

09.5

Волоконный многоканальный гетеродинный интерферометр для исследования свойств импульсной плазмы

© К.С. Лукьянов, К.Л. Губский, А.А. Ястребцев, И.Ю. Тищенко, Т.В. Казиева

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия
E-mail: glizerogen@gmail.com

Поступило в Редакцию 6 сентября 2022 г.

В окончательной редакции 18 октября 2022 г.

Принято к публикации 27 октября 2022 г.

Разработан волоконный четырехканальный гетеродинный интерферометр для исследования свойств импульсной плазмы. Точность фазовых измерений составила 0.03 rad, что соответствует погрешности измерения концентрации свободных электронов $\pm 1 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$. Проведено измерение электронной плотности и скорости плазмы плазменного ускорителя.

Ключевые слова: лазерный интерферометр, волоконный интерферометр.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.01.54051.19354

Одним из наиболее распространенных и точных методов измерения электронной плотности является метод лазерной интерферометрии. Он не вносит искажений в плазму и позволяет оценить количество свободных электронов без применения сложных аналитических моделей [1]. В случае применения многоканальной регистрации возможно выполнить переход от интегральных измеряемых величин к локальным, а также оценить скорость плазмы [2]. Для повышения точности измерения концентрации свободных электронов в плазме применяется метод гетеродинной интерферометрии [3].

Оптимальным с точки зрения баланса точности и удобства использования считается ИК-диапазон. Чаще всего в качестве диагностического источника света применяется CO₂-лазер. Однако работа в среднем ИК-диапазоне требует охлаждения фотоприемников и делает невозможным использование традиционных оптических материалов, таких как кварц и стекло. Переход на длину волны 1.5 μm в качестве диагностического излучения позволяет применять широкий набор волоконной схемотехники и волоконных источников лазерного излучения, что обеспечивает гибкость и масштабируемость измерительной системы. Таким образом, длина волны 1.5 μm является разумным компромиссом между видимым диапазоном и средним ИК-диапазоном, поскольку она обладает высокой чувствительностью и в этом случае отсутствуют сложности, присущие работе в среднем ИК-диапазоне. Для проведения диагностики плазмы на различных плазменных установках был разработан многоканальный гетеродинный интерферометр, работающий на длине волны 1.5 μm.

Измерительная система на основе волоконного гетеродинного интерферометра содержит четыре диагностических канала. Она состоит из двух блоков: диагностического и блока электропитания. Блок электропитания позволяет вести непрерывную автономную работу в течение 6 h. Схема диагностического блока представлена на рис. 1. Штриховой линией выделены элементы,

корпусированные в диагностическом блоке. Размер диагностического блока в стоечном исполнении стандарта Евромеханика 2U был следующим: 437 × 132 × 420 mm.

Система рассчитана на использование в качестве источника излучения одночастотного волоконного лазера 1, работающего в непрерывном режиме на длине волны 1550 nm (ширина спектра генерации лазера менее 1 kHz). В настоящей работе использовался лазер P56-L2605PЭ производства РФЯЦ–ВНИИТФ с возможностью регулировки выходной мощности оптического излучения от 40 mW до 2 W.

Свет вводится в одномодовый оптический разветвитель BS и делится на опорное и диагностическое плечо интерферометра в соотношении 0.1 и 0.9 от входной мощности. В опорное плечо монтируется волоконный акустооптический модулятор 2. На него с генератора сигналов 3 подается опорный переменный сигнал с частотой $f = 40 \text{ MHz}$. Для контроля глубины контраста интерференционной картины в опорное плечо монтируется модуль 4 с волоконным аттенуатором и измерителем мощности. Аттенуатор позволяет изменять интенсивность излучения в диапазоне от 0 до 32 mW. Ввод и вывод излучения осуществляются с помощью коллиматоров 5 и 6.

Полученный сигнал поступает на плату фотоэлектрического преобразователя, основой которого является I/Q-демодулятор [4]. После регистрации оптический сигнал преобразуется в пару квадратурных аналоговых сигналов, из которых извлекается зависимость фазы от времени и которые далее корректируются [5].

При измерении фазовых набегов, меньших чем 2π , временное разрешение интерферометра определяется полосой фотоприемника или фильтров [3]. В данном случае полоса регистрации ограничивается фильтром нижних частот в диапазоне 2 MHz. Таким образом, в текущей конфигурации предельное временное разрешение интерферометра 170 ns.

