

УДК 533.9

СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ

© 2024 г. А. С. Дрозд^{a, b, *}, Д. С. Сергеев^{a, **}, Р. А. Бегисhev^{a, c, ***}, Г. Б. Игонькина^a,
М. М. Соколов^a, Н. В. Коршунов^{a, c}, Э. Н. Хайрутдинов^a, Т. Б. Мялтон^a

^aНИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

^bНаучно-исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», Москва, Россия

^cМосковский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

^dРоссийский университет дружбы народов, Москва, Россия

*e-mail: Drozhd_AS@nrcki.ru

**e-mail: Sergeev_DS@nrcki.ru

***e-mail: Begishev_RA@nrcki.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 23.03.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Представлены отличительные особенности СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД для измерения линейно интегрированной электронной плотности, а также система обработки и регистрации его сигналов. Проведен анализ фазовой стабильности сигналов СВЧ-интерферометра. Продемонстрированы результаты измерений СВЧ-интерферометром в первую экспериментальную кампанию токамака Т-15МД. Значения фазы восстанавливались как с применением аналогового фазометра, так и постобработкой оцифрованных сигналов СВЧ-интерферометра: сигнал промежуточной частоты и сигнал кварцевого осциллятора. Показано совпадение результатов при вычислении плотности плазмы этими двумя методами.

Ключевые слова: СВЧ-интерферометр, токамак, электронная плотность, обработка сигналов, измерения плазмы

DOI: 10.31857/S0367292124050039, **EDN:** PWQHDP

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерения электронной плотности плазмы являются одними из базовых на установках по исследованию горячей плазмы. На установках типа токамак активно применяются интерферометрические методы, в том числе в субмиллиметровом диапазоне [1]. Они выдают данные о линейно-интегрированной электронной плотности плазмы. Плазма представляет собой оптически неоднородную среду, проходя через которую, электромагнитные волны приобретают дополнительный фазовый сдвиг относительно распространения в вакууме. Дополнительный набег фазы от плазмы при зондировании на обыкновенной волне определяется следующим выражением:

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda e^2}{4\pi m_e \varepsilon_0 c^2} \int_0^L n_e(l) dl \quad (1)$$

где λ – длина волны, e – заряд электрона; m_e – масса электрона; ε_0 – электрическая постоянная; c – скорость света в вакууме, интегрирование ведется по пути распространения зондирующего луча.

Применение СВЧ-источников излучения для интерферометрии плазмы имеет преимущество в большей чувствительности по сравнению с широко используемыми лазерами. СВЧ-интерферометры функционировали на таких токамаках, как HL-2A [2] и COMPASS [3].

С другой стороны, излучения с большими длинами волн сильнее подвержены негативному влиянию рефракции в плазме [4], приводящей к ошибкам в измерениях и потере мощности зондирующего сигнала, а также могут отражаться от слоев с критической электронной плотностью, не попадая на детектор. Кроме того, частота СВЧ-излучения может соответствовать гармонике циклотронной частоты

электронов в магнитном поле токамака и поглощаться в плазме [5].

В настоящее время в большинстве интерферометров измерения проводятся на промежуточной частоте (ПЧ), т. е. с небольшой разницей относительно несущей по частоте $\Delta\omega$ в опорном и измерительном плечах. Это позволяет определять набег фазы, вносимый плазмой, по измерениям фазы ПЧ со смесителя. Измерения на гомодинных схемах же могут нести в себе ошибки, связанные с непостоянством мощности детектируемой зондирующей волны, а также требуют применения дополнительных методов для устранения неоднозначности измерений.

Также возможна кратковременная потеря информации о фазе при сбоях в работе интерферометра, что может приводить к потере данных о ходе электронной плотности. Причиной таких сбоев может служить как кратковременная потеря сигнала ПЧ с детектора, связанная, например, с рефракцией в плазме, так и некорректная первичная обработка выходных сигналов интерферометра. Во избежание последнего необходимо оценивать возможные скорости изменения фазы сигнала ПЧ [7].

