0032816213040241

ВВЕДЕНИЕ

Разрабатываемая аппаратура для с.в.ч.-диагностики плазмы на современных установках должна давать максимум информации при минимальных габаритах из-за ограниченного количества диагностических портов. Также важно максимально использовать стандартную волноводную технику.

Измерение среднего значения плотности электронов плазмы \bar{n}_e проводят с помощью однополяризационной интерферометрии [1–3]. Интерес к использованию одновременно двух поляризаций при с.в.ч.-интерферометрии плазмы в магнитном поле возникает в связи со стремлением получить дополнительную информацию о профиле плотности плазмы. В с.в.ч.-диапазоне тензор диэлектрической проницаемости “холодной” плазмы

$$\|\varepsilon\| = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & i\varepsilon_2 & 0 \\ i\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{vmatrix},$$

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_p^2},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_c}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_p^2},$$

$$\varepsilon_3 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2},$$

где ω – частота с.в.ч.-поля; $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$ – плазменная электронная частота; n_e – плотность электронов плазмы; $\omega_c = \frac{eB}{m_e c}$ – циклотронная электронная частота; B – удерживающее магнитное поле установки.

Если волновой вектор \mathbf{k} перпендикулярен вектору магнитного поля B , то для различных ориентаций вектора напряженности с.в.ч.-поля E он равен:

$$\mathbf{k}_0 = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}},$$

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \frac{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}}},$$

где \mathbf{k}_0 – волновой вектор для обыкновенной волны $E \parallel B$; \mathbf{k}_x – волновой вектор для необыкновенной волны $E \perp B$.

По сдвигу фазы обыкновенной волны, прошедшей через плазму, относительно волны, прошедшей такой же путь в вакууме, определяют среднюю плотность электронов плазмы \bar{n}_e :

$$\varphi_0 = 2 \int_{-a}^a k_0 dy \xrightarrow{\omega \gg \omega_p} \bar{n}_e = -\frac{mc\omega}{2\pi e^2 2a} f,$$

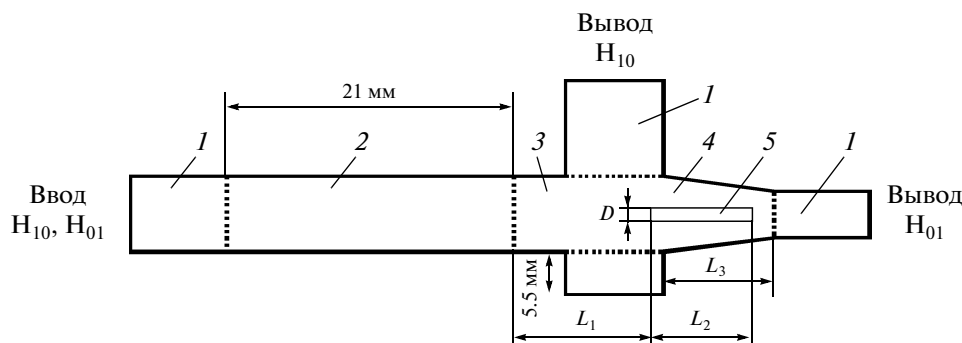


Рис. 1. Структура поляризационного селектора. 1 – регулярные части волноводов; 2 – линейное изменение размеров с 11×5.5 до 7.2×5.5 мм²; 3 – регулярная часть волновода для ответвления энергии моды H_{10} ; 4 – плавное сужение волновода с 7.2×5.5 до 7.2×3.4 мм²; 5 – вставка для согласования ответвления энергии для моды H_{10} .

где a – размер плазмы; y – направление распространения с.в.ч.-волны; f – частота зондирующей с.в.ч.-волны.

Так как распределение в пространстве магнитного поля торсатронов известно, то, зная фазовый сдвиг необыкновенной волны $\varphi_x = 2 \int_{-a}^a k_x dy$, можно получить дополнительную информацию о профиле плотности плазмы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для разделения двух поляризаций используются поляризационные селекторы (ортоплексоры) различных конструкций [4], к которым выдвигаются требования, связанные с необходимой развязкой между поляризациями и величиной максимального коэффициента отражения от селектора, а также требования к рабочей полосе частот.

При диагностике плазмы, с одной стороны, необходима широкая полоса рабочих частот с развязкой по поляризациям не менее 20 дБ, с другой стороны, существуют жесткие технические условия по размерам и согласованию с волноводами стандартных сечений.