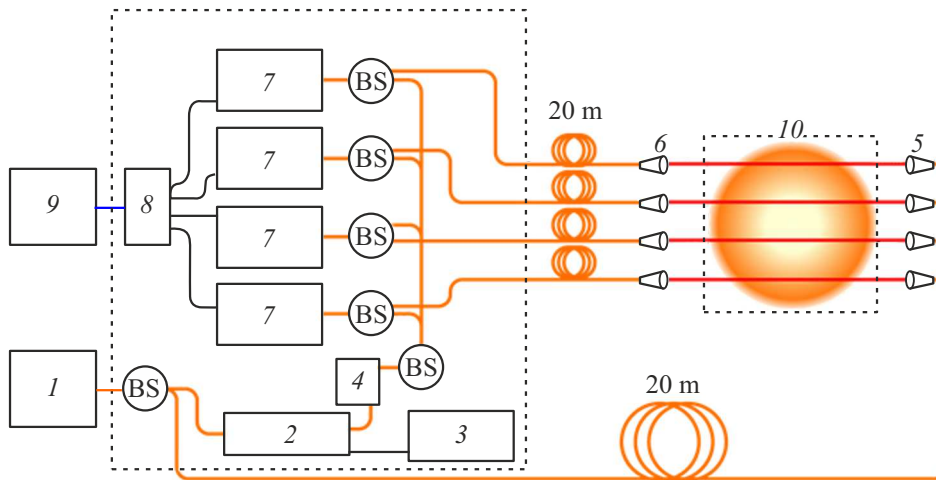


Рис. 1. Схема системы измерения электронной плотности плазмы на основе волоконного гетеродинного интерферометра. 1 — волоконный лазер с диодной накачкой, 2 — акустооптический модулятор, 3 — генератор сигналов $f = 40$ MHz, 4 — модуль с аттенуатором и измерителем мощности, 5 — коллиматоры Thorlabs CFC11P-C, 6 — коллиматоры Thorlabs F220APC-1550, 7 — плата оптоэлектронного преобразователя с малошумящим полосовым усилителем промежуточной частоты, 8 — Ethernet-модуль, 9 — ПК, 10 — вакуумная камера.

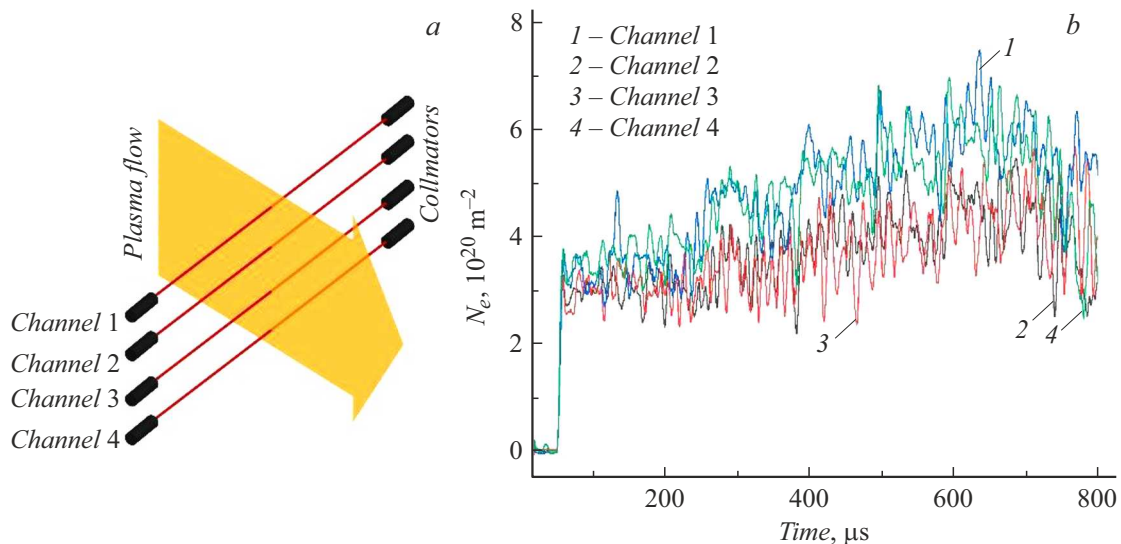


Рис. 2. *a* — схема постановки эксперимента; *b* — измеренная электронная плотность водородной плазмы.

Анализ уровня шума в измерительном канале позволил оценить погрешность фазовых измерений в 0.03 рад, что соответствует погрешности измерения линейной электронной плотности $\pm 1 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$.

Далее были проведены четырехканальные измерения пространственного распределения электронной плотности в плазменном потоке на плазменном ускорителе. Схема эксперимента и результат измерений представлены на рис. 2. Четыре пары коллиматоров располагались вертикально друг над другом на расстоянии 25 mm . Плазменный поток взаимодействовал с излучением диагностических каналов. Максимальная измеренная линейная электронная плотность составила $7.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-2}$ при $t = 637 \mu\text{s}$. Измерительная система позволила выявить

неоднородность концентрации свободных электронов в поперечном сечении плазмы (рис. 2, *b*), а также пульсации электронной плотности плазмы с характерным временем порядка $20 \mu\text{s}$.

