

УДК 533.9

СВЧ-МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТРУБЧАТОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

© 2024 г. А. В. Пономарев^{a,*}, Д. К. Ульянов^{a,**}^a Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*e-mail: aponomarev68@gmail.com

**e-mail: ulyanov@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 21.03.2024 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 28.04.2024 г.

Создан и опробован метод определения абсолютного значения концентрации плазмы в источниках, создающих плазму электронным пучком в сильном магнитном поле. Представлены результаты измерений концентрации плазмы в источнике трубчатой плазмы, используемом в исследованиях по плазменной релятивистской СВЧ-электронике. Показано, что в момент включения плазменного лазера, концентрация плазмы составляла величины $(3 \pm 0.3) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для тока разряда в источнике 5 А, $(5.5 \pm 0.6) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для тока разряда 9 А и $(9.5 \pm 1) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для тока разряда 20 А. Сравнение с проведенными ранее зондовыми измерениями, а также с численными расчетами, сделанными с помощью кода КАРАТ, показало хорошее согласие результатов СВЧ-измерений с численными расчетами, при этом погрешность измерений не превышала 15%. Зондовые измерения дают значительно большее отклонение от результатов СВЧ-измерений, что связано с наличием сильного магнитного поля в плазменном источнике.

Ключевые слова: трубчатая плазма, магнитное поле, СВЧ-измерения, ленгмюровский зонд, концентрация плазмы, запердельный волновод, плазменный мазер

DOI: 10.31857/S0367292124060033, EDN: PTJAUP

1. ВВЕДЕНИЕ

Плазменный мазер — это мощный источник СВЧ-излучения, который работает на основе черенковского взаимодействия релятивистского электронного пучка с распространяющимися в плазме медленными волнами. В этом его главное отличие от вакуумных ламп бегущей волны, в которых используются пространственно-периодические замедляющие структуры, например, гофрированный волновод. Наличие плазмы, как замедляющей структуры, дает возможность перестройки средней частоты излучения путем изменения концентрации плазмы. Поэтому знание параметров плазмы важно для понимания процессов, происходящих в плазменных лазерах, а также и для совершенствования их работы как генераторов мощного СВЧ-излучения. К сожалению, традиционные методы диагностики плазмы — зондовые измерения, оптическая интерферометрия, микроволновая диагностика, не работают в условиях присутствия в системе релятивистского электронного пучка, интенсивного света от взрывоэмиссионного катода и мощного СВЧ-излучения. Поэтому остаются два пути — либо косвенная оценка концентрации плазмы путем сравнения спектров излучения плазменного лазера с численными моделями [1–3], либо измерение параметров плазмы традиционными ме-

тодами в отсутствие релятивистского электронного пучка и связанных с ним мешающих факторов. Данная работа следует в русле второго пути и является продолжением работы [4].

В работе [4] были проведены зондовые измерения параметров плазмы в источнике трубчатой плазмы, который применяется в исследованиях по плазменной релятивистской СВЧ-электронике. Они позволили определить температуру электронов, независимость концентрации плазмы от длины плазменного столба и линейную зависимость между током разряда и зондовым током, что позволяет контролировать относительное изменение концентрации плазмы в течение эксперимента. Абсолютное значение концентрации плазмы носило оценочный характер, так как плазма находится в сильном магнитном поле, которое не учитывается в стандартной теории Ленгмюра. Целью данной работы является определение абсолютного значения концентрации плазмы СВЧ-методом в источнике трубчатой плазмы для плазменного лазера.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема установки показана на рис. 1. Плазма создается в цилиндрическом волноводе I диаметром 60 мм при давлении воздуха $8.6 \times 10^{-2} \text{ Па}$ ($6.5 \times 10^{-4} \text{ Торр}$), который помещен внутрь соленоида 2 , создающего