Так, при диагностике плазмы с помощью двухполяризационной интерферометрии [5] в торсатронах “Ураган-2М” и “Ураган-3М” для различных режимов работы установок необходима полоса рабочих частот поляризационного селектора для обыкновенной волны 25–36 ГГц и 30–36 ГГц для необыкновенной. Это связано с тем, что в режимах чистки камер торсатронов создается плазма меньшей, по сравнению с рабочими режимами, плотности при малом магнитном поле, так что $k_o \approx k_x$. Поэтому использование двух поляризаций нецелесообразно.

ОПИСАНИЕ

Поляризационный селектор должен представлять собой устройство с входным волноводом, который работает в многомодовом режиме, и двумя выходными волноводами, работающими в одномодовом режиме. Для этих целей подходят волноводы стандартных сечений 7.2×3.4 и 11×5.5 мм². Конструкция поляризационного селектора оптимизирована для изготовления из двух симметричных половинок, что существенно упрощает и удешевляет изготовление.

Так как в волноводе с поперечными размерами 11×5.5 мм в интересующем нас диапазоне частот возможно распространение большого числа мод, которые могут ухудшить развязку между поляризациями в месте разветвления, необходимо сначала уменьшить поперечные размеры волновода.

Учитывая отсутствие жестких требований по допустимому коэффициенту отражения и стремление к технической простоте изготовления, изменение поперечных размеров волновода было выбрано линейным. При длине перехода 21 мм максимальные потери на отражение:

$$H_{01} \rightarrow -20\lg(S_{1,1}^{1,1}) = -35 \text{ дБ},$$

$$H_{10} \rightarrow -20\lg(S_{1,2}^{1,2}) = -70 \text{ дБ},$$

где H_{01} и H_{10} – моды, соответствующие направлению вектора \mathbf{E} параллельно узкой (5.5 мм) и широкой (11 мм) стенкам волновода соответственно; S – матрица рассеяния многополосника. Нижние и верхние индексы матрицы рассеяния соответствуют номерам вводов и выводов многополосника и моде с.в.ч.-поля. Мода H_{01} считается первой.

Учитывая что в волноводе сечением 7.2×5.5 мм² начиная с 34.3 ГГц возможно распространение мод H_{11} и E_{11} , с целью увеличения развязки между поляризациями с.в.ч.-поля и для предотвращения взаимодействия между модами H_{01} , H_{10} и H_{10} , E_{11} необходимо наличие двух плоскостей симметрии в месте разветвления. Тогда теоретическая

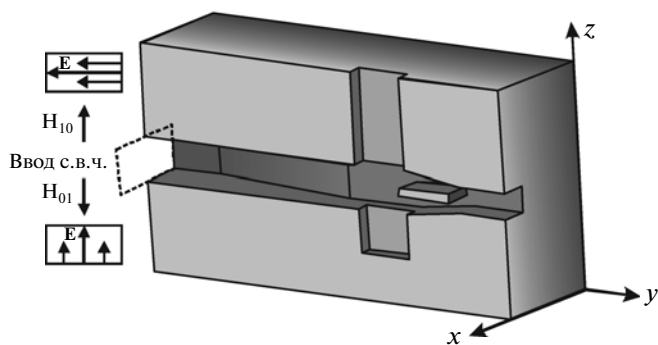


Рис. 2. Одна из симметричных половинок селектора.

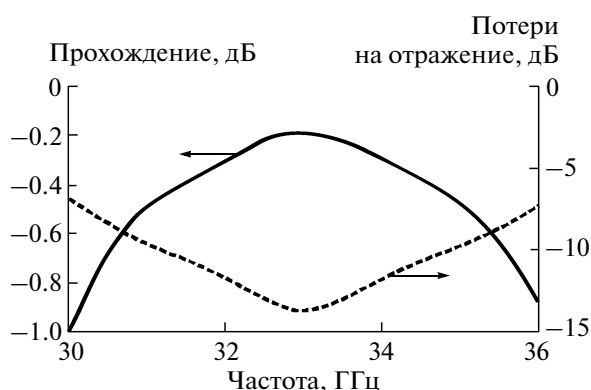


Рис. 3. Прохождение (сплошная линия) с.в.ч.-энергии и потери (штриховая) на отражение для моды H_{10} .

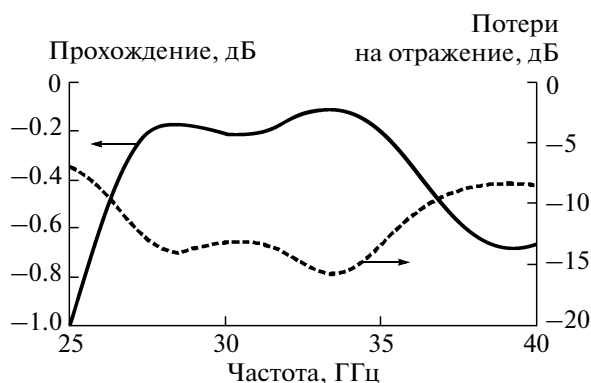


Рис. 4. Прохождение (сплошная линия) с.в.ч.-энергии и потери (штриховая) на отражение для моды H_{01} .

