

## ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ИСТОЧНИКЕ ТРУБЧАТОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ

© 2023 г. А. В. Пономарев<sup>а,\*</sup>, Д. К. Ульянов<sup>а,\*\*</sup>

<sup>а</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: [aronomarev68@gmail.com](mailto:aronomarev68@gmail.com)

\*\*e-mail: [ulyanov@fpl.gpi.ru](mailto:ulyanov@fpl.gpi.ru)

Поступила в редакцию 23.11.2022 г.

После доработки 27.01.2023 г.

Принята к публикации 29.01.2023 г.

Представлены результаты зондовых измерений параметров плазмы в источнике трубчатой плазмы, который применяется в исследованиях по плазменной релятивистской СВЧ-электронике. Трубчатая плазма создается в результате ионизации фонового газа пучком электронов, эмитируемых кольцевым накаливаемым вольфрамовым катодом в аксиальном магнитном поле. Получены вольтамперные характеристики зонда для трех токов разряда 5, 9 и 20 А при трех длинах плазменного столба 10, 20 и 30 см. Показано, что для всех токов разряда и при всех длинах температура электронов в момент проведения измерений времени равна 20 эВ. Показано также, что концентрация плазмы в данном источнике не зависит от длины плазменного столба в диапазоне длин от 10 до 30 см. Продемонстрирована линейная зависимость между током разряда и зондовым током, что позволяет контролировать относительное изменение концентрации плазмы в течение эксперимента. Оценка абсолютного значения концентрации плазмы для разных токов разряда дала значения  $10^{12}$ – $10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

**Ключевые слова:** зондовые измерения, плазма в магнитном поле, трубчатая плазма, плазменный мазер

**DOI:** 10.31857/S0367292122601485, **EDN:** WXNAGB

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальная плазменная релятивистская электроника берет начало с работы [1], в которой впервые была показана возможность перестройки частоты выходного СВЧ-излучения при изменении плотности плазмы на уровне мощности 100 МВт. Дальнейшие исследования позволили создать плазменный мазер с электронной перестройкой частоты излучения от 4 до 28 ГГц от импульса к импульсу [2], мазер с перестройкой средней частоты спектра СВЧ-излучения в течение одного импульса [3, 4]. Продемонстрирована возможность получения узкого и широкого спектра излучения [5] и генерации СВЧ-импульсов с частотой 50 Гц и с перестройкой частоты излучения от 3 до 12 ГГц [6]. Также были созданы усилители внешнего монохроматического сигнала [7–9] и сверхширокополосные усилители шума [10, 11].

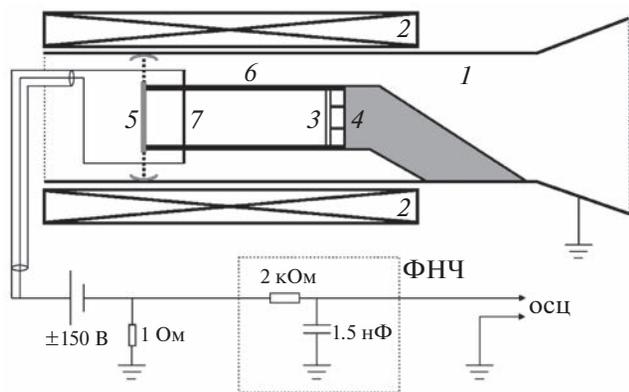
Работа всех этих приборов основана на взаимодействии релятивистского электронного пучка с медленной волной плазменного волновода, поэтому методика создания плазмы и знание ее параметров крайне важны для понимания процессов, происходящих в плазменных мазерах и совершенствовании их работы. Плазма в этих приборах создается заранее, в результате плазменно-пучкового разряда при ионизации газа низковольтным электронным пучком, эмитируемым кольцевым

накаливаемым вольфрамовым катодом в аксиальном магнитном поле, первое описание которого приведено в 1997 г. [12]. С тех пор была произведена значительная модернизация этого источника – изменен термокотод (листовой вместо проволочного, позволяющий проще менять толщину плазменной трубки), изменены средний диаметр (37 мм вместо 21 мм) и толщина плазменной трубки (2 мм вместо 0.8 мм), создающий плазму пучок осаждается на плоский, а не конусный коллектор. Кроме того, в большинстве экспериментов теперь используется меньшее ведущее магнитное поле (1 Тл вместо 1.7 Тл), а в качестве рабочего газа может быть как воздух, так и ксенон.

