УДК 533.9.082.5

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-15МД ЗОНДИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Д.С. Сергеев, М.Н. Неруш

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе рассматривается прохождение зондирующего излучения субмиллиметрового диапазона в камере токамака Т-15МД по различным хордам. СВЧ-генераторы с субмиллиметровым излучением и HCN-лазеры с длиной волны излучения $\lambda = 337$ мкм широко используются в интерферометрах на многих плазменных установках в качестве источников зондирующего излучения. Рассматривается возможность применения твердотельного СВЧ-генератора и HCN-лазера в виде источников зондирующего излучения с длиной волны $\lambda = 915$ мкм и $\lambda = 337$ мкм соответственно для измерения концентрации электронов в плазме токамака Т-15МД. В работе не представляются полноценные проекты интерферометров токамака Т-15МД, но рассматривается прохождение зондирующего излучения соответствующих волн в вакуумной камере установки с целью выяснения степени влияния рефракции. Также представлены и обсуждаются принципиальные схемы интерферометров с обозначенными длинами волн и приводятся результаты расчетов относительной ошибки фазового сдвига из-за отклонения зондирующего пучка вследствие рефракции. Предлагается конструкция излучающих и приёмных антенн для ввода зондирующего пучка и его приёма при зондировании через экваториальный патрубок токамака Т-15МД и для сквозного вертикального зондирования через верхний и нижний патрубки. При этом в проходящих через экваториальный патрубок каналах зондирования происходит отражение луча от закреплённого на внутренней стенке вакуумной камеры зеркала. Показана возможность измерения основного параметра плазмы — средней концентрации электронов при зондировании электромагнитным излучением с длиной волны $\lambda = 915$ мкм, а также возможность проведения многоканальных фазовых измерений при зондировании плазменного шнура электромагнитным излучением с длиной волны $\lambda = 337$ мкм в токамаке Т-15МД.

Ключевые слова: токамак Т-15МД, электронная концентрация плазмы, СВЧ-интерферометр, HCN-лазерный интерферометр, рефракция.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF MEASURING THE ELECTRON PLASMA DENSITY OF THE T-15MD TOKAMAK BY PROBING WITH ELECTROMAGNETIC WAVES OF THE SUBMILLIMETER RANGE

D.S. Sergeev, M.N. Nerush

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The passage of probing beams of the submillimeter range in the T-15MD tokamak chamber along various chords is considered in this paper. Microwave generators with submillimeter radiation and HCN lasers with a radiation wavelength of $\lambda = 337$ μm are widely used in interferometers in many plasma systems as sources of probing beams. The possibility of using a solid-state microwave generator and an HCN laser in the form of probing radiation sources with wavelengths $\lambda = 915$ μm and $\lambda = 337$ μm , respectively, for measuring the electron concentration in the T-15MD tokamak plasma is considered. The paper does not present full-fledged designs of T-15MD tokamak interferometers, but examines the passage of the probing beams in the vacuum chamber in order to determine the influence of refraction. Schematic diagrams of interferometers with indicated wavelengths are also presented and discussed, and the results of calculations of the relative error of the phase shift due to deviation of the probe beam are presented. A design of emitting and receiving antennas is proposed. Introducing and receiving of probe beam is carried out through the T-15MD tokamak equatorial pipe and through the upper and lower pipes. In the probing channels passing through the equatorial pipe, the beams are reflected from the mirror fixed on the inner wall of the vacuum chamber. The possibility of measuring the main plasma parameter - the average electron density - when probing with electromagnetic radiation with a wavelength of $\lambda = 915$ μm , as well as the possibility of multi-channel phase measuring when probing a plasma cord with electromagnetic radiation with a wavelength of $\lambda = 337$ μm in the T-15MD tokamak is shown.

