

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОФИЗИКА

УДК 621.382:533.9.08

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 280 ГГц

А. В. Зоренко*, Г. П. Ермак**, Н. Е. Медведь***

*Научно-исследовательский институт "Орион",
8^а, ул. Э. Потье, Киев, 01057, Украина

** Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: ermak@ire.kharkov.ua

*** Киевский политехнический институт,
37, пр. Победы, Киев, 03056, Украина

В работе рассмотрен твердотельный гетеродинный интерферометр КВЧ диапазона с рабочей частотой 280 ГГц, предназначенный для измерения концентрации плазмы в установках типа ТОКАМАК. Низкий уровень фазовых флуктуаций выходного сигнала достигнут за счет применения умножителя частоты с высокой кратностью и активного повышающего преобразователя частоты на ЛПД. Для исключения влияния флуктуаций затухания зондирующего сигнала в плазме на точность измерения фазы в интерферометре используется квадратурная обработка на промежуточной частоте и усилители с АРУ. Относительный дрейф фазы выходного сигнала интерферометра не превышает $\pm 0,5^\circ$ за 2 ч. Мощность зондирующего сигнала 1 мВт на частоте 280 ГГц. Динамический диапазон принимаемых сигналов 40 дБ. Ил. 6. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: твердотельный гетеродинный интерферометр, КВЧ диапазон, плазма, квадратурная обработка, умножитель частоты, ЛПД.

В настоящее время для изучения свойств плазмы широкое распространение получили методы микроволновой диагностики, в частности, интерферометрические методы [1]. Интерферометрия плазмы основана на измерении сдвига фазы электромагнитной волны, прошедшей через плазму, величина которого зависит от электронной концентрации плазмы.

При концентрациях плазмы, значительно меньших критической величины, плазма оказывает слабое влияние на распространение радиоволн. При приближении концентрации к критической величине это влияние резко увеличивается, плазма становится практически непрозрачной для зондирующей волны. Зависимость плазменной частоты f_p от критической концентрации для микроволнового диапазона волн зондирования приведена на рис. 1 [2].

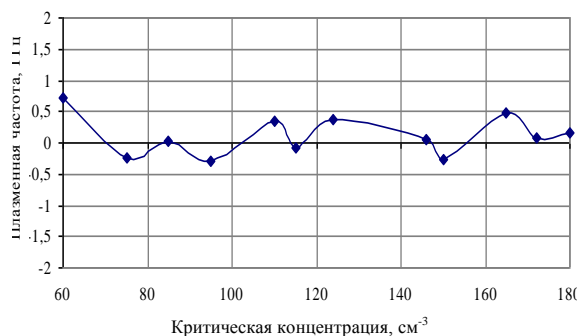


Рис. 1. Зависимость плазменной частоты от критической концентрации плазмы

Из рис. 1 видно, что измерение больших концентраций электронов в плазме связано с повышением частоты зондирующего сигнала. Поэтому разработка интерферометров в диапазоне длин волн $\lambda \approx 1$ мм и короче является актуальной задачей как для развития микроволновой техники, так и для исследования свойств высококонцентрированной плазмы.

Прохождение зондирующей волны длиной λ в слое плазмы толщиной l вызывает запаздывание волны, которое приводит к сдвигу фазы на величину φ . В этом случае средняя концентрация плазмы \bar{n} может быть определена согласно выражению [2]:

$$\bar{n} = \frac{\varphi}{\pi} \frac{l}{\lambda} n_c, \quad (1)$$

где $n_c \approx 1,24 \cdot 10^{-8} f \text{ см}^{-3}$ - критическая концентрация плазмы для частоты зондирующего сигнала f ГГц при $f > f_p$.

При условии, когда $l > \lambda$, возникают определенные сложности в однозначном определении величины фазового сдвига, которые устраняются известными методами [3] либо специальным алгоритмом обработки сигналов.

Из (1) следует, что величина погрешности измерения средней концентрации плазмы в основном определяется погрешностью измерения фазового сдвига φ и нестабильностью частоты зондирующего сигнала при внешних воздействующих факторах: изменении температуры ок-

ружающей среды; вибрации; долговременной нестабильности фазовых характеристик интерферометра. Минимизировать влияние этих факторов на точность измерений возможно при реализации интерферометра на твердотельных микроволновых устройствах, которые в настоящее время разработаны до 1,5 ТГц [4-6].

1. Принцип построения схемы итерференметра. Нами реализован и исследован гетеродинный интерферометр для диагностики плазмы на частоте зондирующего сигнала равной 280 ГГц. Функциональная схема интерферометра и его подключение к камере с исследуемой плазмой показаны на рис. 2.