Эти изменения привели к невозможности использования результатов работы [12] для калибровки плотности плазмы, и необходимости нового измерения параметров источника плазмы. В данной работе представлены результаты исследования параметров трубчатой плазмы с помощью зондовых измерений в источнике трубчатой плазмы, который используется в плазменном мазере [13].

### 2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

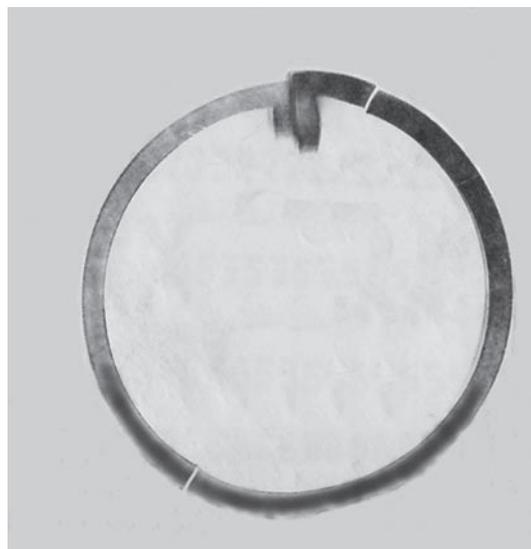
Схема установки показана на рис. 1. Плазма создается в цилиндрическом волноводе  $l$  диаметром 60 мм при давлении воздуха  $8.6 \times 10^{-2}$  Па ( $6.5 \times 10^{-4}$  Торр), который помещен внутрь соле-



**Рис. 1.** Схема установки: 1 – волновод, 2 – соленоид, 3 – термокатод, 4 – электрод-держатель, 5 – подвижный коллектор, 6 – трубчатая плазма, 7 – зонд.

ноида 2, создающего продольное магнитное поле 1 Тл. В правой части установки находится кольцевой термокатод 3, изготовленный из листового вольфрама. В момент запуска на него подается импульсный ток накала, длительностью 2 с, раскаляющий его до температуры около 3000 К. После этого на термокатод подается прямоугольный отрицательный относительно волновода 1 импульс напряжения амплитудой 500 В и длительностью 160 мкс. В результате образуется трубчатый электронный пучок, распространяющийся вдоль линий индукции магнитного поля как вправо, к внутреннему электроду 4 выходного коаксиального волновода, так и влево, к подвижному коллектору 5, электрически соединенному с волноводом 1. Этот электронный пучок, распространяясь в разреженном воздухе ионизирует его и создает трубчатую плазму 6 с внутренним и внешним диаметрами 35 и 39 мм соответственно. Отпечаток пучка на термобумаге, закрепленной на коллекторе 5 перпендикулярно оси волновода, приведен на рис. 2. Концентрация создаваемой плазмы может меняться от импульса к импульсу путем изменения температуры термокатаода 3, которая, в свою очередь, определяется током накала. Длина столба плазмы также может меняться от 5 до 37 см за счет изменения положения подвижного коллектора 5. Полный ток, идущий через плазму между термокатодом 3 и волноводом 1, мы называем током разряда. В этой работе будет показано, что ток разряда однозначно и линейно связан с концентрацией плазмы.

Справа от подвижного коллектора 5 на расстоянии 15 мм от него по диаметру волновода установлен одиночный прокаливаемый зонд из нихромовой проволоки диаметром 0.18 мм – 7. Конструкция установки позволяет перемещать зонд одновременно с коллектором 5, сохраняя их относительное положение неизменным. Зонд соединен с центральной жилой и оплеткой изолированного коаксиального кабеля, через который сигнал выводится из вакуумной части наружу. В



**Рис. 2.** Отпечаток электронного пучка, создаваемого кольцевым ленточным катодом, на термобумаге, закрепленной перпендикулярно оси волновода. Тонкая светлая линия, пересекающая в двух местах отпечаток термокатаода, – тень от проволочного зонда.