Данная статья посвящена применению СВЧ-интерферометра токамака Т-15МД [6] для измерения средней электронной плотности, она содержит описание системы обработки данных СВЧ-интерферометра, чувствительности диагностики, и в ней представлены результаты измерений во время первой экспериментальной кампании токамака Т-15МД.

2. СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД И СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ

СВЧ-интерферометр токамака Т-15МД предназначен для измерения средней плотности плазмы и реализации контура обратной связи по электронной плотности. Зондирование проводится в вертикальном направлении с однократным прохождением электромагнитных лучей через камеру. Для создания многоканальной диагностики планируется использование многоканального гетеродинного интерферометра на основе CO_2 - и гетеродинного лазеров, поскольку использование длин волн СВЧ-диапазона имеет физические ограничения вследствие рефракции [4]. Зондирование многоканальным лазерным интерферометром планируется проводить в горизонтальном направлении, с отражением от внутренней стенки установки.

Концептуальное описание схемы СВЧ-интерферометра было представлено в [4]. В дальнейшем

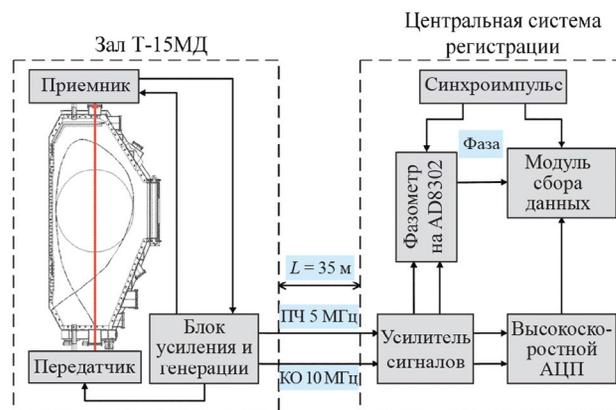


Рис. 1. Блок-схема СВЧ-интерферометра и системы обработки и регистрации данных.

частоты были скорректированы, актуальная схема показана в [8]. Его выходными сигналами являются сигнал ПЧ 5 МГц и референсный сигнал кварцевого осциллятора (КО) 10 МГц. Благодаря высокой фазовой стабильности, дополнительный набег фазы может определяться как по сигналу ПЧ 5 МГц относительно себя в «нулевой» момент времени, так и как разница фаз между ПЧ и КО. Схема СВЧ-интерферометра и системы обработки и регистрации его данных представлена на рисунке 1.

Отличительными особенностями применяемого СВЧ-интерферометра являются [4, 8]:

- твердотельная электроника для генерации СВЧ-волн;
- передача ВЧ-сигналов СВЧ-интерферометра по коаксиальным кабелям;
- жесткое соединение приемника/передатчика с антенной сборкой;
- сверхразмерные лучеводные рупорные антенны.

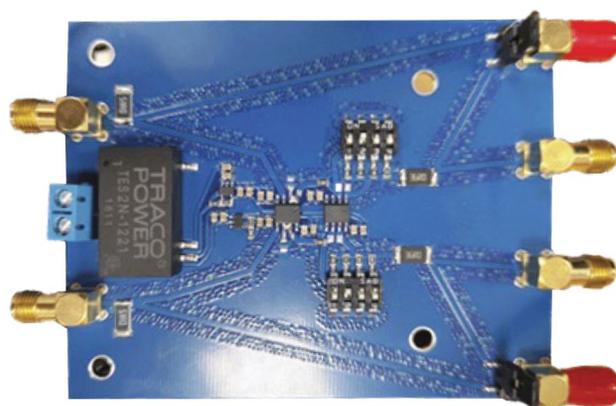


Рис. 2. Усилитель сигналов.

Вакуумная часть антенной системы отделяется окном из плавленного кварца марки КУ. Толщина окна подобрана с целью уменьшения потерь мощности СВЧ-волны. Экспериментально измерен показатель преломления кварца КУ в СВЧ-диапазоне, $n = 2.66$. Толщина стекла составляет $h = 3.0$ мм, что является одним из значений для достижения минимума отраженной мощности. Измеренные потери составили -1.48 дБ/окно.