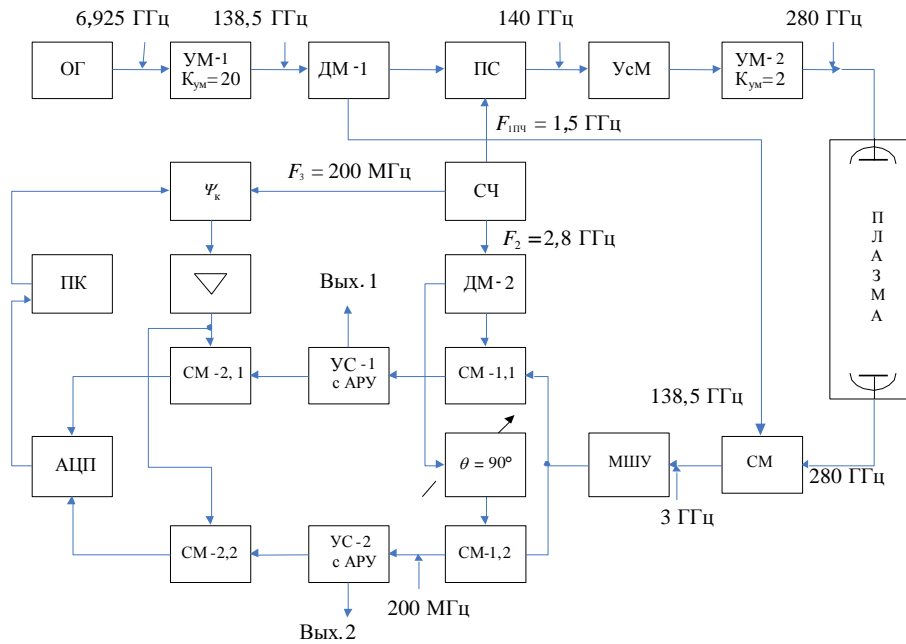


Рис. 2. Функциональная схема гетеродинного интерферометра

Формирование зондирующего и гетеродинного сигналов. Для формирования зондирующего сигнала и сигнала гетеродина приемника используется один опорный генератор, стабилизированный диэлектрическим резонатором.

Сигнал опорного генератора частотой $f_{оп} = 6,925$ ГГц подается на умножитель частоты высокой кратности (УМ-1) с коэффициентом умножения $K_{ум} = 20$. Умножитель частоты выполнен на специальном лавинно-пролетном диоде. На выходе умножителя выделяется сигнал с частотой $f_1 = 138,5$ ГГц и мощностью $P_1 = 17$ мВт. Делителем мощности (ДМ-1) сигнал делится на два канала. Один канал используется в качестве гетеродинного для приемника, с другого канала сигнал поступает на вход преобразователя сдвига (ПС). На второй вход ПС подводится сигнал промежуточной частоты $F_{1пч} = 1,5$ ГГц, вырабатываемый синтезатором частот (СЧ). На выходе ПС выделяется сигнал суммарной частоты, равной 140 ГГц, который подается на двухкаскадный усилитель мощности (УсМ), выполненный на синхронизированных генераторах. Выходная

мощность усилителя составляет 20 мВт. Усиленный сигнал подается на умножитель частоты (УМ-2) с коэффициентом умножения $K_{ум} = 2$. На выходе УМ-2 выделяется сигнал с частотой 280 ГГц и мощностью ~ 1 мВт, который через плавные волноводные переходы с сечения $0,45 \bullet 0,9$ мм² на сечение $23 \bullet 10$ мм² подается на излучающую антенну A_1 , вмонтированную в измерительную камеру.

Примененный метод формирования зондирующего сигнала и сигнала гетеродина приемника от одного опорного генератора позволяет исключить влияние нестабильности частоты опорного генератора на точность измерения фазового сдвига сигнала, прошедшего через слой плазмы. Это связано с тем, что нестабильности частоты зондирующего и гетеродинного сигналов имеют один и тот же источник (опорный генератор), т. е. они коррелированы, а поэтому вычитаются в смесителе приемника. Таким образом, флуктуации фазы сигнала первой промежуточной частоты приемника не зависят от стабильности частоты опорного генератора.