режиме прокаливания (не показано на рис. 1) между оплеткой и центральной жилой кабеля на зонд в вакууме ( $4 \times 10^{-3}$  Па) подавалась мощность 3.7 Вт (3.4 В, 1.1 А) в течение 1 мин, приводящая к его покраснению. Эффективность прокаливания контролировалась по ухудшению вакуума в установке. В режиме измерений оплетка снаружи соединялась с центральным проводником, как показано на рис. 1. В этом режиме два конца зонда соединялись вместе и через не заземленный регулируемый источник постоянного напряжения (до 150 В обеих полярностей) и резистор 1 Ом замыкались на землю. Сигнал с резистора через фильтр низкой частоты (ФНЧ), назначение которого будет показано в дальнейшем, подавался на осциллограф.

### 3. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ЛЕНГМЮРА

Как известно [14, 15] для применения теории Ленгмюра необходимо, чтобы длины свободного пробега электронов и ионов были много больше как размеров зонда, так и дебаевского радиуса. В нашем случае диаметр зонда  $d = 0.18$  мм, длина свободного пробега электронов  $\lambda_e \approx 10^{-1}/p$ , Торр  $\approx 100$  см, ионов  $\lambda_i \approx 10^{-2}/p$ , Торр  $\approx 10$  см ( $p$  – давление газа), а дебаевский радиус  $r_D = 30$  мкм для характерной концентрации электронов  $10^{12}$  см $^{-3}$  и температуры электронов 20 эВ. Поэтому  $\lambda_e, \lambda_i \gg d$ ,  $\lambda_e, \lambda_i \gg r_D$ , и условия Ленгмюра выполнены. Кроме того,  $d \gg r_D$  и слой пространственного заряда вблизи зонда можно считать “беско-

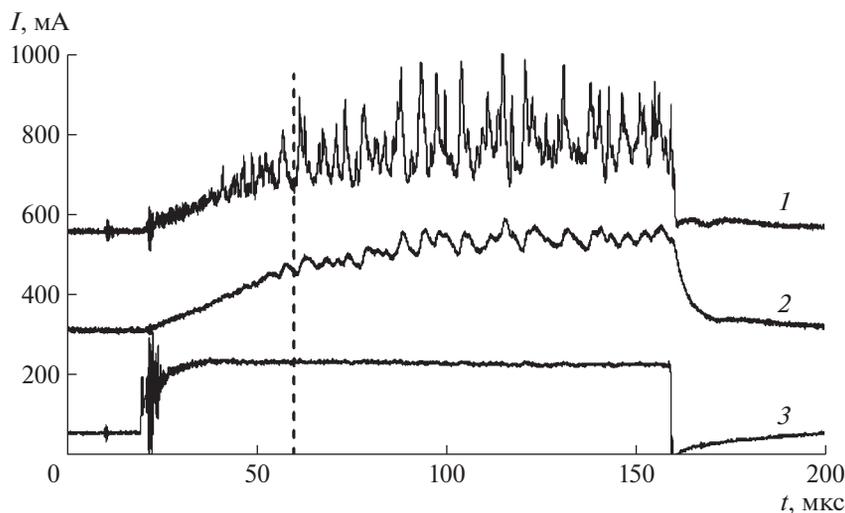


Рис. 3. Осциллограммы инвертированного зондового тока без ФНЧ — 1, с ФНЧ — 2, и тока разряда — 3. Штриховой линией показан момент измерения. Ток разряда 5 А, напряжение смещения 0 В, длина плазмы 20 см.

нечно тонким”, что позволяет существенно упростить применяемые формулы.