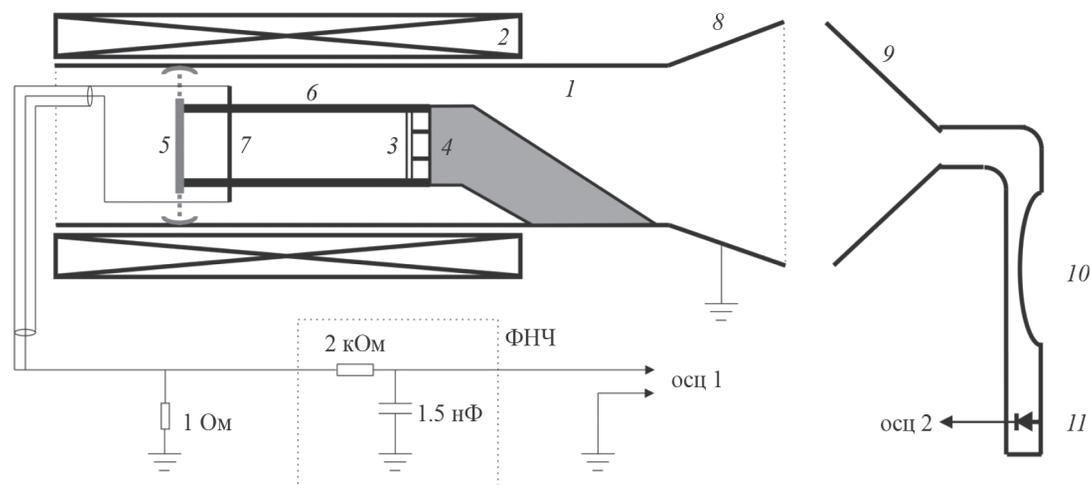


Рис. 1. Схема установки. 1 – волновод, 2 – соленоид, 3 – термокатод, 4 – электрод-держатель, 5 – подвижный коллектор, 6 – трубочатая плазма, 7 – зонд, 8 – излучающий рупор, 9 – приемный рупор, 10 – запредельный волновод, 11 – детектор СВЧ.

аксиальное магнитное поле 1 Тл. Кольцевой термокатод 3 изготовлен из листового вольфрама толщиной 0.5 мм. В момент запуска на катод подается импульсный ток накала, длительностью 2 с, нагревающий его до температуры около 3000 К. После этого на термокатод 3 подается прямоугольный отрицательный относительно волновода 1 импульс напряжения амплитудой 500 В и длительностью 160 мкс. В результате термоэлектронной эмиссии образуется трубочатый электронный пучок, распространяющийся вдоль линий индукции магнитного поля как вправо, к внутреннему электроду 4, так и влево, к коллектору 5, электрически соединенному с волноводом 1. Этот электронный пучок, распространяясь в разреженном газе (в эксперименте использовался воздух) ионизирует его и создает трубочатую плазму 6 с внутренним и внешним диаметрами 35 мм и 39 мм соответственно. Концентрация создаваемой плазмы, может меняться от импульса к импульсу путем изменения температуры термокатаода 3, которая, в свою очередь, определяется током накала. Длина столба плазмы составляла около 20 см. Полный ток, идущий через плазму между термокатодом 3 и волноводом 1, мы называем током разряда.

Справа от коллектора 5 на расстоянии 15 мм от него по диаметру волновода установлен одиночный зонд 7 из нихромовой проволоки диаметром 0.18 мм. Ток зонда выводится из вакуумной части наружу и через резистор 1 Ом замыкается на землю. Сигнал с резистора через фильтр низкой частоты (ФНЧ) подается на один канал осциллографа. Непосредственно за излучающим рупором 8 находится приемный рупор 9 такого же диаметра переходящий в стандартный прямоугольный волновод 23×10 мм². Далее по волноводному тракту ставится один из шести запредельных волноводов 10, данные которых представлены в табл. 1. Волноводный тракт заканчивается детектор-

Таблица 1. Характеристики используемых запредельных волноводов: № – номер волновода; f_0 – линейная СВЧ-частота отсечки; n_p – концентрация плазмы, для которой плазменная частота равна частоте отсечки.

№	f_0 , ГГц	n_p , 10^{12} см ⁻³
1	6.5	0.55
2	7.9	0.8
3	10	1.3
4	12	1.9
5	15.8	3.2
6	18.8	4.6

ной головкой 11, сигнал с которой поступает на другой канал того же осциллографа.