Сигналы ПЧ и КО передаются из зала токамака в центральную систему регистрации (ЦСР) по коаксиальным кабелям длиной около 35 м. Для усиления сигналов после прохождения по длинной линии используется усилитель на основе ОУ (операционных усилителей) LM6172 (рисунок 2). Для минимизации отражений сигнальные линии усилителя выполнены в виде совмещения компланарной и микрополосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Предусмотрена возможность выставления как входного сопротивления, так и выходного для согласования нагрузок. Коэффициент усиления K выставляется при помощи резистивной сборки и изменяется от 0.13 до 20. Усилитель имеет по 2 выхода на каждый входной сигнал для одновременного подключения фазометра и быстродействующего АЦП.

Реализована двойная обработка данных: по оцифрованным сигналам ПЧ и КО СВЧ-интерферометра методами постобработки и при помощи фазометра на основе детекторов AD8302 [8]. Фазометр позволяет обрабатывать сигналы интерферометра с малой задержкой $\tau_z \sim 2$ мкс, а его выходной сигнал, пропорциональный средней электронной плотности плазмы, можно использовать для реализации обратной связи по плотности. Регистрация сигналов ПЧ и КО позволяет определять электронную плотность

с большей точностью и временным разрешением, а также дает подробную информацию о сигналах для анализа работы интерферометра.

Схема системы регистрации данных СВЧ-интерферометра показана на рисунке 3. Все модули расположены на одном шасси PXIe-1082. Реализован контур обратной связи фазовой автоподстройки частоты для синхронизации фазы встроенных часов плат АЦП Score PXIe-5153 и DAQmx PXIe-6358 с модулем синхронизации и тактирования PXIe-6674T. Осуществлена маршрутизация сигнала импульсной синхронизации старта. Сигналы СВЧ-интерферометра ПЧ и КО записываются модулем PXIe-5153 на частоте оцифровки 104 МГц разрядностью 8 бит. Так, при записи разряда длительностью 10 с объем данных будет составлять более 10 Гб. Выходные сигналы с фазометра регистрируются модулем PXIe-6358 с частотой оцифровки 50 кГц на канал. Кроме сигнала, пропорционального разности фаз, с фазометра выводятся и регистрируются выходные сигналы с детекторов AD8302, в том числе показывающие отношение мощностей сигналов ПЧ/КО.

Генератор PXIe-5423 используется для синтеза сигналов, которые возможно использовать вместо сигналов ПЧ и КО в целях тестирования оборудования [8]. Модуль может синтезировать сигналы произвольной формы с модуляцией амплитуды, фазы и наложением шума.

3. СИГНАЛЫ СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА И ИХ АНАЛИЗ

Выходные сигналы СВЧ-интерферометра представлены на рисунке 4. Отношение сигнал/шум сигнала ПЧ по мощности составляет 30, предварительно

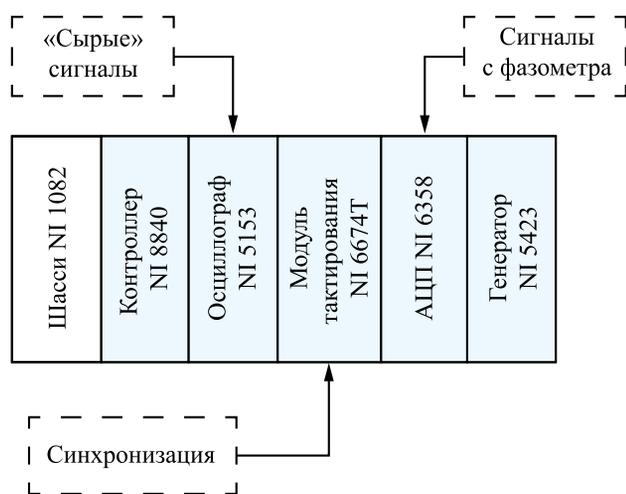


Рис. 3. Система регистрации.

