

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.9.07

СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ТОКАМАКА МИФИСТ-0
С ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

©2026 г. Е. А. Веницкий^{a,b,*}, А. С. Дрозд^b, И. И. Пашков^a, А. Басак^a,
С. А. Сапронов^a, С. А. Крат^a

^a *Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”*

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

^b *Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”*

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

**e-mail: egor.vinitsky@gmail.com*

Поступила в редакцию 23.10.2025 г.

После доработки 12.02.2026 г.

Принята к публикации 19.02. 2026 г.

Работа посвящена описанию устройства СВЧ-интерферометра токамака МИФИСТ-0, а также системе сбора и обработки его данных. Приведены примеры временной эволюции линейной электронной плотности в разрядах МИФИСТ-0. Представлено сравнение использования фазометра на детекторах AD8302 и цифровой постобработки сигналов интерферометра. Проведены расчеты рефракции лучей в камере МИФИСТ-0 и оценка возможности зондирования плазмы СВЧ-интерферометром для однопроходной и двухпроходной конфигураций. Показано, что переход к однопроходному зондированию плазмы позволяет значительно расширить верхний предел измеряемой плотности (до величины $n_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$).

1. ВВЕДЕНИЕ

Электронная плотность плазмы является одним из основных параметров при исследовании горячей плазмы на термоядерных установках. Величина плотности плазмы входит в выражение мощности термоядерного выхода $P_{fus} \sim n^2$ [1] и ограничена пределами Гринвальда и Мураками [2].

Интерферометры традиционно используются для измерения электронной плотности плазмы на плазменных установках. При зондировании на обыкновенной волне при соблюдении условия $\omega \gg \omega_p$, где ω – частота зондирующей электромагнитной волны, ω_p – ленгмюровская

(плазменная частота), дополнительный набег фазы электромагнитной волны, прошедшей через плазму, можно считать пропорциональным линейной электронной плотности плазмы [3]:

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda e^2}{4\pi m_e \epsilon_0 c^2} \int_0^L n_e(l) dl, \quad (1)$$

где λ – длина зондирующей электромагнитной волны, e – классический заряд электрона, m_e – классическая масса электрона, ϵ_0 – электрическая постоянная, c – скорость света, n_e – электронная плотность. Интегрирование проводится вдоль направления распространения волны.

В качестве источников излучения используются как лазерные источники, например HCN [4], DCN [5], CO₂ [6], так и СВЧ-источники с длинами волн в миллиметровом [7, 8] и субмиллиметровом [9, 10] диапазонах. Выбор длины волны интерферометра определяется физическими ограничениями на возможность зондирования плазмы и желаемой точностью в проводимых измерениях. Ограничениями являются критическая электронная плотность плазмы для зондирующей длины волны λ [3],

$$n_c = \frac{4\pi^2 c^2 \epsilon_0 m_e}{\lambda^2 e^2}, \quad (2)$$

и рефракция электромагнитных волн в плазме [11]. Также вклад в измерения вносят вибрации элементов вакуумной камеры и оптических трактов:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L, \quad (3)$$

где ΔL – изменение оптического пути. При учете выражения (1) вибрации дают вклад в измерение линейной плотности, пропорциональный квадрату используемой длины волны.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Токамак МИФИСТ-0 представляет собой малый сферический токамак со следующими параметрами [12]:

- большой радиус, $R = 25$ см,
- малый радиус, $a = 13$ см,
- аспектное отношение, $R/a = 1.9$,
- тороидальное поле на оси, $B_T = 0.1$ Тл.

Токамак предназначен как для проведения исследований в области физики плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью, так и для подготовки кадров в области управляемого термоядерного синтеза.

На установке функционирует СВЧ-интерферометр с рабочей длиной волны $\lambda = 3.19$ мм. Блок-схема интерферометра представлена на рис. 1. Зондирование проводится в

горизонтальном направлении через экваториальный патрубок с отражением от внутренней стенки установки. СВЧ-интерферометр является гетеродинным, т. е. с переносом измерений на промежуточную частоту (ПЧ). Это позволяет избежать низкочастотных наводок на измеряемую величину и амплитудных эффектов, поскольку анализируется не напряжение выходного сигнала интерферометра, а его фаза. Промежуточная частота создается за счет работы по принципу FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave), который наиболее активно применяется в рефлектометрии плазмы [13].

Рис. 1. Блок схема СВЧ-интерферометра токамака МИФИСТ-0

Генератор, управляемый напряжением (ГУН), создает сигнал с частотой, пропорциональной подаваемому на него напряжению управляющего сигнала. Управляющий сигнал имеет пилообразную форму, т. е. частота генерируемого ГУН сигнала линейно растет со временем за исключением моментов скачкообразного изменения управляющего сигнала. Сигнал от ГУН усиливается по мощности, а затем умножается в 13 раз по частоте, достигая СВЧ-диапазона. Далее он делится на зондирующее и опорное плечи. Опорное плечо по короткому участку волновода WR-10 поступает в смеситель, а зондирующее проходит через сверхразмерный лучевод ($d = 38 \text{ мм} \gg \lambda$) и вакуумную камеру установки. За счет разности в длине опорного и зондирующего плечей в смеситель поступают волны, сгенерированные ГУН в различные моменты времени, т. е. волны с разными частотами. Разность частот можно приближенно вычислить по формуле

$$f_{\text{ПЧ}} = \frac{\Delta F}{T} \tau = k \Delta U f_{\text{ген}} \frac{2\Delta L}{c}, \quad (4)$$