С другой стороны в нашем случае плазма находится в сильном магнитном поле, которое не учитывается в стандартной теории Ленгмюра. Ларморовский радиус равен  $\rho_{Le} = 15$  мкм для электронов и  $\rho_{Li} = 120$  мкм для ионов (магнитное поле 1 Тл, температура электронов 20 эВ, температура ионов 300 К, газ — воздух), поэтому  $\rho_{Le} \ll d$ ,  $\rho_{Li} \approx d$ , и влиянием магнитного поля в этом случае пренебречь нельзя. Это приводит к тому, что полученные значения концентрации плазмы будут приблизительными, причем значения, полученные из электронной и ионной ветвей ВАХ будут различаться (магнитное поле уменьшает электронный ток насыщения по сравнению с его значением без поля [14]). Однако относительные измерения (зависимость тока зонда от тока разряда в данный момент времени) и значение электронной температуры определяются правильно.

#### 4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились следующим образом. Подготовка установки: устанавливалась необходимая длина плазменного столба путем установки подвижного коллектора 5 в необходимое положение, система откачивалась до давления  $4 \times 10^{-3}$  Па, производилось прокаливание зонда, с помощью натекаателя устанавливалось рабочее давление  $8.6 \times 10^{-2}$  Па воздуха. Проведение измерений: с помощью регулируемого источника напряжения устанавливалось необходимое напряжение на зонде, создавалась плазма, ток с зонда шел через резистор 1 Ом на землю, а напряжение на резисторе регистрировалось осциллографом. После этого изменялось напряжение на зонде и измерение повторялось. Таким образом, при сня-

тии вольтамперной характеристики (ВАХ) использовались разные импульсы создания плазмы. Это оказалось возможным благодаря хорошей повторяемости зондового тока от импульса к импульсу при одинаковом напряжении на зонде.

Необходимость ФНЧ обусловлена сильными колебаниями зондового тока с периодом 3–7 мкс, связанными, как было показано в [12] с колебаниями концентрации плазмы. На рис. 3 показаны осциллограммы инвертированного зондового тока без ФНЧ (1), с ФНЧ (2), и тока разряда (3).

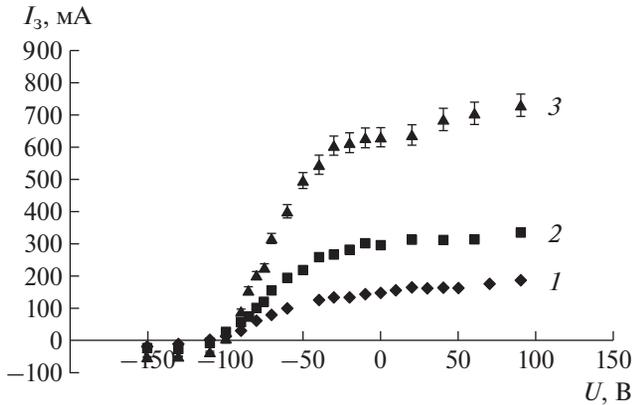
#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения ВАХ и величины тока разряда производились в момент времени 40 мкс с момента подачи импульса отрицательного напряжения на термокатод (60 мкс на рис. 3, отмечено штриховой линией), также, как и в работе [13]. Вольтамперные характеристики зонда для трех токов разряда 5, 9 и 20 А приведены на рис. 4.

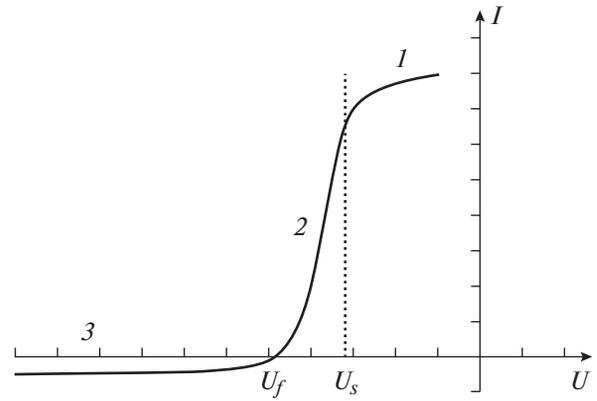
Напомним, что теоретическая ВАХ одиночного зонда имеет следующий вид [14], рис 5.