Обработка сигнала в тракте приемника.
 Зондирующий сигнал частотой 280 ГГц, прошедший через плазму, поступает на приемную антенну A_2 и с нее на вход гармоникового смесителя (СМ), в котором выполняется первое преобразование частоты. В качестве сигнала гетеродина используется сигнал частотой 138,5 ГГц, который выделяется на выходе умножителя частоты (УМ-1) тракта формирования зондирующего сигнала и через делитель мощности (ДМ-1) подается на смеситель. В гармониковом смесителе для преобразования частоты принятого сигнала в промежуточную используется вторая гармоника подводимого сигнала гетеродина. На выходе смесителя выделяется сигнал промежуточной частоты, равной 3 ГГц, в котором вычтены фазовые нестабильности опорного генератора. Сигнал промежуточной частоты усиливается малошумящим усилителем (МШУ), делится на два канала и подается на радиочастотные входы смесителей (СМ-1,1 и СМ-1,2). Сигнал гетеродина частотой 2,8 ГГц, вырабатываемый синтезатором частоты (СЧ), делится на два канала делителем мощности (ДМ-2). С одного канала сигнал подается непосредственно на смеситель (СМ-1,1), с другого канала через фазовращатель с поворотом фазы $\Theta = 90^\circ$ на смеситель (СМ-1,2). На выходе смесителей выделяются сигналы разностной частоты 200 МГц, которые находятся в квадратуре. Амплитуды выходных сигналов пропорциональны $V_1 = A \sin(\omega t + \varphi)$ и $V_2 = A \cos(\omega t + \varphi)$. Для точной установки квадратуры выходных сигналов смесителей в процессе настройки интерферометра фазовращатель выполнен с плавной подстройкой фазового сдвига в пределах $\Delta\Theta = \pm 10^\circ$. Выходные сигналы смесителей поступают на вход идентичных усилителей с автоматической регулировкой усиления (АРУ) (УС-1 и УС-2), динамический диапазон которых составляет более 40 дБ. Амплитудная и амплитудно-фазовая характеристики усилителя приведены на рис. 3.

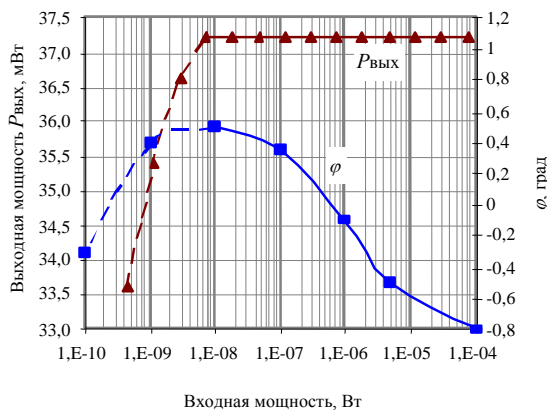


Рис. 3. Амплитудная (▲) и амплитудно-фазовая (■) характеристики усилителя с АРУ

Как видим, система АРУ обеспечивает высокую стабильность амплитуды выходного сигнала при изменении входного сигнала более чем на 40 дБ. Напряжение управления АРУ, пропорциональное мощности сигнала на входе приемника, выведено на переднюю панель интерферометра (Вых. 1 и Вых. 2) и используется для контроля уровня входной мощности приемника. При измерениях уровень входной мощности приемника должен находиться в пределах, обеспечивающих устойчивую работу системы АРУ. При работе АРУ усилители вносят незначительный фазовый сдвиг сигналов, зависящий от величины управляющего напряжения АРУ, при этом сигналы остаются квадратурными. С выхода (УС-1 и УС-2) сигналы подаются на радиочастотные входы смесителей (СМ-2,1 и СМ-2,2). На гетеродинный вход смесителей (СМ-2,1 и СМ-2,2) поступает сигнал частотой 200 МГц, формируемый в синтезаторе частоты (СЧ). Таким образом, выходные смесители работают в режиме с нулевой промежуточной частотой и формируют на выходе напряжения $V_1 = A \sin \varphi$, $V_2 = A \cos \varphi$. Амплитуда выходного напряжения изменяется в пределах ± 5 В при изменении φ на 180° . С изменением концентрации плазмы изменяется фазовый сдвиг зондирующей волны и вектор напряжения на квадратурном выходе интерферометра описывает окружность на фазовой плоскости (рис. 4).

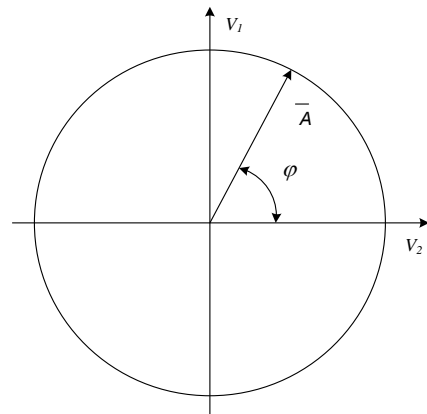


Рис. 4. Вектор напряжения на квадратурном выходе интерферометра

Модуль вектора \vec{A} вычисляется по формуле $|A| = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}$, а наклон вектора определяется как $\varphi = \arcsin(V_1/|A|)$ или $\varphi = \arccos(V_2/|A|)$. При вычислении учитывается знак V_1 и V_2 .