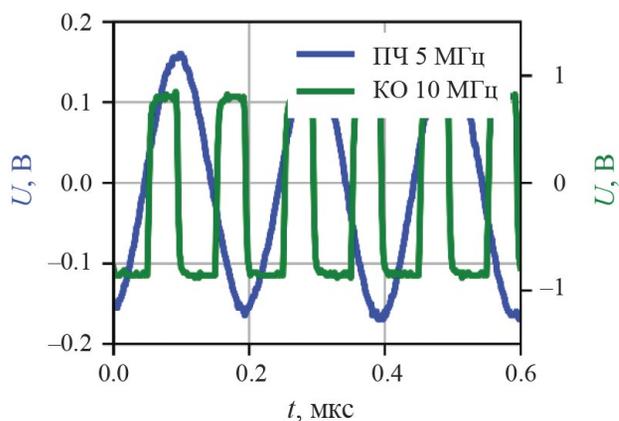


Рис. 4. Сигналы СВЧ-интерферометра.

он пропускается через полосовой аналоговый фильтр шириной $\Delta f = 150$ кГц. Нестабильность фазы сигнала ПЧ, записанного на осциллограф в разных местах линии его передачи: на выходе с блока усиления и генерации (БУГ, синий), на входе в усилитель сигналов (бордовый), на входе в АЦП (желтый), — представлена на рисунке 5. На графиках указано средне-квадратичное отклонение фазы σ . Расчет фазы проводился постобработкой с применением преобразования Гильберта, аналогично [9], с предварительной цифровой фильтрацией по частотам в полосе $\Delta f = 100$ кГц, при частоте оцифровки сигнала ПЧ в 2 ГГц осциллографом Rigol MSO5204. Видно, что передача по длинной линии и усиление не приводят к заметному росту шумов. Стоит отметить, что полученный уровень шума много меньше, чем на похожем СВЧ-интерферометре миллиметрового диапазона на плазменной установке С-2W [10], где $\sigma = 10.78^\circ$.

Тем не менее при передаче по длинной линии и усилении в сигналах СВЧ-интерферометра образуются паразитные гармоники. Для их устранения перед входом в фазометр была установлена схема из компаратора TLV3501 и полосового фильтра на операционном усилителе AD8007. Ширина фильтра близка к ширине внутреннего фильтра СВЧ-интерферометра на сигнал ПЧ в БУГ $\Delta f = 150$ кГц, а применение компаратора позволяет получить сигнал на выходе, не зависящий от амплитуды входного сигнала.

Спектры сигнала ПЧ показаны на рисунке 6. Данные снимались на выходе с БУГ и на входе фазометра: без фильтра и с фильтром. Видно, что на выходе БУГ имеются паразитные частоты, а после прохождения по длинному кабелю и усилению возникает гармоника $f = 10$ МГц, уровень которой оказывается даже выше, чем у несущей частоты. После фильтрации уровень всех паразитных частот резко уменьшается, а уровень гармоники 10 МГц составляет ~ -13 дБ.

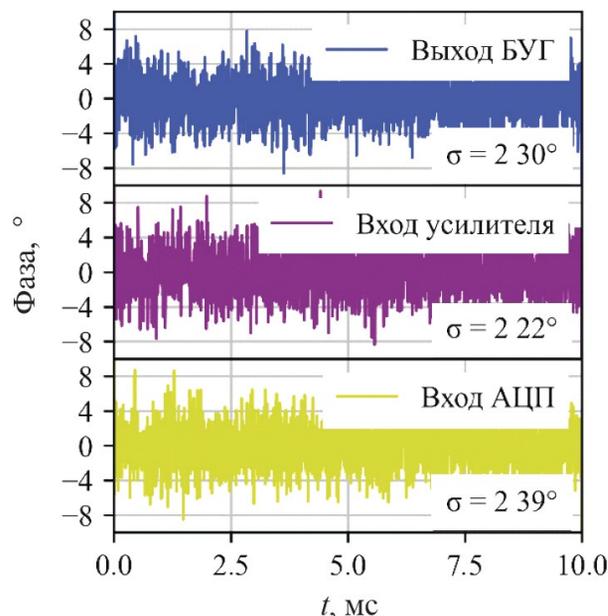


Рис. 5. Шумы фазы сигнала ПЧ.