Сравнение рис. 4 и 5 показывает, что для всех трех токов разряда плавающий потенциал равен  $-110$  В, а потенциал пространства равен  $-60$  В. Ток на зонд оказался с хорошей степенью точности пропорционален току разряда как в области электронного насыщения (область 1, рис. 5), так и в области ионного насыщения (область 3, рис. 5). Более подробно эта зависимость будет представлена ниже.

Определение температуры электронов в сильном магнитном поле затруднено в силу отсутствия теории зондов для быстрорастущей части ВАХ (область 2, рис. 5). Однако, как отмечено в [15], некоторые качественные соображения и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что, по-видимому, во многих случаях элек-



**Рис. 4.** Вольтамперные характеристики зонда для трех токов разряда: 5 А – 1, 9 А – 2, 20 А – 3. Длина плазмы 20 см. Горизонтальная погрешность меньше размера точки, вертикальная погрешность указана на графике 3. Для графиков 1 и 2 она пропорционально меньше.

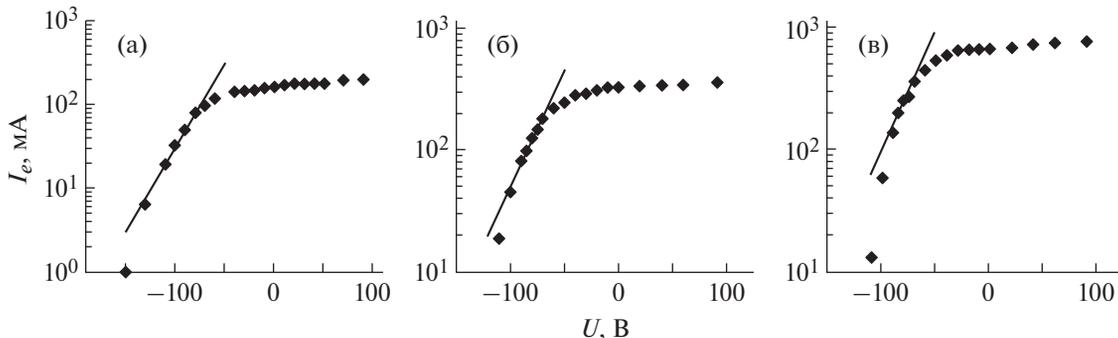


**Рис. 5.** Теоретическая ВАХ одиночного зонда: 1 – электронный ток насыщения, 2 – суммарный ток электронов и ионов, 3 – ионный ток насыщения;  $U_f$  – плавающий потенциал,  $U_s$  – потенциал пространства.

тронная температура может быть оценена здесь стандартным способом. Одно из основных соображений в пользу такого вывода заключается в том, что при отрицательном потенциале собирание электронов зондом резко уменьшается. Поэтому обеднение плазмы электронами вдоль силовых линий поля становится не очень большим. В связи с этим сбор электронов из этой зоны должен происходить в соответствии с обычным экспоненциальным законом. Поэтому для оценки температуры электронов использовался стандартный способ: вычислялась ионная ветвь характеристики, которая потом вычиталась из полной ВАХ [14]. Получающаяся электронная ветвь ВАХ  $I_e$  представлена на рис. 6 в полулогарифмическом масштабе.

Зависимость  $I_e(U)$  с логарифмическим масштабом по  $I_e$  согласно классической теории Ленгмюра должна быть прямолинейной до потенциала пространства, наклон которой (логарифмическая производная тока по потенциалу зонда) и отражает величину температуры:

$$\frac{1}{T_e} = -\frac{k}{e} \frac{d \ln I_e}{dU}. \quad (1)$$

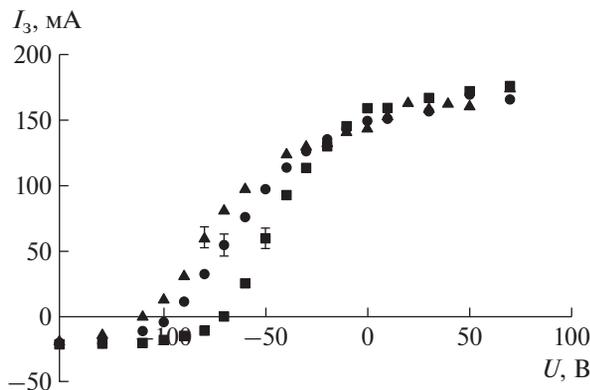


**Рис. 6.** Электронная ветвь ВАХ зонда в полулогарифмическом масштабе для трех токов разряда: 5 А (а), 9 А (б), 20 А (в). Прямая линия – аппроксимация графика в области ниже потенциала пространства. Длина плазмы 20 см.