Key words: tokamak T-15MD, electron plasma density, microwave interferometer, HCN laser interferometer, refraction.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-49-56

ВВЕДЕНИЕ

В проводимых на токамаках исследованиях высокотемпературной плазмы необходимой характеристикой является средняя по сечению плазменного шнура концентрация электронов. Интерферометрия с зондированием плазмы электромагнитными волнами миллиметрового и субмиллиметрового диапазона — традиционный метод её измерения [1, 2]. Ещё одной важной характеристикой плазмы является пространственное распределение электронной плотности в шнуре. Для решения этой задачи применяется многохордовая интерферометрия [3—5].

Метод интерферометрии основан на зондировании плазмы обыкновенными электромагнитными волнами по различным хордам поперечного сечения. При прохождении зондирующего пучка сквозь плазму приобретает дополнительный фазовый сдвиг, величина которого зависит от плотности зондируемой плазмы [1, 2, 6]:

$$\varphi = \frac{\lambda e^2}{4\pi m_e \varepsilon_0 c^2} \int_A^B n_e(x) dx,$$

где e — заряд электрона; m_e — масса электрона; ε_0 — электрическая постоянная; c — скорость света в вакууме.

При этом необходимо, чтобы частота зондирующего излучения ω сильно превышала плазменную частоту $\omega_{пл}(x)$ на всём своём пути:

$$\omega \gg \omega_{пл}(x) = \sqrt{\frac{n_e(x)e^2}{\varepsilon_0 m_e}}.$$

Измеряя величину фазового сдвига, вызванного наличием плазмы, можно определить среднюю по хорде плотность

$$n_e = \frac{1}{L} \int_A^B n_e(x) dx = \frac{4\pi m_e \varepsilon_0 c^2 \varphi}{L \lambda e^2}.$$

Рис. 1. Сооружение установки Т-15МД в экспериментальном зале

Рис. 2. Зеркало для отражения зондирующего луча

просвечивать плазму как по вертикальной, так и по горизонтальным и наклонным хордам. Ввод излучения и его приём после просвечивания плазмы по вертикальному каналу осуществляются через верхний и нижний патрубки соответственно, а для горизонтальных и наклонных каналов — через экваториальный патрубок, при этом зондирующие лучи отражаются от установленных на внутренней стенке вакуумной камеры токамака Т-15МД плоских зеркал (рис. 2).

Конструкция предлагаемых зеркал позволяет производить юстировку в пределах конуса с углом раствора 7° , вращая опорные диски, выполненные в виде сплошных цилиндров.

Стоит отметить, что для удобства и однозначности измерений фазовый сдвиг определяется на промежуточной частоте [1, 4, 6].

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» ведётся сооружение токамака Т-15МД [7] (рис. 1) — первой в России крупной установки с вытянутым сечением и диверторной конфигурацией, подобной ИТЭР, что позволит проводить исследования, направленные на поддержку проектов ИТЭР и ДЕМО [8, 9]. Основные параметры сооружаемого токамака Т-15МД:

Ток плазмы I_p , МА . . .	До 2
Аспектное отношение A . . .	2,2
Большой радиус тора R_0 , м . . .	1,48
Малый радиус плазмы a , м . . .	0,67
Вытянутость сечения k_{95} . . .	1,7—1,9
Треугольность δ_{95} . . .	0,3—0,4
Тороидальное поле на оси плазмы $B_{то}$, Тл . . .	До 2,0
Длительность плато разряда $\Delta t_{плато}$, с . . .	До 10
Длительность плато тока плазмы 2 МА, с . . .	До 1,5
Мощность нагрева плазмы $P_{доп}$, МВт . . .	До 20
Плотность плазмы n_e , m^{-3} . . .	До $1 \cdot 10^{20}$

РАСПОЛОЖЕНИЕ ХОРД ЗОНДИРОВАНИЯ

Для зондирования плазмы в камере токамака обычно используют излучающие и приёмные конические антенны. Удобно использовать идентичные приёмные и излучающие антенны. Планируется