где ΔF – разность между верхней и нижней частотами ГУН для данных параметров пилообразного сигнала, T – период управляющего сигнала, τ – задержка между волнами в опорном и зондирующем плечах. Это же выражение можно представить с использованием величины k – отношения частоты к управляющему напряжению ГУН ($k \sim 0.6 \text{ ГГц/В}$); $f_{\text{ген}}$ – частота пилообразного сигнала, ΔL – длина волновода + расстояние между стенками вакуумной камеры, c – скорость света.

Из принципа работы FMCW известно, что частоты $f_{\text{ПЧ}}$ и $f_{\text{ген}}$ должны быть кратны, что накладывает ограничения на остальные изменяемые в выражении величины. При проведении измерений СВЧ-интерферометром токамака МИФИСТ-0 в основном используется кратность $f_{\text{ПЧ}} : f_{\text{ген}} = 1:1$, $f_{\text{ПЧ}} \sim 3 \text{ МГц}$.

Ввод излучения в вакуумную камеру осуществляется через фланец-окно из фторопласта, скошенного под углом 45° для рассеивания отраженной волны и предотвращения ее отражения обратно в лучевод. В настоящий момент основным ограничением при проведении измерений СВЧ-интерферометром является малая мощность волны, отражающейся от цилиндрической

внутренней стенки установки, которая дополнительно уменьшается из-за рефракции волн в плазме. В дальнейшем рассматривается вариант с установкой зеркала со стороны внутренней стенки для увеличения мощности регистрируемого сигнала.

3. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Для регистрации и обработки сигналов СВЧ-интерферометра используется генератор сигналов RIGOL DG-4062. Генератор создает два сигнала: пилообразный сигнал управления ГУН и синусоидальный, используемый в качестве референсного для измерения дополнительного набега фазы сигнала промежуточной частоты, несущего информацию об электронной плотности плазмы. Блок-схема системы регистрации и обработки сигналов представлена на рис. 2.

Рис. 2. Блок-схема системы регистрации и обработки данных

Разность фаз между сигналом промежуточной частоты и референсным сигналом измеряется в результате их прямой оцифровки и восстановления фазы с помощью преобразования Гильберта [14]. Предварительно оцифрованные сигналы фильтруются в полосе для уменьшения шума и, как следствие, возможных перескоков фазы. Также для обработки сигналов тестировался фазометр, аналогичный описанному в работе [15]. Возможность применения фазометра в данный момент ограничена из-за требования фильтрации сигнала промежуточной частоты в очень узкой полосе (примерно 10 кГц) с периодической подстройкой этой частоты, что удобнее делать при помощи постобработки.

Для автоматизации работы СВЧ-интерферометра написана программа в среде LabView. В программе реализованы следующие возможности:

- загрузка конфигураций настроек осциллографа и генератора сигналов через ASCII-команды, т. е. автоматическая подготовка СВЧ-интерферометра к проведению измерений;
- запись данных с осциллографа после завершения записи данных, инициализируемой общим триггером старта для систем токамака МИФИСТ-0;
- обработка данных с фильтрацией и применением преобразования Гильберта для восстановления значений набега фазы и линейной электронной плотности плазмы.

Программа позволяет автоматизировать регистрацию и обработку данных с СВЧ-интерферометра, а также проводить его настройку. СВЧ-интерферометр подключен к общей системе управления и сбора данных [16] токамака МИФИСТ-0.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Примеры измерения линейной электронной плотности в разрядах токамака МИФИСТ-0 представлены на рис. 3. На графиках также представлен ток плазмы в выбранных разрядах. Линейный размер плазмы в представленных импульсах достигал значения $l = 10$ см. Сигнал промежуточной частоты фильтровался в полосе $\Delta f \sim 10$ кГц, следствием чего являлось низкое временное разрешение в данных о плотности. Тем не менее СВЧ-интерферометр позволил зарегистрировать плотность в разряде длительностью несколько десятых миллисекунд. Уровень шума в отсутствие плазмы составляет несколько единиц 10^{15} м^{-2} , он значительно возрастает при образовании плазменного шнура из-за влияния рефракции.

Рис. 3. Восстановленная линейная плотности и ток плазмы в импульсах МИФИСТ-0

Более наглядно этот эффект можно рассмотреть на примере плазменного импульса, представленного на рис. 4. На графике временного развития амплитуды сигнала промежуточной частоты, отражающего мощность зондирующей плазму волны, видно, что сигнал пропадал в момент времени $t \approx 0.75$ мс, что приводило к перескокам фазы, заметным на временном развитии линейной плотности. При этом видно, что в процессе разряда амплитуда сигнала как уменьшалась, так и увеличивалась, что связано с движением плазменного шнура относительно линии зондирования СВЧ-интерферометра.