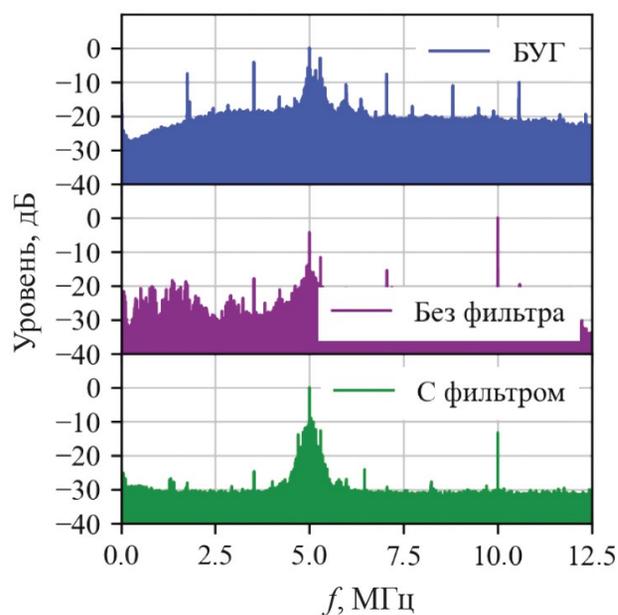


Рис. 6. Спектры сигнала ПЧ.

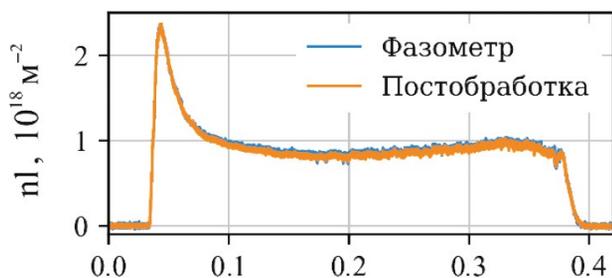
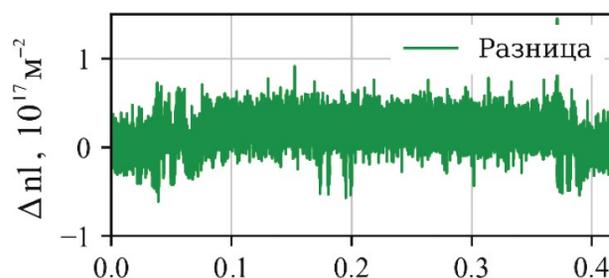


Рис. 7. Сравнение данных фазометра и постобработки.



4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В плазменных экспериментах на токамаке Т-15МД весной 2023 года плазма создавалась при помощи СВЧ-пробоя от гиротрона мощностью $P = 1$ МВт и длительностью $t \sim 500$ мс. Для большинства импульсов получены данные о ходе электронной плотности с помощью СВЧ-интерферометра по вертикальному каналу, проходящему через центр вакуумной камеры установки. Результирующий ход электронной плотности по фазометру и по постобработке оцифрованных данных с применением преобразования Гильберта практически накладываются друг на друга (рисунок 7). Расхождение между полученными двумя способами данными связано с шумами в том числе детекторов AD8302 и точностью настройки и калибровки фазометра, а величина среднеквадратичного отклонения составляет $\sigma = 2 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СВЧ-интерферометр — основная диагностика для измерения средней электронной плотности плазмы в экспериментах на токамаке Т-15МД. Получены первые данные с помощью СВЧ-интерферометра о плотности плазмы в импульсах токамака Т-15МД с СВЧ-пробоем от гиротрона. СВЧ-интерферометр и в дальнейшем будет использоваться для измерения средней плотности плазмы токамака Т-15МД, а его сигнал будет использоваться в контуре обратной связи для управления средней плотностью.