3. ИДЕЯ МЕТОДА

Плазма в эксперименте создается электронным пучком в два этапа [5]. Сначала концентрация плазмы растет только за счет ударной ионизации молекул газа электронами пучка. После достижения критической концентрации плазмы (около 10^8 см⁻³ в нашем случае) возникает плазменно-пучковый разряд, и происходит дополнительная ионизация СВЧ-полями. При этом, согласно расчету, СВЧ-поля в основном сосредоточены внутри плазменной трубки, поэтому ионизации фонового газа полями вне плазмы не происходит и не приводит к уширению трубочатой плазмы. На рис. 2 представлена дисперсионная характеристика плазменного волновода в предположении бесконечно сильного магнитного поля и постоянства концентрации плазмы внутри плазменной трубки. Показана азимутально симметричная мода и две азимуталь-

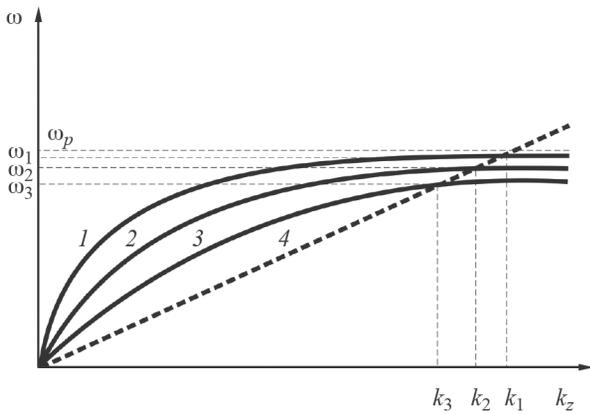


Рис. 2. Дисперсионная характеристика плазменного волновода в предположении бесконечно сильного магнитного поля. Быстрые моды не показаны. 1 — азимутально симметричная мода медленной плазменной волны, 2, 3 — азимутально несимметричные моды, 4 — линия электронного пучка, создающего плазму.

но несимметричные моды волн в волноводной системе с трубчатой плазмой. Реальное распределение концентрации плазмы внутри плазменной трубки измерялось в [8], где было показано, что распределение близко к прямоугольному поперек плазменной трубки и, с точностью до азимутальных колебаний, постоянно по длине. Плазменно-пучковый разряд возникает в результате черенковского взаимодействия электронного пучка с медленными плазменными волнами волновода при условии равенства фазовых скоростей. На рис. 2 это точки, соответствующие волновым числам k_1, k_2, k_3 . Им соответствуют частоты возникающих СВЧ-полей $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ соответственно. Азимутально несимметричных мод может быть много, но важно то, что частоты их возбуждения меньше частоты возбуждения ω_1 азимутально симметричной моды. Кроме того, частота ω_1 очень близка к плазменной частоте ω_p . Оценки показывают, что в наших условиях относительное отклонение частот $(\omega_1 - \omega_p)/\omega_p$ равно 0.03% для концентрации плазмы 10^{12} см^{-3} , и 0.003% для концентрации плазмы 10^{13} см^{-3} .

Таким образом, спектр СВЧ-излучения в системе с плазмой имеет резкую верхнюю границу, равную $\omega_1 \approx \omega_p$. Измеряя верхнюю границу спектра мы определяем плазменную частоту ω_p и, по ней концентрацию плазмы n_p по формуле:

$$n_p = \frac{\epsilon_0 m \omega_p^2}{e^2},$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, m и e — масса и заряд электрона.

4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В эксперименте измерялся сигнал с ленгмюровского зонда и сигнал с СВЧ-детектора. Типичные осциллограммы сигналов представлены на рис. 3. В момент

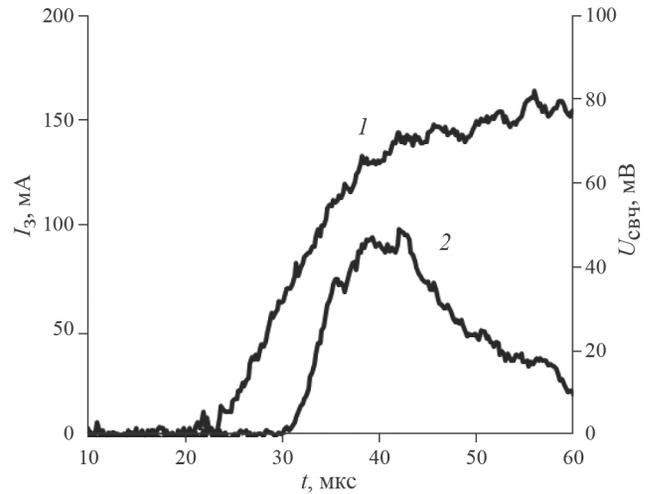


Рис. 3. Осциллограмма сигналов с зонда 1 и с СВЧ-детектора 2. Запредельный волновод — 10 ГГц, ток разряда — 5 А.