Рис 4. Осциллограммы линейной плотности и амплитуды сигнала промежуточной частоты в импульсе с перескоком фазы

Примеры сравнения данных с фазометра [15], основанного на детекторах AD8302, с данными постобработки представлены на рис. 5, где показаны восстановленная линейная плотность по фазометру, детектору AD8302 (является частью фазометра) и при постобработке. Видно, что ходы плотности по фазометру и постобработке повторяют друг друга. Различие в сигнале фазометра связано с неидеальностью его настройки, включающей точность поворота сигнала на 90° . Тем не менее даже в таких условиях ошибка измерения фазы фазометром составляет в пересчете на линейную плотность плазмы менее 10^{16} м^{-2} , что является очень малой величиной в сравнении с величинами электронной плотности в токамаках.

Рис. 5. Сравнение данных, полученных с использованием фазометра ...

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА МИФИСТ-0 СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ

Результаты измерений СВЧ-интерферометром показали необходимость увеличения мощности зондирующей волны, принимаемой из вакуумной камеры. Этого можно добиться различными способами:

- установкой зеркала для отражения волны от внутренней части установки с меньшей потерей мощности излучения,
- переходом к однопроходному зондированию плазмы.

Первый вариант легче реализуем в условиях вакуумной камеры токамака МИФИСТ-0, где имеются только экваториальные патрубки и где однопроходное зондирование потребовало бы прокладки волноводов внутри вакуумной камеры. Однако даже при значительном уменьшении потерь мощности на отражение рефракция все равно останется главным ограничением на возможность измерения плотности плазмы СВЧ-интерферометром.

Чтобы оценить возможные значения электронной плотности плазмы, которую можно измерять, мы провели численные расчеты, связанные с трассировкой лучей в вакуумной камере токамака МИФИСТ-0. Эффект рефракции описывается следующим выражением [17]

$$\frac{1}{R} = \mathbf{N} \cdot \frac{\nabla \mu}{\mu}, \quad (5)$$

где R – радиус кривизны траектории, N – нормаль к траектории, μ – показатель преломления. В расчетах использовался параболический профиль электронной концентрации по сечению шнура. Результаты расчетов приведены для трех значений электронной плотности: $n_0 = 5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ – типичное значение плотности в разряде МИФИСТ-0 (рис. 3), $n_0 = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ – повышенная плотность, $n_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ – граница возможных измерений для двухпроходного зондирования. Пример трассировки луча представлен на рис. 6. На рисунке видно, что при плотности $n_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ на оси плазменного шнура даже малое смещение плазмы относительно линии зондирования приводит к сильному отклонению зондирующего луча. В случае плотностей, более типичных для токамака МИФИСТ-0, $n_0 = 5 \cdot 10^{18}, 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, влияние рефракции значительно меньше.

Рис. 6. Ход луча в камере МИФИСТ-0 при различных значениях плотности

Чтобы оценить возможности СВЧ-интерферометра МИФИСТ-0 по зондированию плазмы с различной плотностью, мы провели серию расчетов для различных смещений плазменного шнура относительно линии зондирования. Положения и размер плазменного шнура показаны на рис. 7. Размер шнура ограничивался установленным в токамак МИФИСТ-0 лимитером.

Значения смещения зондирующего луча относительно линии зондирования в зависимости от смещения плазменного шнура в вертикальном направлении для разных значений электронной плотности плазмы на оси шнура представлены на рис. 8. Также на графике штриховой красной линией отмечены величины апертуры лучевода $d = 3.8 \text{ см}$, используемого для ввода и приема излучения. При смещении луча на расстояние равное

апертуре лучевода, будут наблюдаться заметные потери мощности излучения, поэтому эта величина использовалась в качестве оценочной.

Видно, что при плотности на оси шнура $n_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ даже малое смещение плазменного шнура в вертикальном направлении сильно влияет на ход зондирующих лучей, препятствуя проведению измерений. При плотности $n_0 = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ зондирование остается возможным при смещении плазменного шнура на 2 см в вертикальном направлении. При типичной плотности плазмы в разряде токамака МИФИСТ-0 измерения возможны при смещении плазменного шнура на 5 см в вертикальном направлении.

Рис. 7. Положение плазменного шнура относительно линии зондирования при двухпроходном зондировании

Рис. 8. Осевое смещение луча в зависимости от смещения плазменного шнура в вертикальном направлении для двухпроходного зондирования

На рис. 6 видно, что больший вклад в отклонение луча играет участок пути после отражения от стенки. Поэтому переход к однопроходному зондированию плазмы должен сильно увеличить возможности СВЧ-интерферометра с точки зрения зондирования плазмы больших плотностей. Для этого также были проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 9, 10. Из результатов следует, что при однопроходном зондировании становится возможным исследовать плазму с плотностями, достигающими величины $n_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Переход к такой конфигурации будет актуален для использования СВЧ-интерферометра на токамаке МИФИСТ-1, вакуумная камера которого оснащена вертикальными патрубками.