Для калибровки интерферометра перед проведением измерений в цепи подачи сигнала гетеродина частотой 200 МГц установлен дискретный фазовращатель (Ψ_k) с цифровым управлением.

Дискретность установки фазового сдвига составляет 1° . Фазовращатель Ψ_k может управляться с пульта, расположенного на передней панели интерферометра или от персонального компьютера.

Сигналы, сформированные на квадратурных выходах смесителей (СМ-2,1 и СМ-2,2), через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) подаются на персональный компьютер, который производит обработку сигналов по заданному алгоритму и вычисление концентрации зондируемой плазмы.

2. Конструкция и технические характеристики интерферометра. Конструктивно микроволновая часть интерферометра выполнена на волноводных элементах. Сечение волноводов стандартное для данного диапазона частот, равное $0,45 \times 0,9 \text{ мм}^2$. Соединение с антеннами выполнено плавными переходами на сверхразмерный волновод сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$. Расположение узлов в интерферометре показано на рис. 5.

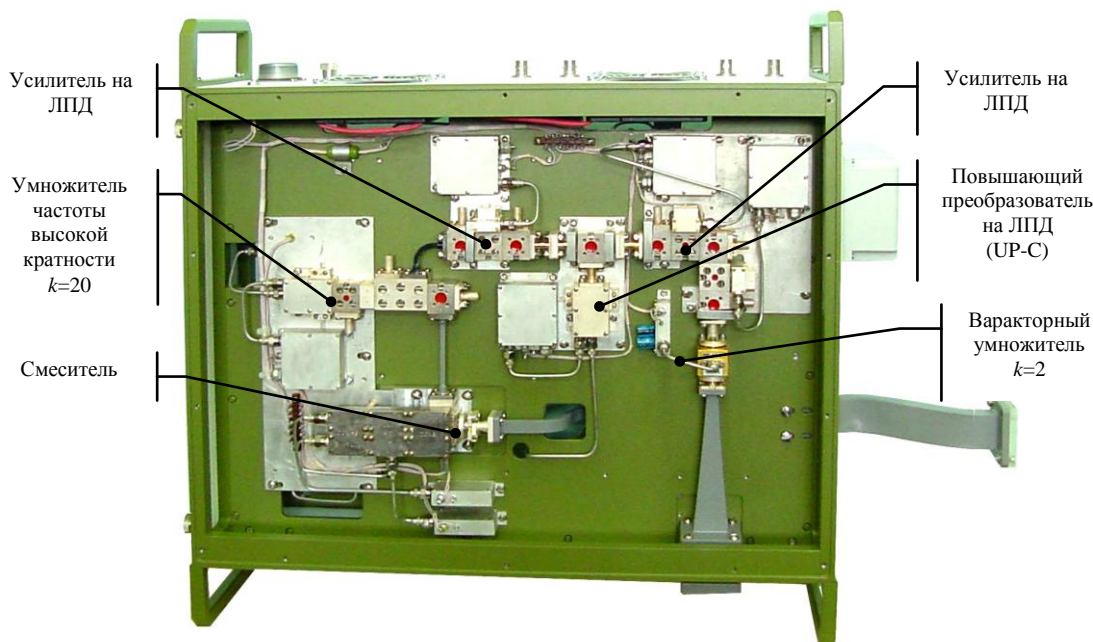


Рис. 5. Расположение узлов в интерферометре

Разработанный интерферометр обладает следующими техническими характеристиками:

1. Рабочая частота, ГГц	280
2. Выходная мощность зондирующего сигнала, мВт	1
3. Динамический диапазон входных сигналов приемника, дБ	>40
4. Максимальное напряжение на выходе квадратурного детектора, В	± 5
5. Напряжение управления АРУ, пропорциональное мощности на входе приемника, В	2,5 - 3,6
6. Дрейф фазы $\Delta\phi$ за 2 ч. (см. рис. 6), $^\circ$	$\pm 0,5$
7. Отношение сигнал/шум на выходе интерферометра в полосе $\Delta f = 100 \text{ кГц}$, дБ	>50
8. Габаритные размеры КВЧ блока интерферометра, мм ³	474 • 430 • 140