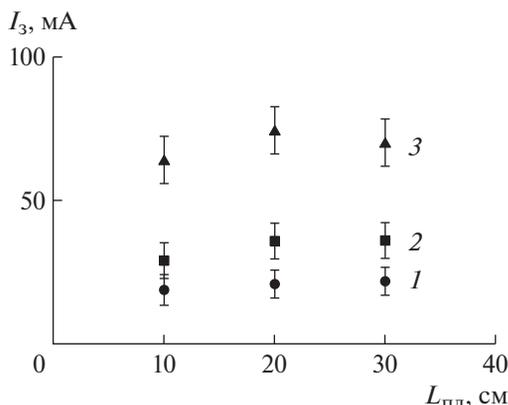
Здесь  $k$  – постоянная Больцмана,  $e$  – заряд электрона,  $T_e$  – температура электронов. Прямые линии на рис. 6 являются аппроксимацией графиков в области ниже потенциала пространства. Температура электронов плазмы определялась по наклону аппроксимирующих прямых на рис. 6 согласно формуле (1). Измерения показали, что для всех токов разряда температура электронов в момент проведения измерений равна 20 эВ.

В работе [13] измерялись параметры плазменного СВЧ-генератора при различных длинах плазменного столба. При этом предполагалось, что концентрация плазмы не зависит от ее длины. В настоящей работе это предположение было экспериментально проверено. Для этого были измерены ВАХ зонда при различных длинах плазменного столба. На рис. 7 представлены ВАХ зонда для трех длин плазмы 10, 20 и 30 см при токе разряда 5 А.

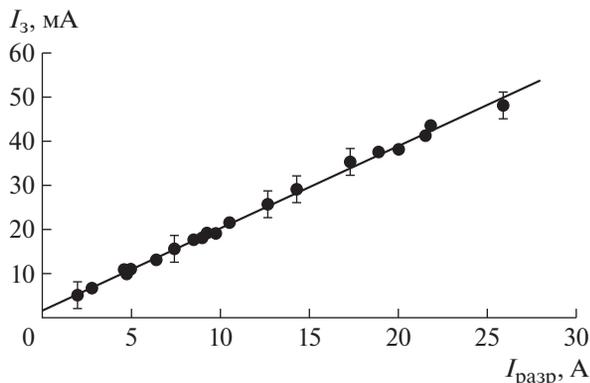
Из рис. 7 видно, что увеличение длины плазмы приводит к уменьшению абсолютной величины как плавающего потенциала, так и потенциала пространства, что объяснимо, так как при этом уменьшается падение напряжения на единицу длины. Важно то, что зондовый ток в области на-



**Рис. 7.** Вольтамперные характеристики зонда для трех длин плазменного столба: 10 см (левая кривая), 20 см (средняя кривая) и 30 см (правая кривая). Горизонтальная погрешность меньше размера точки, вертикальная погрешность указана на графике для одной точки. Ток разряда 5 А.



**Рис. 8.** Зависимость зондового тока в области ионного насыщения ( $U = -150$  В) от длины плазмы для трех значений тока разряда: 5 А (1), 9 А (2) и 20 А (3).



**Рис. 9.** Зависимость зондового тока в области ионного насыщения ( $U = -150$  В) от тока разряда. Длина плазмы 20 см. Горизонтальная погрешность меньше размера точки, характерная величина вертикальной погрешности указана на графике для нескольких точек.

сыщения (как электронного при  $U > -20$  В, так и ионного при  $U < -120$  В) не зависит от длины плазменного столба. Это доказывает тот факт,

что, как и предполагалось в работе [13] концентрация плазмы в данном источнике не зависит от ее длины. Также с изменением длины не меняется и температура электронов. Обработка ВАХ, аналогичная описанной выше, приводит к тому же значению температуры электронов 20 эВ.