подачи импульса отрицательного напряжения на термокатод (20-я мкс на рис. 3) начинает создаваться плазма и появляется зондовый ток. При нулевом смещении на зонде он находится в режиме электронного насыщения [4], и сигнал с него пропорционален средней по сечению плазменной трубки концентрации плазмы. После достижения критической концентрации плазмы возникают СВЧ-поля, и часть их через рупоры 8, 9 попадают на вход запределного волновода 10 (рис. 1). При малой концентрации плазмы все излучаемые из плазмы частоты лежат ниже полосы пропускания запределного волновода, и сигнал с СВЧ-детектора 11 (рис. 1) отсутствует. Как только концентрация плазмы достигает такого значения, при котором верхняя частота спектра начинает попадать в полосу пропускания запределного волновода, появляется сигнал с СВЧ-детектора. Измеряя момент времени, при котором возникает сигнал с СВЧ-детектора, и зная частоту отсечки запределного волновода, мы определяем концентрацию плазмы в данный момент времени в предположении ее постоянства внутри плазменной трубки. На рис. 3, например, сигнал с СВЧ-детектора появляется на 31-й мкс. Это значит, что в этот момент времени линейная плазменная частота ($f_0 = \omega_p/2\pi$) равна частоте отсечки $f_0 = 10 \text{ ГГц}$ запределного волновода и, следовательно, концентрация плазмы равна

$$n_p = \frac{\epsilon_0 m (2\pi f_0)^2}{e^2} = 1.3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}.$$

Ток на зонд при этом равен 68 мА. Таким образом, по данной точке подбирается масштаб для пересчета всей осциллограммы в значения концентрации плазмы. Для оценки точности получаемых результатов были проведены измерения времени начала СВЧ-импульса и тока на зонд в этот момент вре-

Таблица 2. Время начала СВЧ-импульса и величина тока на зонд в этот момент времени для шести разных импульсов в одинаковых условиях. Запредельный волновод 10 ГГц, ток разряда 5 А.

№ импульса	Время, мкс	Ток на зонд, мА
1	30.6	76
2	31.4	86
3	31.0	78
4	31.2	70
5	31.0	68
6	31.2	76

мени для шести разных импульсов работы плазменного источника в одинаковых условиях. Результаты представлены в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что относительный разброс времени начала СВЧ-импульса составляет $\pm 3\%$, а разброс тока на зонд в этот момент времени $\pm 8\%$. Считая эти величины независимыми, мы получаем, что точность наших измерений составляет $\pm 9\%$.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4, 5 и 6 приведены результаты измерений для трех токов разряда 5, 9 и 20 А. Данные токи разряда были выбраны для соответствия параметрам эксперимента в [1]. Каждый из этих рисунков представляет собой осциллограмму сигнала с зонда в режиме электронного насыщения (левая вертикальная шкала) и величины концентрации плазмы (правая вертикальная шкала) для конкретных моментов времени, определенных по методике, описанной выше. При этом масштаб правой шкалы подбирается таким образом, чтобы получилось наилучшее соответствие между то-

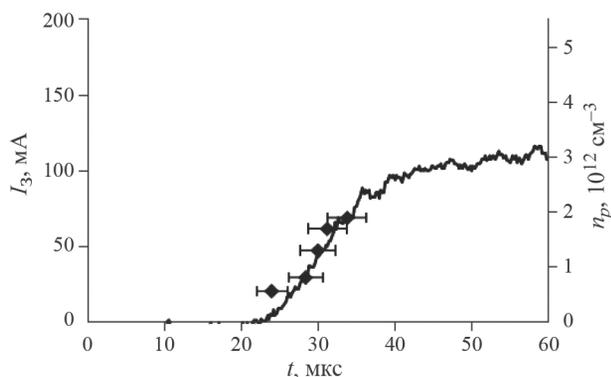


Рис. 4. Зависимость от времени тока на зонд в режиме электронного насыщения (левая вертикальная шкала) и величины концентрации плазмы (правая вертикальная шкала). Ток разряда — 5 А.