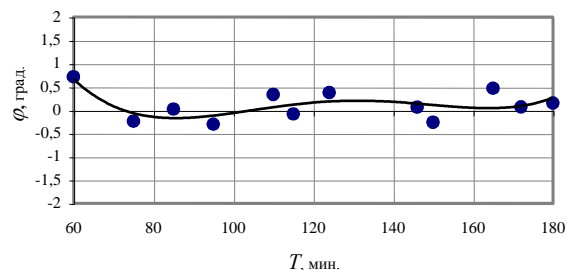


Рис. 6. Временной дрейф угла вектора напряжения на выходе интерферометра (при измерениях учтена зависимость температурного расширения измерительного тракта)

Выводы. Таким образом, разработанный гетеродинный интерферометр с рабочей частотой 280 ГГц выполнен исключительно на твердотельных элементах. Измеритель обладает высокой долговременной стабильностью фазовых характеристик $\pm 0,5^\circ$ в широком диапазоне изменения мощности входного сигнала приемника. При этом амплитуда напряжений на квадратурном выходе интерферометра остается стабильной. В интерфе-

рометре использованы специально разработанные умножитель высокой кратности на лавино-пролетном диоде с малым уровнем фазовых шумов и преобразователь частоты вверх.

1. *Anpilov A. M., Barhudarov E. M., Berezhetskaya N. K. et al.* Source of Dense Metal Plasma // Plasma Sources Science and Technology. - 1998. - 7. - P.141-148.
2. *Голант В. Е.* Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. - М.: Атомиздат, 1968. - 360 с.
3. *Сайбель А. Г.* Основы радиолокации. - М.: Сов. радио, 1961. - 384с.
4. *Jeffrey L. Hesler, William R. Hall and Thomas W. Crowe.* Submillimeter Wavelength Waveguide Mixers Using Planar Schottky-Barrier Diodes. // IEEE transactions on microwave theory and techniques. - 1997. - 45, №5. - P.653-670.
5. *Maestrin A., Ward J. and Gill J.* A planar-diode frequency tripler at 1,9 THz. // Jet Propulsion Lab., California Inst. of Technol., Pasadena, CA, USA. // Microwave Symposium Digest - 2003. - IEEE MTT-S International.
6. *Newman T., Erickson N.* A planar varactor array multiplier chain to 300 GHz // Microwave Symposium Digest - 1999. - IEEE MTT-S International.

SOLID-STATE INTERFEROMETER WITH THE OPERATING FREQUENCY 280 GHz

A. V. Zorenko, G. P. Ermak, M. O. Medved

There investigated the 280 GHz solid-state heterodyne interferometer aimed to measure the electron density of plasma. A low level of the phase fluctuations of the output signal is achieved by means of high order multiplier and up-converter based on

IMPATT diodes. For exclusion of the influence of signal fluctuations on the accuracy of the phase measuring in the interferometer there used the quadrature processing on the intermediate frequency and the amplifiers with AGC circuits. The phase drift of the output signal does not exceed $\pm 0,5^{\circ}$ and a dynamic range for receiving signal is about 40 dB.

Key words: microwave band, plasma, phase drift, solid-state interferometer, quadrature processing, IMPATT-diode.

ТВЕРДОТІЛЬНИЙ ІНТЕРФЕРОМЕТР З РОБОЧОЮ ЧАСТОТОЮ 280 ГГц

А. В. Зоренко, Г. П. Єрмак, М. О. Медвідь

В роботі розглянуто твердотільний гетеродинний інтерферометр КВЧ діапазону з робочою частотою 280 ГГц, що призначено для виміру концентрації плазми в приладах типу ТОКАМАК. Низький рівень фазових флуктуацій вихідного сигналу досягнуто за рахунок застосування помножувача частоти з високою кратністю та активного перетворювача частоти на ЛПД, що підвищує. Для виключення впливу флуктуацій загасання сигналу, що зондує плазму, на точність вимірювання фази в інтерферометрі використовується квадратурна обробка на проміжній частоті і підсилювачі з АРУ. Відносний дрейф фази вихідного сигналу інтерферометра не підвищує $\pm 0,5^{\circ}$ за 2 г. Потужність сигналу, що зондує, 1 мВт на частоті 280 ГГц. Динамічний діапазон сигналів, що приймаються 40 дБ.

Ключові слова: твердотільний гетеродинний інтерферометр, КВЧ діапазон, плазма, квадратурна обробка, помножувач частоти, ЛПД.

Рукопись поступила 3 января 2006 г.