развязка между поляризациями с.в.ч.-поля оказывается ограниченной лишь точностью изготовления поляризационного селектора.

Разделение поляризаций происходит на волноводе сечением $7.2 \times 5.5 \text{ мм}^2$ с помощью ответвления энергии колебаний H_{10} через эквивалент

тройника в плоскости вектора \mathbf{H} , у которого одно плечо короткозамкнуто через половину длины волны от места разветвления. Выделение моды H_{01} происходит за счет сужения поперечных размеров волновода 7.2×5.5 до $7.2 \times 4 \text{ мм}$. Конструкция селектора изображена на рис. 1 планарно. На рис. 2 показана одна из симметричных половинок селектора объемно.

При расчете размеров сначала производится согласование для моды H_{10} с помощью металлической вставки 5 (рис. 1). При этом подбираются оптимальное положение вставки L_1 и ее толщина D . Согласование моды H_{01} осуществляется подбором длины вставки $L_2 \approx 0.75\lambda_{01}$ (где λ_{01} — длина волны в волноводе для моды H_{01}) и длины плавного перехода L_3 .

Оптимизация и электродинамическое моделирование были выполнены с помощью программы Ansoft HFSS. При размерах: $D = 1 \text{ мм}$, $L_1 = 11 \text{ мм}$, $L_2 = 7.5 \text{ мм}$, $L_3 = 8 \text{ мм}$ были получены результаты, приведенные на рис. 3 и 4.

Прошедшая энергия рассчитывалась как

$$H_{01} \rightarrow 20\lg(S_{1,1}^{2,1}) \text{ дБ},$$

$$H_{10} \rightarrow 20\lg(S_{1,2}^{3,1}) \text{ дБ}.$$

Потери на отражение рассчитывались аналогично:

$$H_{01} \rightarrow 20\lg(S_{1,1}^{1,1}) \text{ дБ},$$

$$H_{10} \rightarrow 20\lg(S_{1,2}^{1,2}) \text{ дБ}.$$

Как видно на рис. 3 и 4, потери на отражение оказываются менее -7 дБ и не могут повлиять на точность диагностики в целом, так как информация о плотности плазмы содержится в изменении фазы с.в.ч.-поля. Результаты приведены только относительно ввода в связи с тем, что устройство является взаимным. Потери на стенках волноводов не учитывались из-за их малости.

Как упоминалось выше, теоретическая развязка между поляризациями с.в.ч.-поля ограничивается только точностью изготовления. При стендовых испытаниях поляризационного селектора развязка по поляризациям с.в.ч.-поля оказалась более 20 дБ в исследуемом диапазоне частот. Из-за наличия шероховатостей на стенках волноводов суммарные потери оказались менее -5 дБ .

Графики не приводятся, так как зависимость потерь от частоты в интересующем диапазоне частот находится в пределах 1.5 дБ , что совпадает с точностью проведенных измерений. Эти потери оказываются намного меньше потерь в длинном волноводном тракте, связывающем диагностическую аппаратуру с антеннами, и потерь, связанных с рефракцией с.в.ч.-поля при прохождении плазмы между рупорами.

ВЫВОДЫ

Разработан и протестирован дешевый и простой в изготовлении поляризационный селектор. Он позволяет проводить диагностику плазмы в торсатронах “Ураган-2М” и “Ураган-3М” в различных режимах работы установок. Поляризационный селектор имеет малые потери в рабочих диапазонах частот и высокую развязку между поляризациями. Подобные конструкции, согласованные с волноводами стандартных сечений (отношение размеров широкой и узкой стенки ~ 0.5), могут использоваться при передаче информации в тех случаях, когда необходима более широкая полоса частот для одной из поляризаций с.в.ч.-поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голант В.Е.* Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы М.: Наука, 1968.
2. *Heald M.A., Wharton C.B.* Plasma diagnostics with microwaves. N.Y.: John Wiley, 1965.
3. *Fessey J.A., Gowers C.W., Hugesoltz C.A.J. et al.* // Phys. E. 1987. V. 20. P. 169.
4. *Тузбеков А.Р., Гольберг Б.Х.* // IV Всероссийская конференция “Радиолокация и радиосвязь”: Сборник докладов. 2010. С. 894.
5. *Grekov D.L., Tretiak K.K., Berezhnij V.L., Filippov V.V.* // Problems of atomic science and technology, plasma physics. 2012. № 6. P. 249.