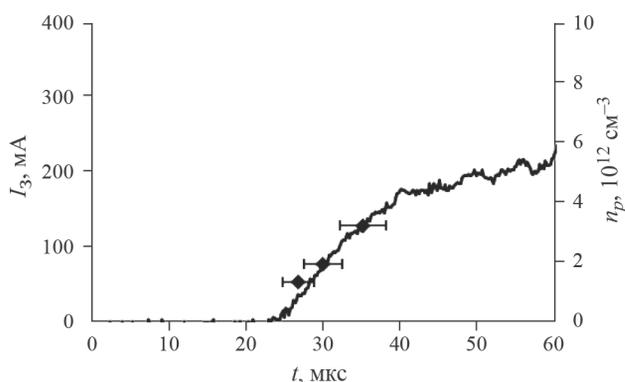


Рис. 5. То же, что и рис. 4. Ток разряда 9 А.

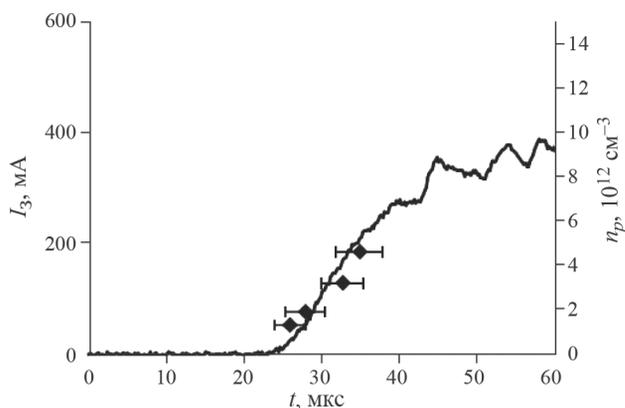


Рис. 6. То же, что и рис. 4. Ток разряда 20 А.

ком на зонд и измеренными значениями концентрации плазмы. После этого зависимость зондового тока на рис. 4–6 считается калиброванной, то есть она показывает значение концентрации плазмы в любой момент времени.

Для экспериментов по генерации мощного СВЧ-излучения [1, 6, 7] особенно важно знание концентрации плазмы на 60-й мкс, так как именно в этот момент времени включается плазменный релятивистский генератор. Из рис. 4–6 следует, что на 60-й микросекунде концентрация плазмы равна $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для тока разряда 5 А, $5.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для тока разряда 9 А и $9.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для тока разряда 20 А.

Возникает вопрос, почему бы не измерить концентрацию плазмы этим методом непосредственно на 60-й мкс. Проблема в том, что сигнал с СВЧ-детектора резко уменьшается с увеличением частоты СВЧ-излучения из плазмы и, соответственно, концентрации плазмы. Например, на рис. 5 точка, соответствующая концентрации плазмы $1.3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ получена из СВЧ-сигнала амплитудой 250 мВ; точка, соответствующая концентрации плазмы $1.9 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, получена из СВЧ-сигнала амплитудой 15 мВ, а точка, соответствующая концентрации плазмы $3.2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, получена из СВЧ-сигнала ампли-

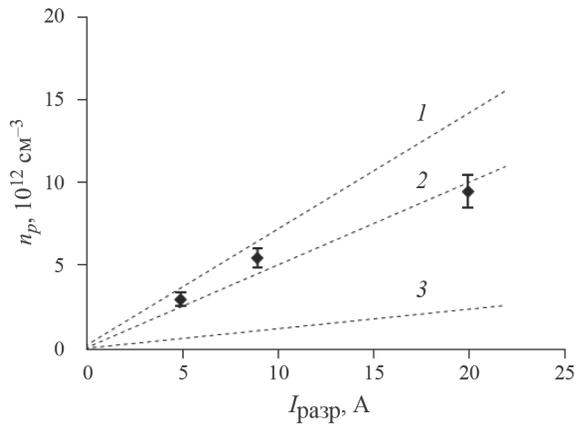


Рис. 7. Зависимость концентрации плазмы, определенной разными методами от тока разряда: 1 – по зондовым измерениям ионного тока, 2 – расчет кодом КАРАТ, 3 – по зондовым измерениям электронного тока. Взято из [4]. Ромбики – измерения из данной работы.

тудой 0.5 мВ, что является нашим пределом точности измерения СВЧ-сигнала.