Рис. 9. Положение плазменного шнура относительно линии зондирования при однопроходном зондировании

Рис. 10. Осевое смещение луча в зависимости от смещения плазменного шнура в горизонтальном направлении для однопроходного зондирования

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан гетеродинный СВЧ-интерферометр токамака МИФИСТ-0 с рабочей длиной волны $\lambda = 3.19 \text{ мм}$, а также система сбора и обработки его данных. Представлены экспериментальные данные измерения линейной электронной плотности в токамаке МИФИСТ-0, а также сравнение восстановления плотности методом постобработки (с использованием преобразования Гильберта) и фазометром в режиме реального времени. Показано, что в текущей конфигурации зондирования наблюдаются потери мощности волны, принимаемой из вакуумной камеры. Предложены способы уменьшения потерь мощности и проведен расчет тех

значений электронной плотности, которые способен измерять СВЧ-интерферометр, исходя из главного ограничения, связанного с рефракцией электромагнитных волн в плазме. При двухпроходном зондировании СВЧ-интерферометр позволяет измерять линейную плотность до величины $n_0 = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Продемонстрировано, что при однопроходном зондировании плазмы операционные пределы интерферометра расширяются до величины $n_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-15-2025-678 от 26.08.2025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Perkins F.W., Post D.E., Uckan N.A. et al. // Nucl. Fusion. 1999. V. 39. № 12. P. 2627. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/39/12/309>
2. Greenwald M., Terry J.L., Wolfe S.M., Ejima S., Bell M.G., Kaye S.M., Neilson G.H. // Nucl. Fusion. 1988. V. 28. № 12. P. 2199. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/28/12/009>
3. Veron D. Submillimeter interferometry of high-density plasmas. // Infrared Millim. waves. V. 2. New York, 1979. P. 67. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979imw.....2...67V>
4. Gen L.I., Xuechao W.E.I., Haiqing L.I.U. et al. // Plasma Sci. Technol. 2017. V. 19. № 8. P. 84003. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aa667b>
5. Mlynek A., Casali L., Ford O., Eixenberger H., ASDEX Upgrade Team // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. № 11. P. 408. <https://doi.org/10.1063/1.4890574>
6. Mlynek A., Pautasso G., Maraschek M., Eixenberger H., ASDEX Upgrade Team. // Fusion Sci. Technol. 2012. V. 61. № 4. P. 290. <https://doi.org/10.13182/FST12-A13582>
7. Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Диас-Михайлова Д.Е., Дрозд А.С., Жильцов В.А., Сергеев Д.С., Сухов А.Е., Хайрутдинов Э.Н. // ПТЭ. 2024. №2. С. 70. <https://doi.org/10.31857/S0032816224020092>
[Bragin E.Y., Bunin E.A., Dias Mikhailova D.E., Drozd A.S., Zhil'tsov V.A., Sergeev D.S., Sukhov A.E., Khairutdinov E.N. // Instrum. Exp. Tech. 2024. V. 67. № 2. P. 274. <https://doi.org/10.1134/S0020441224700386>]
8. Shi P., Shi Z., Chen W. et al. // Plasma Sci. Technol. 2016. V. 18. № 7. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/7/02>

9. Дрозд А.С., Сергеев Д.С., Бегисhev P.A., Игонькина Г.Б., Соколов М.М., Коршунов Н.В., Хайрутдинов Э.Н., Мялтон Т.Б. // Физика плазмы. Т. 50. №5. С. 543
<https://doi.org/10.31857/S0367292124050039>
 [Drozd A.S., Sergeev D.S., Begishev R.A., Igon'kina G.B., Sokolov M.M., Korshunov N. V, Khairutdinov E.N., Myalton T.B. // Plasma Phys. Reports. 2024. V. 50. № 5. P. 568.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X24600543>]
10. Li J., Wang S.X., Liu H.Q. et al. // J. Instrum. 2020. V. 15. № 02. P. C02048.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/02/C02048>
11. Сергеев Д.С., Неруш М.Н. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. 2020. Т. 43. №2. С. 49. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43176867>
 [Sergeev D.S., Nerush M.N. // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84. № 7. P. 1351.
<https://doi.org/10.1134/S1063778821070127>]
12. Krat S., Prishvitsyn A., Alieva A. et al. // Fusion Sci. Technol. 2023. V. 79. № 4. P. 446. <https://doi.org/10.1080/15361055.2022.2149033>
13. Shelukhin D.A., Vershkov V.A., Subbotin G.F., Sarychev D. V, Petrov A.A., Petrov V.G., Sokolov M.M., Igonkina G.B. // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. № 9. <https://doi.org/10.1063/1.5039151>
14. Hossack A.C., Morgan K.D., Hansen C.J., Sutherland D.A. // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. № 9. <https://doi.org/10.1063/5.0097459>
15. Drozd A., Sergeev D. // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. № 6. <https://doi.org/10.1063/5.0087847>
16. Efimov N., Podolyako F., Prishvitsyn A., Krat S. // Fusion Eng. Des. 2023. V. 196. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113990>
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. § 68. Москва: Гостехиздат, 1957.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Блок схема СВЧ-интерферометра токамака МИФИСТ-0.
- Рис. 2.** Блок-схема системы регистрации и обработки данных.
- Рис. 3.** Восстановленная линейная плотность и ток плазмы в импульсах МИФИСТ-0.
- Рис. 4.** Осциллограммы линейной плотности и амплитуды сигнала промежуточной частоты в импульсе с перескоком фазы.
- Рис. 5.** Сравнение данных, полученных с использованием фазометра, с данными постобработки с использованием преобразования Гильберта.
- Рис. 6.** Ход луча в камере МИФИСТ-0 при различных значениях плотности.
- Рис. 7.** Положение плазменного шнура относительно линии зондирования при двухпроходном зондировании.
- Рис. 8.** Осевое смещение луча в зависимости от смещения плазменного шнура в вертикальном направлении для двухпроходного зондирования.
- Рис. 9.** Положение плазменного шнура относительно линии зондирования при однопроходном зондировании.
- Рис. 10.** Осевое смещение луча в зависимости от смещения плазменного шнура в горизонтальном направлении для однопроходного зондирования.