Предложена конструкция антенн рупорного типа с возможностью юстировки с помощью сильфонного узла (рис. 3). Юстировка возможна в пределах конуса с углом раствора $1,5^\circ$. Угол раскрыва конусной части антенны ограничен сверху [10] для сохранения формы фазового фронта излучения. Для зондирования на длине волны $\lambda = 915$ мкм апертуры рупорных антенн были выбраны диаметром 50 мм, для $\lambda = 337$ мкм этот размер составил 40 мм. При этом диаметр отражателя зеркала составляет около 100 мм, что существенно превышает диаметры апертур антенн в обоих случаях. Стоит отметить, что антенны находятся в вакуумном объёме камеры токамака и для разделения вакуумной части от атмосферной используются вакуумные окна с впаянным стеклом резонансной толщины, установленные на сильфонных узлах антенн.

Для размещения таких антенн на экваториальном, верхнем и нижнем фланцах камеры необходимо поместить патрубки с присоединительными фланцами в исполнении conflat с номинальным диаметром 63 мм. Размеры фланцев и их взаимная компоновка позволяют осуществить зондирование плазмы по хордам, показанным на рис. 4. Вертикальный канал зондирования обозначен как V0, горизонтальные — H0, H1, H-1, H2, H-2, H3, H-3, наклонные — U1, U2, U3, D1, D2, D3. Для ввода и приёма зондирующего излучения через экваториальный патрубок размещённые на нём антенны разнесены в тороидальном направлении.

Увеличение количества каналов зондирования через рассматриваемые фланцы возможно при использовании патрубков меньшего номинального диаметра и уменьшении апертур антенн. Однако такой подход приведёт к тому, что из-за рефракции возрастёт число каналов, для которых центр зондирующего пучка не будет попадать в приёмную антенну из-за уменьшения её апертуры.

При распространении в плазме с поперечным направлением распространения градиентом плотности зондирующий луч приобретает осевое отклонение, из-за которого в приёмную антенну попадает лишь часть зондирующего излучения.

Расчёт рефракции проводился по следующей методике. Сначала определялась траектория луча в среде с градиентом показателя преломления μ по уравнению [11]

$$\frac{1}{R} = N \frac{\text{grad} \mu}{\mu},$$

где N — вектор нормали к траектории излучения; R — радиус кривизны траектории излучения; μ — показатель преломления в плазме для обыкновенной волны, который определяется по следующей формуле:

$$\mu = \left(1 - \frac{\omega_{\text{пл}}^2}{\omega^2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Рис. 3. Конструкция антенн для ввода и приёма излучения

Рис. 4. Расположение хорд зондирования в вакуумной камере токамака Т-15МД: 1 — экваториальный фланец для установки излучающих и приёмных антенн; 2 — фланец для установки излучающей антенны вертикального канала; 3 — фланец для установки приёмной антенны вертикального канала; 4 — места установки зеркал для каналов зондирования через экваториальный фланец

Для проведения расчётов были заданы распределения электронной концентрации плазмы в приближении параболического профиля с максимальной концентрацией $2 \cdot 10^{19}$, $5 \cdot 10^{19}$ и $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ для случаев круглого и вытянутого сечений плазмы. Затем уравнение рефракции решалось численно методом Эйлера. В результате расчётов были вычислены величины осевого отклонения излучения для каждой хорды для используемых длин волн.

Кроме того, при отклонении луча от прямолинейной траектории изменяется его оптический путь, что приводит к изменению фазы приходящего на приёмную антенну излучения. Величина относительного изменения фазы зондирующего излучения из-за изменения траектории вследствие рефракции также была рассчитана.

ИНТЕРФЕРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ $\lambda = 915 \text{ мкм}$

Источником зондирующего излучения с длиной волны $\lambda = 915 \text{ мкм}$ в интерферометре токамака Т-15МД служит синтезатор, в котором генерируются от одного задающего кварцевого резонатора REF сигналы с частотами 7,45898 ГГц, 7,45713 ГГц и 77 МГц (рис. 5, а).