На рис. 7 представлено сравнение результатов измерения концентрации плазмы, полученных в данной работе, с результатами работы [4], в которой концентрация плазмы оценивалась с помощью зондов Ленгмюра, а также рассчитывалась с помощью кода КАРАТ. Методика зондовых измерений и численного расчета подробно описана в [4]. Рисунок 7 демонстрирует, что результаты измерения концентрации плазмы СВЧ-методом наиболее близко соответствуют численным расчетам, сделанным в коде КАРАТ. Зондовые измерения дают отклонение от правильных результатов, причем если для измерений по ионному току погрешность не превышает 50%, то для измерений по электронному току погрешность равна 300–400%. Как обсуждалось в [4], это связано с наличием сильного магнитного поля в рассматриваемом плазменном источнике.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты СВЧ-измерений концентрации трубчатой плазмы в источнике, используемом в плазменных лазерах [1, 6, 7]. Результаты измерений сопоставлены с током разряда в источнике. Показано, что на 60-й мкс, в момент

включения плазменного лазера, концентрация плазмы равна $(3 \pm 0.3) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для тока разряда 5 А, $(5.5 \pm 0.6) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для тока разряда 9 А и $(9.5 \pm 1) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для тока разряда 20 А. Также установлено, что концентрация плазмы растет практически пропорционально росту тока разряда, что позволяет оценивать ее по значению тока разряда, измеряемому в процессе эксперимента.

Сравнение с проведенными ранее зондовыми измерениями, а также численными расчетами плазменного лазера [1], сделанными с помощью кода КАРАТ, показало хорошее согласие (погрешность менее 15%) результатов СВЧ-измерений с численными расчетами. Зондовые измерения дают большее отклонение от результатов СВЧ-измерений, связанное с наличием сильного магнитного поля в плазменном источнике.

Авторы выражают благодарность П. С. Стрелкову и И. Е. Иванову за многочисленные полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buleyko A.B., Ponomarev A.V., Loza O.T., Ulyanov D.K., Sharyпов K.A., Shunailov S.A., Yalandin M.I. // Phys. Plasmas. 2021.V. 28. № 2. P. 023304 DOI: 10.1063/5.0031432
2. Стрелков П.С., Тараканов В.П., Диас Михайлова Д.Е., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 4. С. 335.
3. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Диас Михайлова Е.Д., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 3. С. 257.
4. Пономарев А.В., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 6. С. 576. DOI: 10.31857/S0367292122601485
5. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: ЛЕНАНД, 2018. 624 с.
6. Buleyko A.B., Ponomarev A.V., Loza O.T., Ulyanov D.K., Andreev S.E. // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. № 2. P. 023303 DOI: 10.1063/5.0013145
7. Богданкевич И.Л., Гришин Д.М., Гунин А.В., Иванов И.Е., Коровин С.Д., Лоза О.Т., Месяц Г.А., Павлов Д.А., Ростов В.В., Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2008.Т. 34.№ 10. С. 926. DOI 10.1134/S1063780X08100061
8. Лоза О.Т., Пономарев А.В., Стрелков П.С. и др. // Физика плазмы. 1997.Т. 23. №3. С. 222.

MICROWAVE METHOD OF TUBULAR PLASMA DENSITY MEASUREMENT FOR RELATIVISTIC MICROWAVE OSCILLATOR

A. V. Ponomarev^{a,*} and D. K. Ul'yanov^{a,**}

^a Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: aponomarev68@gmail.com

**e-mail: ulyanov@fpl.gpi.ru

The method for determining the absolute plasma density in sources that create plasma in the strong magnetic field using the electron beam has been developed and tested. The results of plasma density measurements in the source of tubular plasma used in research on plasma relativistic microwave electronics are presented. It was shown that at time of switching-on plasma maser, for discharge currents of 5, 9, and 20 A, the plasma densities were $(3 \pm 0.3) \times 10^{12}$, $(5.5 \pm 0.6) \times 10^{12}$, and $(9.5 \pm 1) \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, respectively. Comparison with the probe measurements previously performed, as well as with the numerical calculations made using the KARAT code, showed good agreement between the results of microwave measurements and numerical calculations, while the measurement error did not exceed 15%. The results of probe measurements much stronger deviate from the results of microwave measurements, which is associated with the presence of the strong magnetic field in the plasma source.

Keywords: tubular plasma, magnetic field, microwave measurements, Langmuir probe, plasma density, below cutoff waveguide, plasma maser