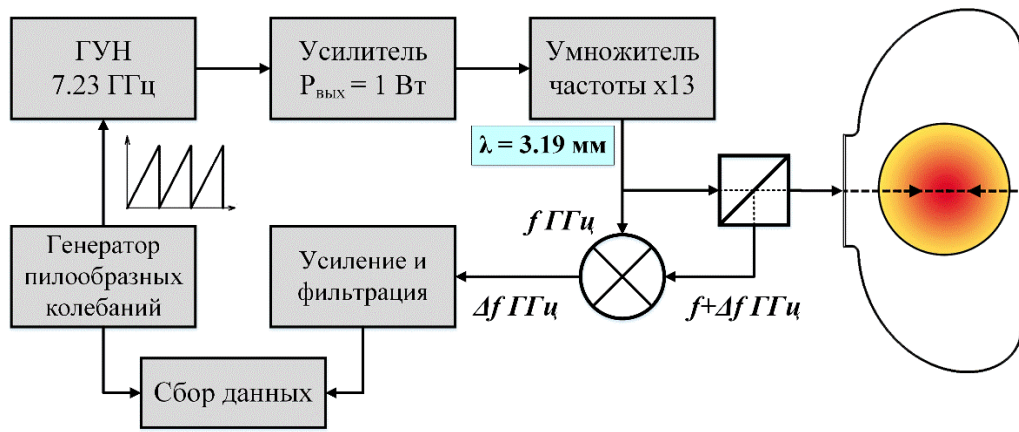


Рис. 1.

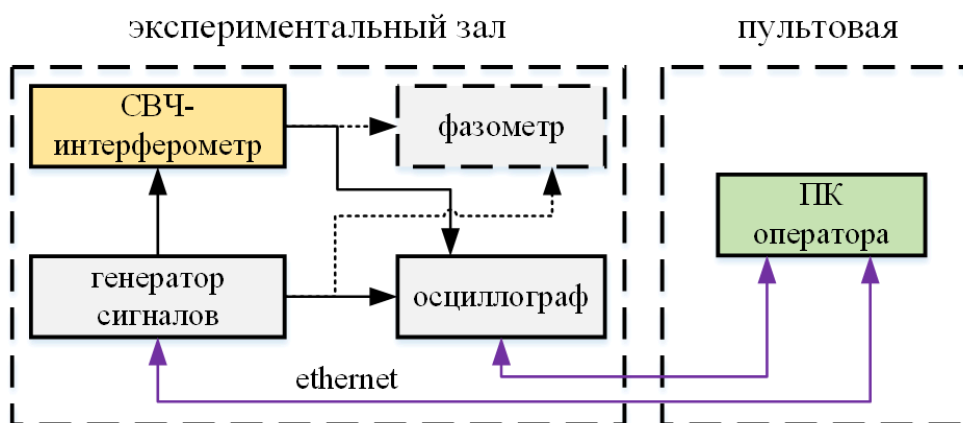


Рис. 2.

