

04

Наблюдение филаментов на токамаке Глобус-М методом доплеровской рефлектометрии

© В.В. Буланин, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, А.Е. Иванов,
С.В. Крикунов, Г.С. Курскиев, М.М. Ларионов, В.Б. Минаев,
М.И. Патров, А.В. Петров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров,
С.Ю. Толстяков, Н.А. Хромов, А.Ю. Яшин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: bulanin121@rambler.ru
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию 11 ноября 2010 г.

Представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие о развитии в плазме токамака Глобус-М нитевидных структур, или филаментов. Сведения получены с использованием доплеровской рефлектометрии. Обнаружена корреляция между рефлектометрическими данными и результатами зондовых измерений на периферии разряда в токамаке. В исследованиях были определены скорости вращения филаментов, момент их появления при переходе к улучшенному удержанию и область их возникновения.

В настоящее время активно исследуются нитевидные возмущения плотности плазмы, возникающие на периферии токамаков как в области удержания, так и вне последней замкнутой магнитной поверхности (LCFS) [1,2]. Эти образования, или филаменты, вытянутые вдоль силовых линий магнитного поля, сопровождают в H-режиме развитие периферийных локализованных мод (edge localized mode — ELM). Филаменты, как полагают, являются результатом нелинейного развития неустойчивости баллонного типа, возникающей в области транспортного барьера при достижении определенной критической величины градиента давления плазмы [1]. Интерес к их исследованию обусловлен тем, что они могут играть важную роль в переносе частиц и энергии на периферии разряда и тем самым вносить вклад в тепловую нагрузку на первую стенку токамака-реактора и на пластины дивертора. В данной работе впервые была показана возможность использования допле-

ровской рефлектометрии для определения характеристик филаментов. С использованием этого метода на сферическом токамаке Глобус-М были получены новые сведения о возникновении и развитии нитевидных возмущений.

Метод доплеровской рефлектометрии основан на регистрации обратного рассеяния СВЧ-излучения, падающего наклонно на граничную поверхность равного коэффициента преломления, при условии наличия в плазме отсечки для зондирующего пучка [3]. Наклон зондирующего пучка задается таким образом, что лучевая траектория в точке отражения перпендикулярна силовой линии магнитного поля, при этом волновой вектор рассеивающих флуктуаций плотности плазмы \mathbf{k}_\perp , определяемый условием Брэгга, ориентирован в направлении диамагнитного дрейфа заряженных частиц. Рассеяние преимущественно происходит из области отсечки [3]. Поэтому путем измерения доплеровского частотного сдвига рассеянного излучения $\Delta\omega_D = \mathbf{k}_\perp \cdot \mathbf{V} = k_\perp V_\perp$, возникающего при движении рассеивающих флуктуаций со скоростью \mathbf{V} , можно определить составляющую скорости флуктуаций V_\perp в направлении диамагнитного дрейфа. Значение k_\perp , согласно условию Брэгга, составляет $k_\perp = 2k_0 \sin \alpha$, где α — угол падения зондирующего СВЧ-пучка на поверхность равного коэффициента преломления на границе плазмы, k_0 — волновое число излучения в вакууме. На токамаке Глобус-М частота зондирующего излучения O -моды составляла 18–26 GHz при угле α , равном 23–25°. В этих условиях отсечка зондирующего пучка находится в окрестности LCFS. Для зондирования и приема рассеянного излучения использовалась одна и та же рупорная антенна [4], расположенная на внешнем обходе тора вблизи экваториальной плоскости. Доплеровский частотный сдвиг определялся как смещение спектра комплексного сигнала квадратурного (IQ) детектора обратнорассеянного излучения [4].