Рис. 5. Синтезатор и смеситель зондирующего излучения с длиной волны $\lambda = 915 \text{ мкм}$ (REF — задающий кварцевый резонатор, VCO — управляемый напряжением генератор) (а) и блок-схема интерферометра (ССД — система сбора данных, условно показаны только одна вертикальная хорда и одна горизонтальная хорда зондирования) (б)

Также внутри синтезатора происходит умножение частоты 7,45898 ГГц в 44 раза и полученным излучением с частотой 328,195 ГГц осуществляется зондирование плазмы в токамаке по одной из хорд. Пришедший из вакуумной камеры сигнал поступает в смеситель и подаётся на блок смешивания, на который также приходит сигнал частотой 7,45713 ГГц с предварительным умножением частоты на 22 внутри смесителя. На выходе из блока смешивания формируется сигнал промежуточной частоты 81,4 МГц. Для переноса измерений на ещё более низкую частоту этот сигнал пропускается через ещё один блок смешивания, на который приходит сигнал из синтезатора частотой 77 МГц. В результате получается сигнал частотой 4,4 МГц, фаза которого несёт информацию о средней электронной плотности прозондированной плазмы. Стоит отметить, что в случае максимальной плотности плазмы в центре $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ величина фазового сдвига достигает $70 \cdot 2\pi$ радиан при зондировании по центральным хордам через экваториальный патрубок с учётом двойного прохождения сквозь плазму. Этот сигнал поступает в систему сбора и обработки данных ССД, где происходит его оцифровка с последующей обработкой с

использованием плат FPGA. Метод основан на сравнении текущей фазы сигнала с детектора с фазой в начальный момент времени.

Результаты расчётов величины осевого отклонения Δ и величины относительного изменения фазы зондирующего излучения с длиной волны $\lambda = 915$ мкм из-за изменения траектории, вызванного рефракционным отклонением луча $d\varphi/\varphi$, приведены в табл. 1 для круглой конфигурации плазмы и в табл. 2 для вытянутой.

Т а б л и ц а 1. Результаты расчёта для излучения длиной волны $\lambda = 915$ мкм в случае круглой конфигурации плазменного шнура

Зондирующий канал	$n_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$		$n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$		$n_0 = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$	
	$d\varphi/\varphi, \%$	$\Delta, \text{ мм}$	$d\varphi/\varphi, \%$	$\Delta, \text{ мм}$	$d\varphi/\varphi, \%$	$\Delta, \text{ мм}$
U2	3,9	29	10,5	74	23,9	150
U1	0,6	15	1,7	39	3,7	82
H3	2,7	26	7,2	67	15,9	137
H2	1,1	20	2,9	52	6,3	108
H1	0,3	11	0,7	28	1,5	59
H0	0	0	0	0	0	0
H-1	0,3	-11	0,7	-28	1,5	-58
H-2	1,1	-20	2,9	-52	6,4	-107
H-3	2,7	-26	7,2	-67	16,0	-136
D1	0,3	-14	0,8	-36	1,9	-77
D2	3,2	-39	9,0	-103	21,9	-222
V0	0	0	0	0	0	0

Т а б л и ц а 2. Результаты расчёта для излучения длиной волны $\lambda = 915$ мкм в случае вытянутой конфигурации плазменного шнура

Зондирующий канал	$n_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$		$n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$		$n_0 = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$	
	$d\varphi/\varphi, \%$	$\Delta, \text{ мм}$	$d\varphi/\varphi, \%$	$\Delta, \text{ мм}$	$d\varphi/\varphi, \%$	$\Delta, \text{ мм}$
U3	4,8	29	13,0	75	29,3	149
U2	0,4	12	1,2	32	2,5	66
U1	0	3	0,1	8	0,2	17
H3	0,2	9	0,5	23	1,0	46
H2	0	4	0,1	11	0,2	24
H1	0	0	0	0	0	-1
H0	0	-4	0,1	-9	0,2	-20
H-1	0,1	-7	0,4	-19	0,7	-39
H-2	0,2	-9	0,6	-23	1,2	-47
H-3	0,3	-11	0,9	-27	1,8	-55
D1	0,3	-13	0,8	-34	1,7	-71
D2	0,9	-23	2,5	-59	5,3	-125
D3	4,6	-43	12,6	-107	28,9	-216
V0	0,3	-7	0,9	-19	1,8	-39