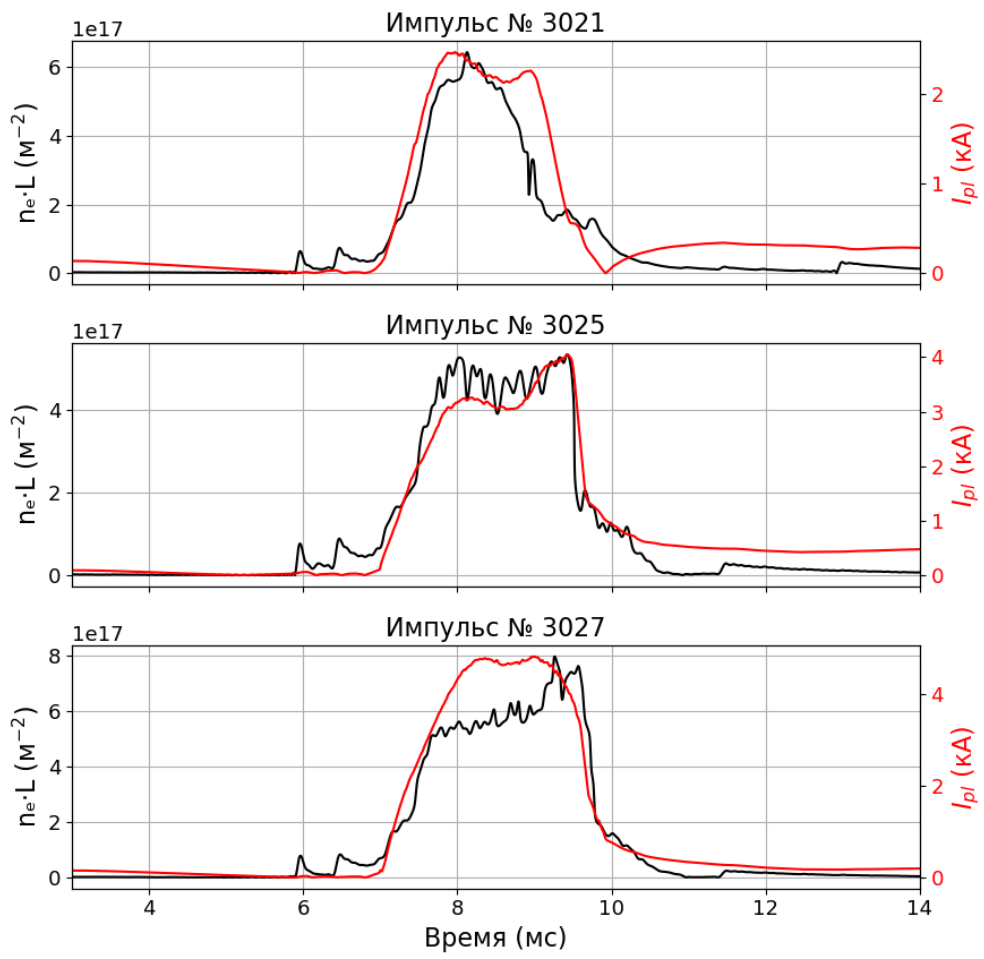


Рис. 3.

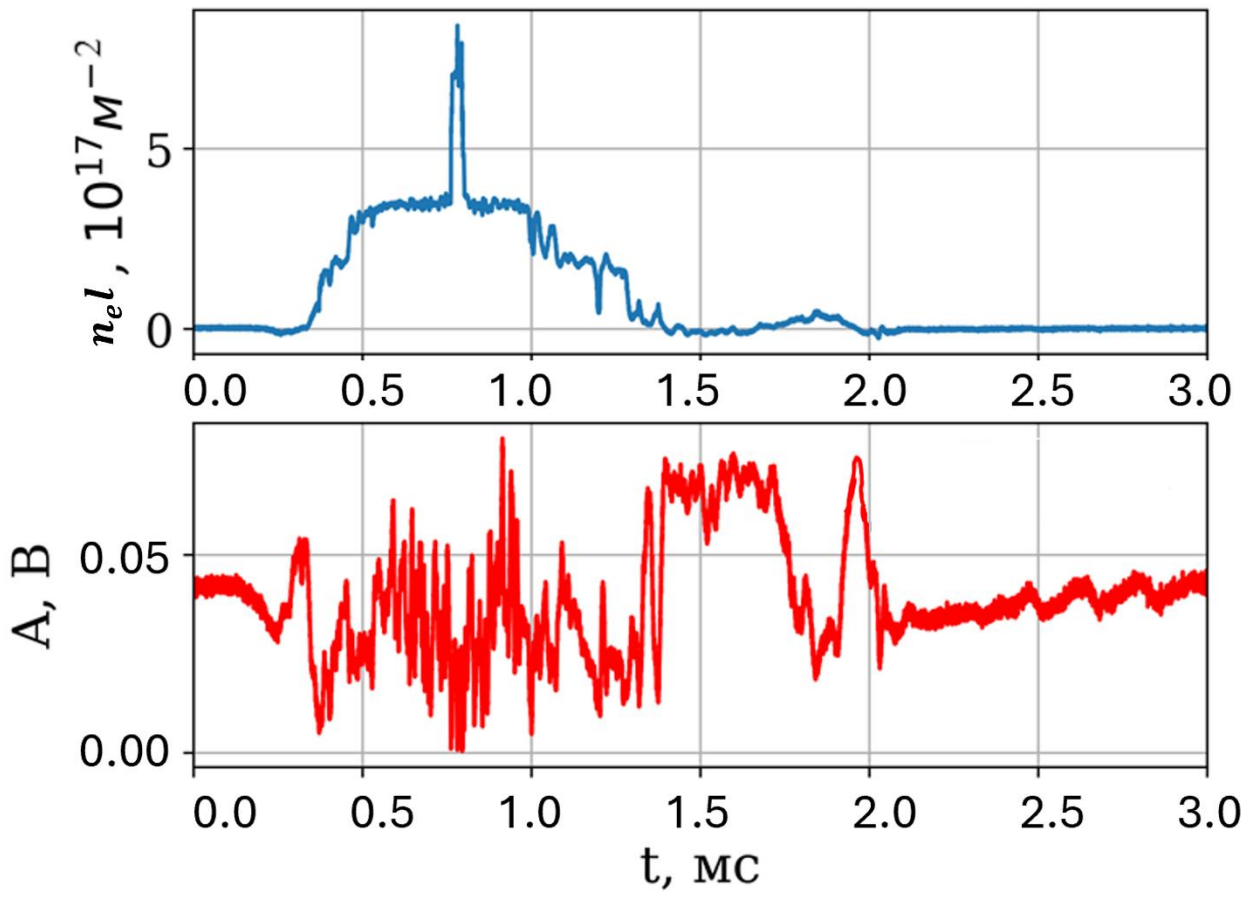


Рис 4.