Эксперименты были проведены на токамаке Глобус-М (большой радиус тора — $R = 0.36$ m, малый радиус — $a = 0.24$ m) в режиме H -моды, инициированной нагревом плазмы пучком атомов водорода или дейтерия при следующих значениях основных параметров: плазменный ток — $I_p = 170$ – 200 kA, тороидальное поле — $B_T = 0.4$ T, плотность плазмы — $n_e = (1$ – $3) \cdot 10^{19}$ m $^{-3}$, мощность дополнительного нагрева — $P \leq 1$ MW. Переход в H -моду сопровождался появлением пиков излучения на линии D_α , что в свое время было интерпретировано как возникновение ELM первого рода [5]. В процессе регистрации

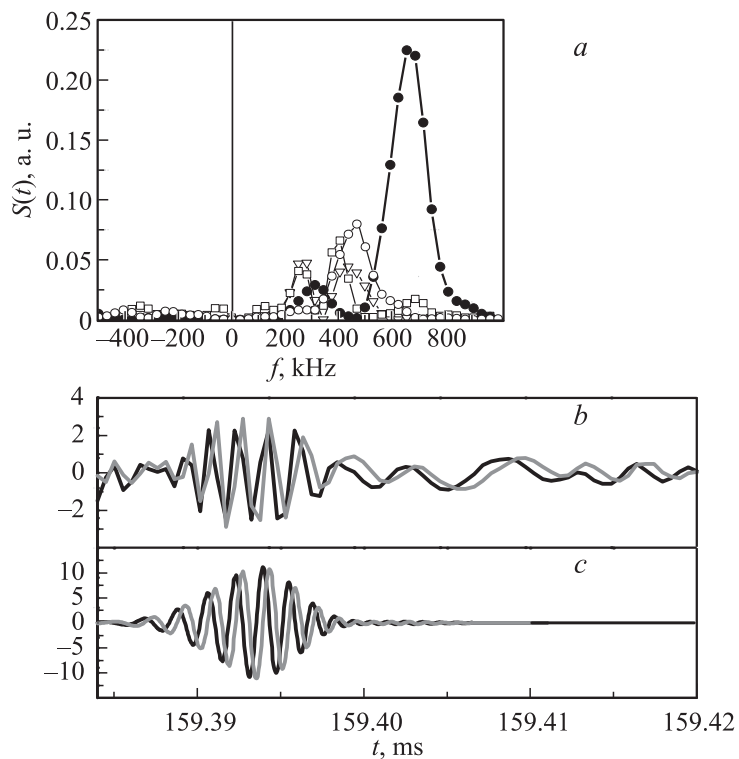


Рис. 1. *a* — спектры мощности комплексного сигнала IQ -детектора, определенные во временном окне $16 \mu\text{s}$ в последовательные моменты, *b* — фрагмент записи синусного и косинусного сигналов IQ -детектора, *c* — результат численного моделирования сигналов IQ -детектора. Знак смещения спектров соответствует вращению рассеивающих флуктуаций и филамента в направлении электронного диамагнитного дрейфа.

обратнорассеянного излучения было обнаружено появление спектров, содержащих интенсивную частотную составляющую с большим (до 600–700 kHz) доплеровским смещением. Пример возникновения такого рода спектра представлен на рис. 1, *a*, где показаны оценки спектров мощности комплексного сигнала IQ -детектора, определенные в последовательные интервалы времени длительностью $16 \mu\text{s}$.

Частотные сдвиги интенсивных спектральных составляющих всегда превосходили сдвиги спектров малого уровня. Наблюдаемым спектрам большой интенсивности в сигналах квадратурного детектора отвечали всплески интенсивных высокочастотных колебаний, которые носили характер квазикогерентных флуктуаций (ККФ) с малой относительной шириной спектра ≈ 0.1 . Типичный вид такого цуга ККФ представлен на рис. 1, *b*. Такие всплески ККФ появлялись с интервалом $5\text{--}50\ \mu\text{s}$ и с длительностью $10\text{--}20\ \mu\text{s}$ в периоды между ELM I рода, когда отсечка для зондирующей волны находилась внутри LCFS.