Видно, что в случае круглой конфигурации плазмы уже при максимальной плотности $n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ из-за рефракции центр зондирующего излучения по множеству хорд не попадает в приёмную антенну (здесь и далее выделены жирным шрифтом). С увеличением плотности остаётся возможным зондирование плазмы только по центральным горизонтальной и вертикальной хордам.

В случае вытянутой конфигурации плазменного шнура при максимальной электронной плотности $n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ центр зондирующего излучения будет попадать в приёмные антенны лишь в нескольких каналах, а луч вертикального канала испытывает значительное отклонение.

Таким образом, интерферометром с длиной волны зондирующего излучения $\lambda = 915$ мкм на токамаке Т-15МД возможно вести измерения средней электронной концентрации плазмы через экваториаль-

ный патрубок установки, а по вертикальному каналу — в случае круглой конфигурации плазменного шнура или при вытянутой конфигурации, но в режимах с низкими значениями электронной плотности плазмы. В остальных случаях необходимо использовать более коротковолновое излучение для уменьшения негативного влияния рефракции.

ИНТЕРФЕРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ $\lambda = 337$ МКМ

В качестве источника излучения с меньшей длиной волны предлагается использовать газоразрядный HCN-лазер с высокочастотной накачкой. Ранее измерения HCN-лазерными интерферометрами проводились на токамаках НИЦ «Курчатовский институт» [5, 12]. На рис. 6 показана предлагаемая блок-схема интерферометра для токамака Т-15МД [13].

Рис. 6. Блок-схема интерферометра с длиной волны зондирующего излучения $\lambda = 337$ мкм (вертикальная хорда не показана). Трансляция, деление и смешивание излучения осуществляются с помощью жёстко скреплённых между собой и к фланцу установки квазиоптических элементов

HCN-лазер генерирует излучение длиной волны 337 мкм мощностью несколько десятков милливатт. Затем оно разделяется в измерительный и опорный каналы. В измерительном канале плазма просвечивается по хордам, а в опорном канале лазерный луч проходит через сдвигатель частоты, в результате чего его частота изменяется на 106 кГц. Затем зондирующий луч каждой хорды смешивается с опорным лучом и попадает на детектор, откуда полученный сигнал промежуточной частоты 106 кГц следует в систему сбора данных ССД. Образующийся в опорном интерферометре не связанный с плазмой сигнал промежуточной частоты также поступает в систему сбора и обработки данных ССД, где происходят оцифровка сигналов с детекторов и дальнейшая обработка с использованием плат FPGA. Путём сравнения сигналов измерительного и опорного интерферометров в каждый момент времени определяется вызванный наличием плазмы фазовый сдвиг в измерительном интерферометре. В случае максимальной плотности плазмы в центре $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ожидаемая величина фазового сдвига достигает $30 \cdot 2\pi$ радиан при зондировании по центральным хордам через экваториальный патрубок с учётом двойного прохождения сквозь плазму.

Стоит отметить, что при зондировании плазмы волнами этого диапазона возникает существенное влияние вибраций, поэтому большинство современных HCN-лазерных интерферометров являются двухцветными. С 1980-х годов в токамаках НИЦ «Курчатовский институт» для трансляции зондирующего излучения в интерферометрах используются жёстко скреплённые между собой полые диэлектрические сверхразмерные лучеводы и другие квазиоптические элементы, которые также жёстко крепятся и

к фланцу установки, подобные описанным в [14]. Такое решение значительно снижает влияние вибраций на фазовые измерения [12] и позволит проводить их без необходимости зондирования двумя длинами волн. В интерферометрах токамака Т-15МД для трансляции зондирующего излучения также предполагается использование полых диэлектрических сверхразмерных лучеводов.