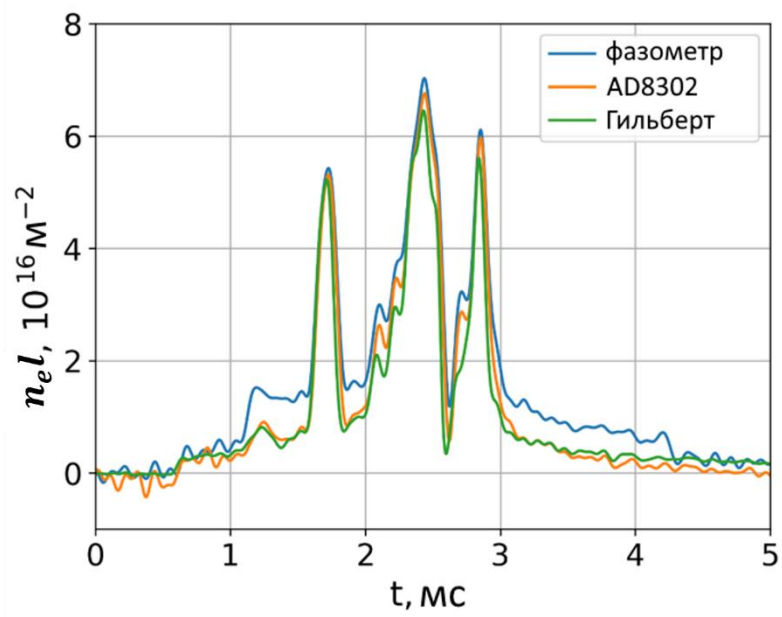


Рис. 5.

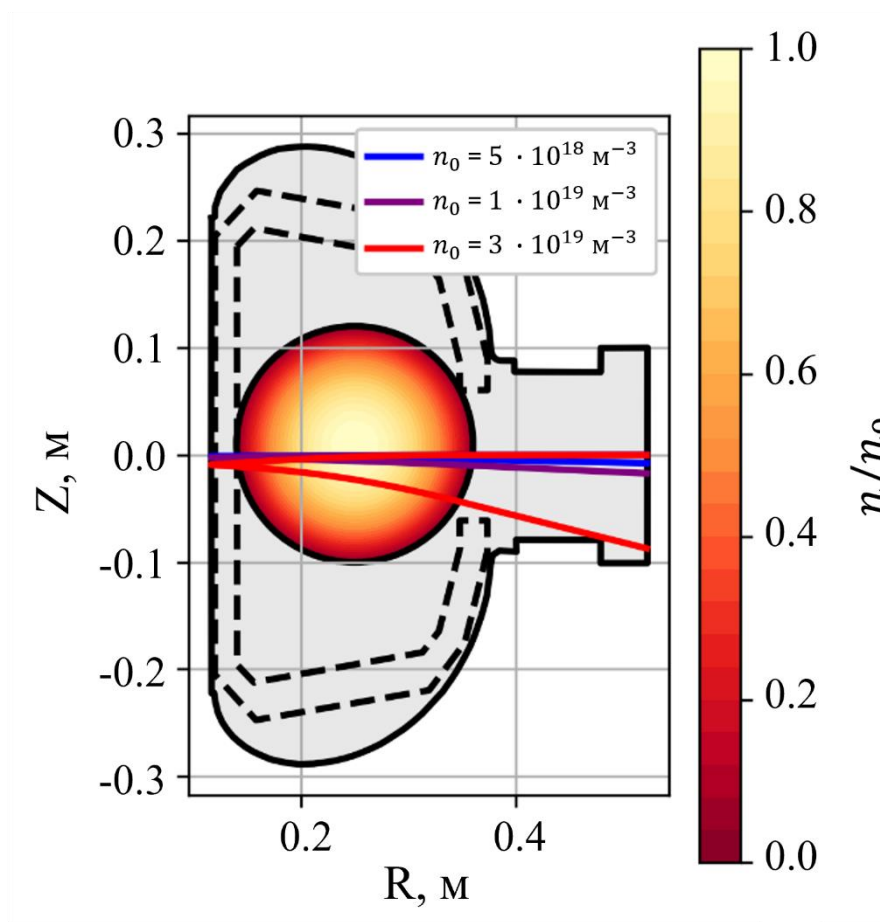


Рис. 6.