На рис. 8 показана зависимость ионного тока насыщения зонда от длины плазмы для трех значений тока разряда: 5, 9 и 20 А. С учетом погрешности измерений можно заключить, что зондовый ток, а, следовательно, и концентрация плазмы, не меняется при изменении длины плазменного столба. Аналогичный вывод получается и в случае рассмотрения зондового тока в области электронного насыщения.

В данной работе была подтверждена возможность использования тока разряда для определения плотности плазмы в относительных единицах. На рис. 9 показана зависимость между зондовым током и током разряда для длины плазмы 20 см и области ионного насыщения. Видно, что эта зависимость линейная с хорошей точностью.

Абсолютное значение концентрации плазмы оценивалось как по электронному току на зонд  $I_e$  при потенциале пространства  $U_s$  ( $U_s = -60$  В) [15]

$$n_0, \text{ см}^{-3} = \frac{3.7 \times 10^8 I_e(U_s), \text{ мА}}{S, \text{ см}^2 T_e^{1/2}, \text{ эВ}},$$

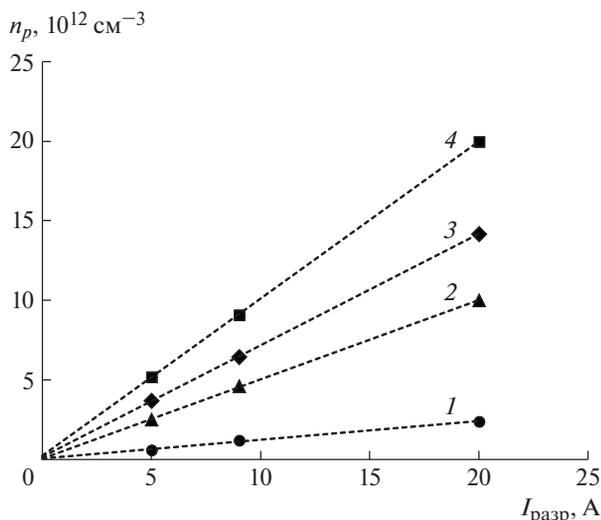
где  $n_0$  — концентрация плазмы,  $S$  — площадь зонда,  $T_e$  — температура электронов; так и по ионному току насыщения  $I_{+\infty}$  ( $U = -150$  В) [15]

$$n_0, \text{ см}^{-3} = 10^{10} \frac{A^{1/2} I_{+\infty}, \text{ мА}}{S, \text{ см}^2 T_e^{1/2}, \text{ эВ}},$$

где  $A$  — атомная масса иона.

Вопрос, какую массу иона брать, непростой, так как помимо ионов  $\text{O}_2^+$  и  $\text{N}_2^+$  с близкими массами возможно существование ионов  $\text{O}^+$  и  $\text{N}^+$  с массами в два раза меньше. Для оценки мы взяли два предельных случая: отсутствие диссоциации (только  $\text{O}_2^+$  и  $\text{N}_2^+$ ), тогда  $A = 29$ , и полная диссоциация (только  $\text{O}^+$  и  $\text{N}^+$ ),  $A = 14.5$ . Реальная ситуация должна лежать между этими двумя случаями.

Как было отмечено выше, определение абсолютного значения концентрации плазмы из зондовых измерений в присутствии сильного магнитного поля имеет малую достоверность, поэтому были также проведены численные расчеты кодом КАРАТ. В них моделировалась работа плазменного мазера [13], геометрия которого полностью совпадает с рассмотренной в данной работе. В работе [13] было показано, что изменение тока разряда приводит к изменению частоты выходного СВЧ-излучения, причем токам разряда 5, 9 и 20 А соответствуют частоты 4, 6 и 12 ГГц. При моделировании подбиралось такое значение концентрации плазмы, при котором расчетная частота излучения совпадала с экспериментально



**Рис. 10.** Зависимость концентрации плазмы, определенной разными методами от тока разряда: 1 – по электронному току при потенциале пространства, 2 – расчет, 3 – по ионному току насыщения в предположении полной диссоциации, 4 – по ионному току насыщения в предположении отсутствия диссоциации. Штриховые линии – линейная аппроксимация. Длина плазмы 20 см.