Результаты расчётов величины осевого отклонения Δ и величины относительного изменения фазы зондирующего излучения с длиной волны $\lambda = 337$ мкм из-за изменения траектории, вызванного рефракционным отклонением луча $d\phi/\phi$, приведены в табл. 3 для круглой конфигурации плазмы и в табл. 4 для вытянутой.

Т а б л и ц а 3. Результаты расчёта для излучения длиной волны $\lambda = 337$ мкм в случае круглой конфигурации плазменного шнура

Зондирующий канал	$n_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$		$n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$		$n_0 = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$	
	$d\phi/\phi$, %	Δ , мм	$d\phi/\phi$, %	Δ , мм	$d\phi/\phi$, %	Δ , мм
U2	0,5	4	1,3	10	2,6	20
U1	0,1	2	0,2	5	0,4	10
H3	0,3	3	0,9	9	1,9	18
H2	0,1	3	0,4	7	0,8	14
H1	0	1	0,1	4	0,2	7
H0	0	0	0	0	0	0
H-1	0	-1	0,1	-4	0,2	-7
H-2	0,1	-3	0,4	-7	0,8	-14
H-3	0,3	-3	0,9	-9	1,9	-18
D1	0	-2	0,1	-5	0,2	-10
D2	0,4	-5	1,1	-13	2,2	-27
V0	0	0	0	0	0	0

Т а б л и ц а 4. Результаты расчёта для излучения длиной волны $\lambda = 337$ мкм в случае вытянутой конфигурации плазменного шнура

Зондирующий канал	$n_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$		$n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$		$n_0 = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$	
	$d\phi/\phi$, %	Δ , мм	$d\phi/\phi$, %	Δ , мм	$d\phi/\phi$, %	Δ , мм
U3	0,6	4	1,6	10	3,3	21
U2	0,1	2	0,2	4	0,3	8
U1	0	0	0	1	0	2
H3	0	1	0,1	3	0,1	6
H2	0	1	0	1	0	3
H1	0	0	0	0	0	0
H0	0	0	0	-1	0	-3
H-1	0	-1	0	-2	0,1	-5
H-2	0	-1	0,1	-3	0,2	-6
H-3	0	-1	0,1	-4	0,2	-7
D1	0	-2	0,1	-5	0,2	-9
D2	0,1	-3	0,3	-8	0,6	-16
D3	0,6	-5	1,5	-14	3,2	-30
V0	0	-1	0,1	-3	0,2	-5

Как видно из результатов расчёта, в случае как круглой, так и вытянутой конфигурации плазменного шнура при плотности в центре до $n_0 = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ на большинство хорд приходит сигнал без существенного отклонения. Таким образом, интерферометром с длиной волны зондирующего излучения $\lambda = 337$ мкм возможно вести измерения электронной концентрации плазмы токамака Т-15МД практически по всем предлагаемым хордам и при существенно более высоких плотностях, чем при зондировании излучением с длиной волны $\lambda = 915$ мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для плазмы токамака Т-15МД для случаев круглой и вытянутой конфигураций с учётом рефракции были оценены осевые отклонения зондирующих пучков и относительные разницы набегов фаз. Расчёты прово-

дились для зондирующих излучений с длинами волн $\lambda = 915$ мкм и $\lambda = 337$ мкм при параболическом распределении электронной концентрации плазмы с максимальным значением $2 \cdot 10^{19}$, $5 \cdot 10^{19}$ и $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Предложена конструкция излучающих и приёмных антенн рупорного типа для ввода излучения и его приёма после отражения от внутренней стенки через экваториальный патрубок токамака Т-15МД и для сквозного вертикального зондирования через верхний и нижний патрубки токамака Т-15МД.

Показана возможность измерения основного параметра плазмы — средней концентрации электронов по центральным хордам при зондировании излучением с длиной волны $\lambda = 915$ мкм.