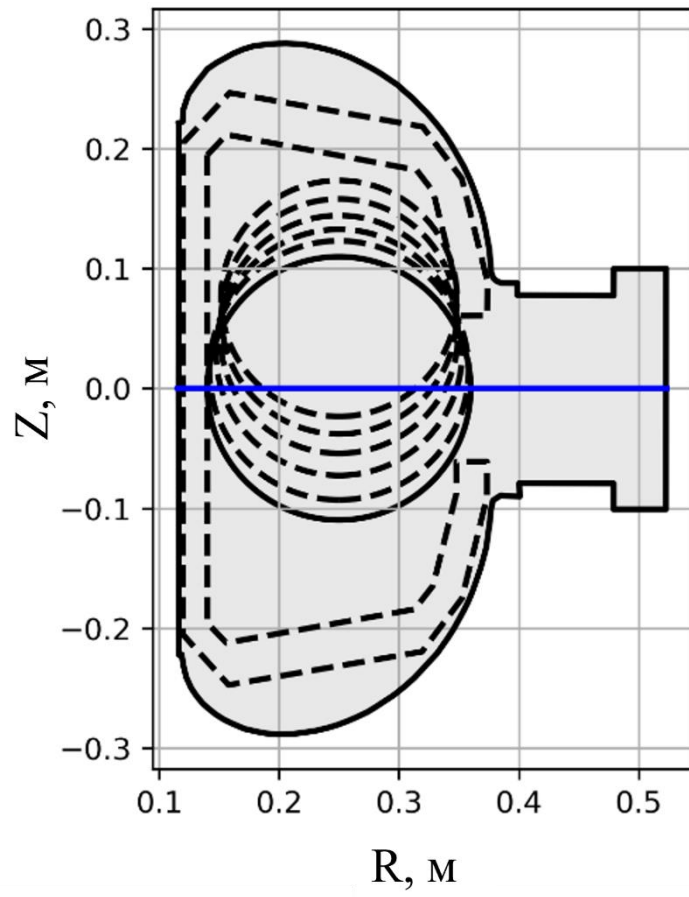


Рис. 7.

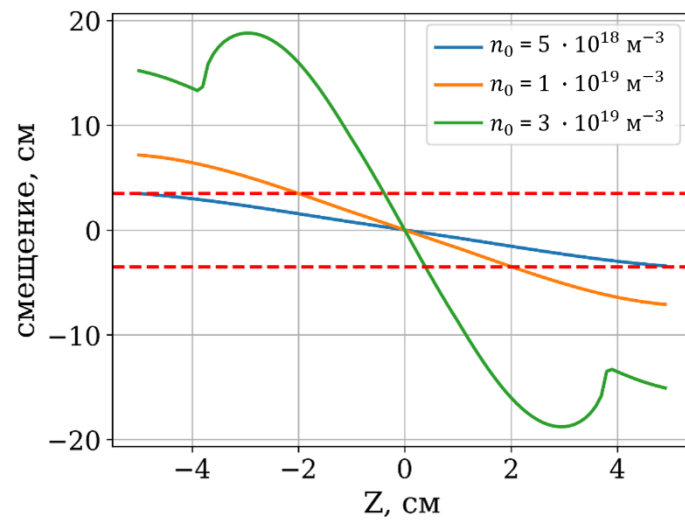


Рис. 8.

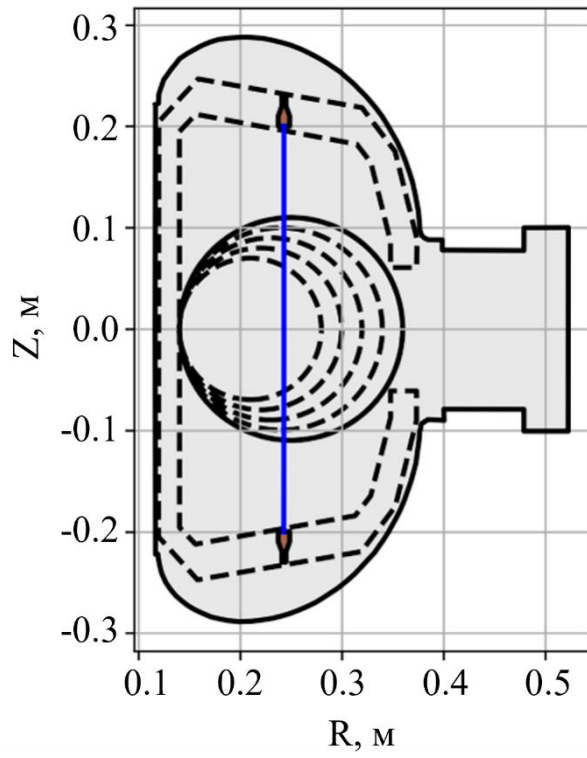


Рис. 9.

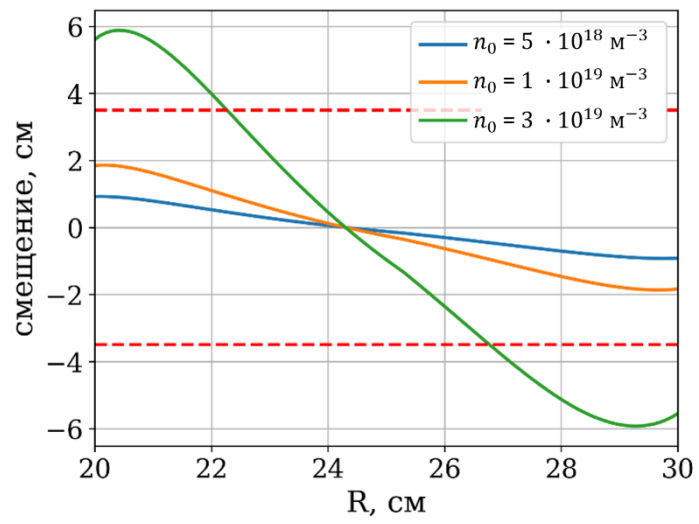


Рис. 10.