измеренной. Это позволило связать отдельные значения тока разряда (5, 9 и 20 А) с расчетными значениями концентрации плазмы. Результаты оценок и расчета сведены на рис 10.

Из рис. 10 следует, что, как и было отмечено в [14], значения концентрации плазмы, определенные по электронному току, оказываются заниженными, в то время как значения концентрации плазмы, определенные по ионному току, выше рассчитанной, даже в предположении полной диссоциации. Последнее, по-видимому, связано с тем, что для ионов роль поверхности, собирающей частицы, играет не поверхность зонда, а поверхность большего радиуса, лежащая в квазинейтральной области. Для получения точного значения плотности плазмы планируется проведение измерений концентрации плазмы СВЧ методом. Отметим также, что во всех трех случаях концентрация плазмы растет пропорционально росту тока разряда, причем аппроксимирующие прямые сходятся в нуле, поэтому относительные измерения можно делать как по электронной, так и по ионной ветви.

### 6. ВЫВОДЫ

В данной работе представлены результаты зондовых измерений в источнике трубчатой плазмы, используемом в плазменных лазерах [10, 13, 16]. Были получены вольтамперные характеристики зонда для трех токов разряда 5, 9 и 20 А при длине плазмы 20 см. Было показано, что для всех трех токов разряда плавающий потенциал равен  $-110$  В, а потенциал пространства равен  $-60$  В. Использование стандартной методики обработки вольтамперных характеристик показало, что для

всех токов разряда температура электронов в момент проведения измерений равна 20 эВ. Также были проведены измерения при длинах плазменного столба 10 и 30 см, и показано, что как концентрация плазмы, так и температура электронов в данном источнике не зависит от ее длины.

Была продемонстрирована линейная зависимость между легко измеряемым в экспериментах по исследованию плазменного лазера током разряда и зондовым током, что позволяет оценить реальное значение концентрации плазмы по полученному в эксперименте относительному значению в амперах (по току разряда). Оценка абсолютного значения концентрации плазмы дало значения в диапазоне  $10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . Более точное измерение требует применение других методов, например СВЧ-метода.

Авторы выражают благодарность П.С. Стрелкову и И.Е. Иванову за многочисленные полезные обсуждения, а также В.П. Тараканову за проведение расчетов кодом КАРАТ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузев М.В., Мухаметзянов Ф.Х., Рабинович М.С., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. С. 1358.
2. Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. С. 329.
3. Лоза О.Т., Ульянов Д.К., Баранов Р.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. С. 98.
4. Ульянов Д.К., Баранов Р.В., Лоза О.Т., Ернылева С.Е., Богданкевич И.Л. // ЖТФ. 2013. Т. 83. С. 113.
5. Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. С. 748.
6. Лоза О.Т., Ульянов Д.К., Стрелков П.С., Иванов И.Е., Баранов Р.В. // Кр. сообщения по физике. ФИАН. 2011. Т. 38. С. 47.
7. Пономарев А.В., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. С. 633.
8. Пономарев А.В., Стрелков П.С. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. С. 66.
9. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Диас Михайлова Е.Д., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 257.
10. Стрелков П.С., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42 (7). С. 644. <https://doi.org/10.7868/S0367292116070106>
11. Стрелков П.С., Тараканов В.П., Диас Михайлова Д.Е., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 335.
12. Лоза О.Т., Пономарев А.В., Стрелков П.С., Ульянов Д.К., Шкварунец А.Г. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. С. 222.
13. Buleyko A.V., Ponomarev A.V., Loza O.T., Ulyanov D.K., Sharypov K.A., Shunailov S.A., Yalandin M.I. // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. P. 023304. <https://doi.org/10.1063/5.0031432>
14. Чен Ф. // Диагностика плазмы / Ред. Р. Хаддлстон, С. Леонард. М.: Мир, 1967.
15. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.
16. 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. С. 926. <https://doi.org/10.1134/S1063780X08100061>