Фазовые измерения при зондировании плазмы излучением с длиной волны $\lambda = 337$ мкм в токамаке Т-15МД возможно проводить для определения хордовых значений электронной концентрации плазмы практически по всем рассматриваемым хордам.

Работа выполнена при финансировании Госкорпорации «Росатом».

REFERENCES

1. **Gorbunov E.P.** Technique of measuring the average electron density in tokamak plasma. — In coll.: Plasma diagnostics. — M.: Gosatomizdat, 1963, p. 68 (in Russian).
2. **Golant V.E.** Ultra high frequency methods of plasma study. — ZhTF (JTPH), 1960, vol. 30, p. 1265 (in Russian).
3. **Gorbunov E.P., Dnestrovskiy Yu.N., Kostomarov D.P.** Determination of the plasma density spatial distribution using phase measurements. — ZhTF (JTPH), 1968, vol. 38, issue 5, p. 812 (in Russian).
4. **Bagdasarov A.A., Buzankin V.V., Vasin N.L., Gorbunov E.P., Denisov V.F., Kuleshov E.M., Savchenko V.N., Khilil' V.V., Shcherbov V.A.** Nine-channel submillimeter range interferometer for measuring the electron concentration on «Tokamak T-10» facility. — In coll.: Plasma diagnostics, issue 4 (11). — M.: Energoatomizdat, 1981, pp. 141—146 (in Russian).
5. **Gorbunov E.P., Denisov V.F., Nesterov P.K., Skosyrev Yu.V., Shcherbov V.A., Khilil' V.V.** Application of multi-channel laser interferometer of vertical probing for measuring the plasma density profile on T-15 tokamak. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1992, vol. 18, issue 2, pp. 162—165 (in Russian).
6. **Veron D.** Submillimeter Interferometry of High-Density Plasmas, in Infrared and Millimeter Waves. — New York: Academic Press, 1979.
7. **Khvostenko P.P., Anashkin I.O., Bondarchuk E.N., Inyutin N.V., Krylov V.A., Levin I.V., Mineev A.B., Sokolov M.M.** Experimental thermonuclear installation tokamak T-15MD. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2019, vol. 42, issue 1, pp. 15—38 (in Russian).
8. **Aymar R., Barabaschi P., Shimomura Y.** The ITER design. — Plasma Physics and Controlled Fusion, 2002, vol. 44, pp. 519—565.
9. **McFadden G.B.** Design of the DEMO Fusion Reactor Following ITER. — J. of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2009, vol. 114, № 4, pp. 229—236.
10. **Beketov V.I.** Antennas of ultrahigh frequencies. — M.: Radiolokatsionnaya tekhnika (Radar technology), 1957 (in Russian).
11. **Landau L.D., Lifshits E.M.** Theoretical physics. Vol. VIII. Electrodynamics of continuum media. — M.: Nauka (Science), 1982. 620 p. (in Russian).
12. **Gorbunov E.P., Kuleshov E.M., Nesterov P.K., Skosyrev Yu.V., Shcherbov V.N.** Nine-channel submillimeter range interferometer for T-15 facility. — In coll.: Plasma diagnostics. — M.: Energoatomizdat, 1989, issue 6, pp. 135—137 (in Russian).
13. **Nerush M.N., Sergeev D.S.** Multi-channel HCN-laser interferometer for measuring the electron concentration in T-15MD tokamak plasma. — In coll.: Proceedings of XV International scientific-technical conference «Optical methods of flows study». 2—28 June 2019 — M.: Pub.house «Pero (Pen)», 2019, pp. 212—221 (in Russian).
14. **Gorshko A.I., Kuleshov E.M.** Investigation of a hollow dielectric beamguide of millimeter and submillimeter wave ranges. — Radiotekhnika (Radio engineering), (Kharkov, KhSU), 1972, issue 21 (in Russian).

AUTHORS

Sergeev D.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Nerush M.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 27 December 2019

Revised 23 March 2020

Accepted 15 May 2020

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2020, vol. 43, issue 2, pp. 49—56