В следующем эксперименте использовались два измерительных канала, которые располагались горизонтально друг за другом по направлению распространения плазменного потока на расстоянии 100 mm друг от друга. Результаты такого измерения электронной плотности представлены на рис. 3. Видно, что характерные изменения концентрации прослеживаются в обоих каналах регистрации. Можно с уверенностью говорить о том, что наблюдается движение „сгустков“ плазменного потока. Практически в течение всего времени существования

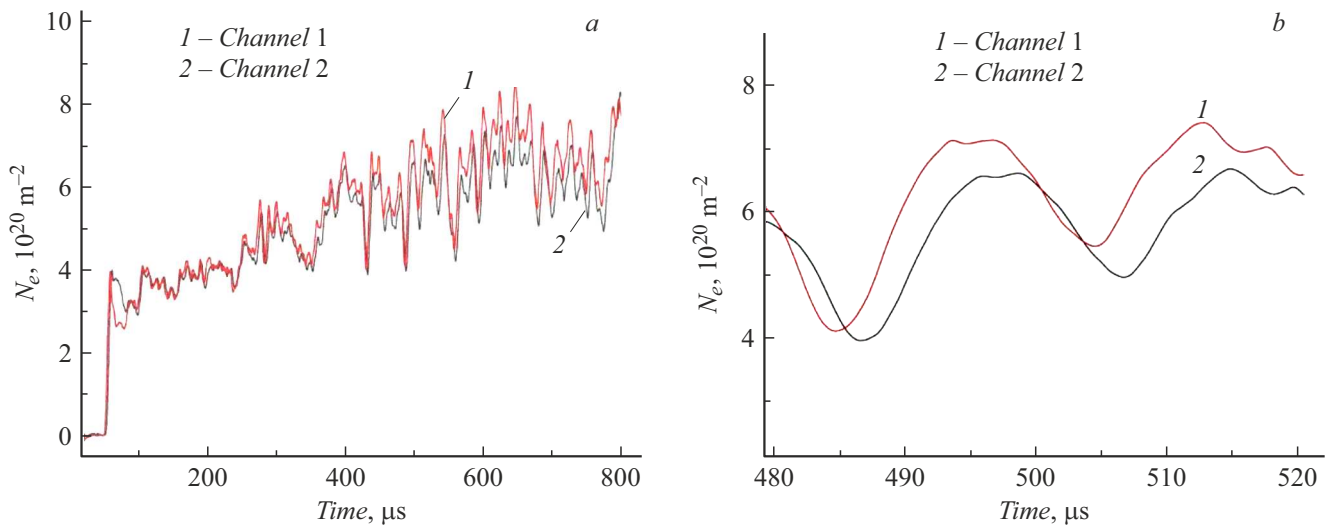


Рис. 3. *a* — результаты измерения линейной электронной плотности водородной плазмы. Использовался времяпролетный метод регистрации для оценки скорости потока. *b* — график в диапазоне 480–520 μs в увеличенном виде.

Результаты измерения скорости плазменного потока в четырех выбранных точках

Параметр	Номер точки			
	1	2	3	4
Скорость, km/s	65 ± 3	52 ± 3	72 ± 3	34 ± 3
Время, μs	188	397	458	602

потока для любого момента времени можно определить скорость потока по задержке времени регистрации выделенного „сгустка“ между двумя каналами. Время пролета оценивалось по расстоянию между характерными экстремумами графиков. Значения измеренных скоростей для нескольких характерных пиков представлены в таблице.

Погрешность значения скорости определяется погрешностью определения расстояния между коллиматорами и погрешностью определения локального экстремума пульсации электронной плотности.

Скорость движения фронта плазменного потока можно оценить по времени прибытия его в область регистрации первого канала. Она составила $V = 20 \pm 3$ km/s при $t = 49 \mu\text{s}$. Это значение существенно отличается от скорости основной части плазмы (см. таблицу), что связано с особенностью инициации разряда в ускорителе. Таким образом, применение нескольких последовательно расположенных каналов регистрации электронной плотности для измерения скорости плазмы позволяет определять скорость потока на протяжении почти всего времени его существования.

Таким образом, разработан и испытан волоконный гетеродинный интерферометр для диагностики импульсной плазмы. Он позволяет производить многоходовое измерение концентрации свободных электронов в се-

чении плазмы, а также измерять скорость потока на протяжении почти всего времени его существования. Уровень собственных шумов составляет 0.03 rad (что соответствует $\pm 1 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$). Максимальное значение зарегистрированной линейной электронной плотности водородной плазмы составило $7.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-2}$. Измерены скорости плазменного потока в диапазоне от 20 ± 3 до 72 ± 3 km/s.

Применение многоканального волоконного интерферометра позволило провести измерение распределения концентрации свободных электронов в плазме, обнаружить пульсации с временами порядка $20 \mu\text{s}$ и измерить скорость плазменного потока.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L.M. Smith, D.R. Keefer, N.W. Wright, IEEE Trans. Plasma Sci., **28** (6), 2272 (2000). DOI: 10.1109/27.902256
- [2] L.M. Smith, D.R. Keefer, N.W. Wright, Rev. Sci. Instrum., **74** (7), 3324 (2003). DOI: 10.1063/1.1582389
- [3] A.P. Kuznetsov, J. Phys.: Conf. Ser., **666**, 012017 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/666/1/012017
- [4] C. Ziomek, P. Corredoura, Proc. Particle Accelerator Conf., **4**, 2663 (1995). DOI: 10.1109/PAC.1995.505652
- [5] I. Herszterg, M. Poggi, T. Vidal, Inf. J. Comput., **31** (3), 527 (2019). DOI: 10.1287/ijoc.2018.0832