Совокупность технических решений, примененных в СВЧ-интерферометре токамака Т-15МД, помогло добиться повышения надежности и точности измерений средней вдоль линии зондирования плотности плазмы. Измерения проводятся с высокой точностью (ошибка $\sigma = 2 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$) и высоким временным разрешением (до $\tau_{\text{пч}} = 0,2$ мкс). Двойная система обработки сигналов позволяет, с одной стороны, проводить измерения в режиме реального времени для управления плотностью, с другой — дает возможность изучать высокочастотные явления

в плазме и проводить анализ работы СВЧ-интерферометра.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Veron D.* // Infrared and millimeter waves. 1979. Т. 2. С. 67.
2. *Shi. P., Shi. Z., Chen W., Zhong W., Yang Z., Jiang M., Zhang B., Li Y., Yu L., Liu Z.* // Plasma Sci. Technol. 2016. Т. 18. № 7. С. 708. Doi: 10.1088/1009-0630/18/7/02
3. *Varavin M., Zajac. J., Zacek F., Nanobashvili S., Ermak G.P., Varavin A.V., Vasilev A.S., Stumbra M., Vetoshko A., Fateev A.V., Shevchenko V.V.* // Telecommunications and Radio Engineering. 2014. Т. 73. №. 10. Doi: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i10.80
4. *Сергеев Д.С., Неруш М.Н.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. Вып. 2. С. 49. Doi: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-49-56
5. *Bornatici M.* // Plasma Physics. 1982. Т. 24. №. 6. С. 629. Doi: 10.1088/0032-1028/24/6/005
6. *Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н., Инютин Н.В., Крылов В.А., Левин И.В., Минеев А.Б., Соколов М.М.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. Вып. 1. С. 15. Doi: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-15-38
7. *Сергеев Д.С., Дрозд А.С., Кириллов А.С., Диас Михайлова Д.Е.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2022. Т. 45. Вып. 3, С. 23. Doi: 10.21517/0202-3822-2022-45-3-23-28
8. *Drozdz A., Sergeev D.* // Rev. Sci. Instrum. 2022. Т. 93. №. 6. С. 063501. Doi: 10.1063/5.0087847
9. *Hossack, A.C., Morgan, K.D., Hansen, C.J., & Sutherland, D.A.* // Rev. Sci. Instrum. 2022. Т. 93. №9 С. 093501. Doi: 10.1063/5.0097459
10. *Smith R.J. and TAE Team* // Rev. Sci. Instrum. 2018. Т. 89. Вып. 10, С. 23. Doi: 10.1063/1.5037332

T-15MD TOKAMAK MICROWAVE INTERFEROMETER FOR MEASURING THE AVERAGE ELECTRON DENSITY OF PLASMA

A. S. Drozd^{a, b, *}, D. S. Sergeev^{a, **}, R. A. Begishev^{a, c, *}, G. B. Igon'kina^a,
M. M. Sokolov^a, N. V. Korshunov^{a, c}, E. N. Khairutdinov^a, T. B. Myalton^a**

^a*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, 123182 Russia*

^b*National Research Nuclear University «Moscow Engineering Physics Institute», Moscow, 115409 Russia*

^c*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow oblast, 141701 Russia*

**e-mail: Drozd_AS@nrcki.ru*

***e-mail: Sergeev_DS@nrcki.ru*

****e-mail: Begishev_RA@nrcki.ru*

Abstract—The distinctive features of the T-15MD tokamak microwave interferometer for measuring linearly integrated electron density, as well as the system for processing and recording its signals, are presented. The phase stability of microwave interferometer signals is analyzed. The results of measurements with a microwave interferometer during the first experimental campaign of the T-15MD tokamak are presented. The phase values were extracted by using an analog phase meter and post-processing of digitized microwave interferometer signals: an intermediate frequency signal and a local oscillator signal. It is shown that the results of the plasma density calculation by these two methods coincide.

Keywords: microwave interferometer, tokamak, electron density, signal processing, plasma measurements