В сферических токамаках при переходе в H-моду было отмечено появление нитевидных структур (см., например, [2]). Поэтому можно предположить, что регистрируемые всплески высокочастотных ККФ есть результат обратного рассеяния на филаментах. При высоком разрешении метода по волновым числам Δk_{\perp} рассеяние будет происходить преимущественно на одной пространственной гармонике филамента — $k_{\perp} = 2k_0 \sin \alpha$. Этим можно объяснить тот факт, что при движении филамента со скоростью V_{\perp} наблюдаются ККФ в сигнале детектора рассеянного излучения, частота которых как раз является доплеровским смещением $\Delta\omega_D = k_{\perp} V_{\perp}$. Длительность цуга этих ККФ определяется временем прохождения филамента через объем рассеяния, который в случае доплеровской рефлектометрии вытянут в направлении диамагнитного дрейфа заряженных частиц [4]. Рассеяние будет происходить эффективно, когда поперечный размер филаментов порядка или меньше пространственного масштаба — $2\pi/k_{\perp}$, который в условиях эксперимента составлял $\approx 1\text{--}2\ \text{cm}$. Для иллюстрации предложенной модели было проведено численное моделирование откликов IQ-детектора при прохождении филамента через объем рассеяния. Сигналы, вычисленные с использованием аппаратной функции диагностики [4], сравниваются с экспериментальными сигналами на рис. 1, *b* и *c*. Соответствие между цугами колебаний для конкретного примера было достигнуто при скорости филамента $8\ \text{km/s}$.

Модель формирования сигналов IQ-детектора как результата обратного рассеяния на филаментах нашла подтверждение при сравнении этих сигналов с ионным током насыщения электростатического зонда, расположенного рядом с рупором антенны на расстоянии $3\text{--}4\ \text{cm}$ от LCFS. Типичная картина ионного тока насыщения представляет собой серию пиков на квазистационарном пьедестале. Длительность пиков составляла $5\text{--}20\ \mu\text{s}$, а интервал между ними — $20\text{--}100\ \mu\text{s}$. На

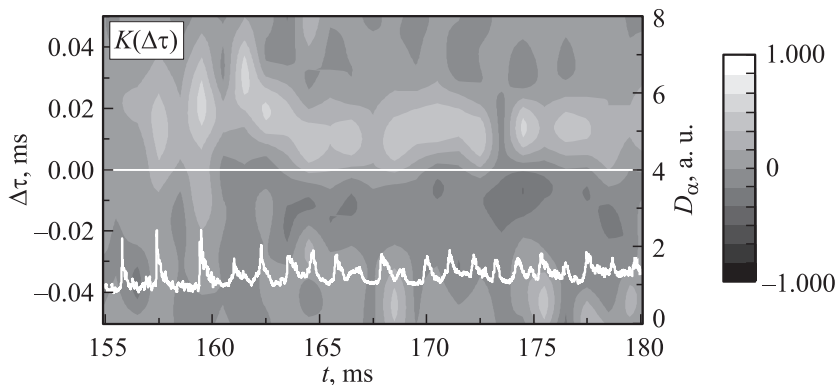


Рис. 2. Эволюция взаимно корреляционной функции $K(\Delta\tau)$ между сигналом зонда и огибающей сигнала детектора. Белая кривая — интенсивность излучения на линии D_α .

рис. 2 показана двумерная картина эволюции взаимно корреляционной функции $K(\Delta\tau)$ между сигналом зонда и огибающей сигнала детектора. Видно, что наблюдаемые максимумы корреляционной функции ($K(\Delta\tau) \approx 0.5$) смещены на время $\Delta\tau \approx 10\text{--}20\ \mu\text{s}$, которое определяет время распространения филаментов из области отсечки СВЧ-излучения до зонда. Было проведено также сравнение непосредственно зондовых сигналов и сигналов квадратурного детектора в периоды, отмеченные наибольшими значениями корреляции. Сравнение показало, что цугу ККФ соответствует пик ионного тока насыщения. Таким образом, можно полагать, что филамент вызывает обратное рассеяние, которое выражается в виде появления всплеска ККФ в сигнале квадратурного детектора, а при достижении зонда приводит к появлению импульса ионного тока. По данным зондовой диагностики плотность плазмы в филаменте составляет $5 \cdot 10^{17}\text{--}10^{18}\ \text{m}^{-3}$.

На основе предложенной модели возникновения цугов интенсивных квазикогерентных колебаний можно представить некоторые особенности возникновения и движения филаментов в токамаке Глобус-М. Такие всплески ККФ, которые наблюдались при расположении отсечки внутри LCFS только в периоды между ELM первого рода, можно интерпретировать как результат рассеяния на inter-ELM филаментах,

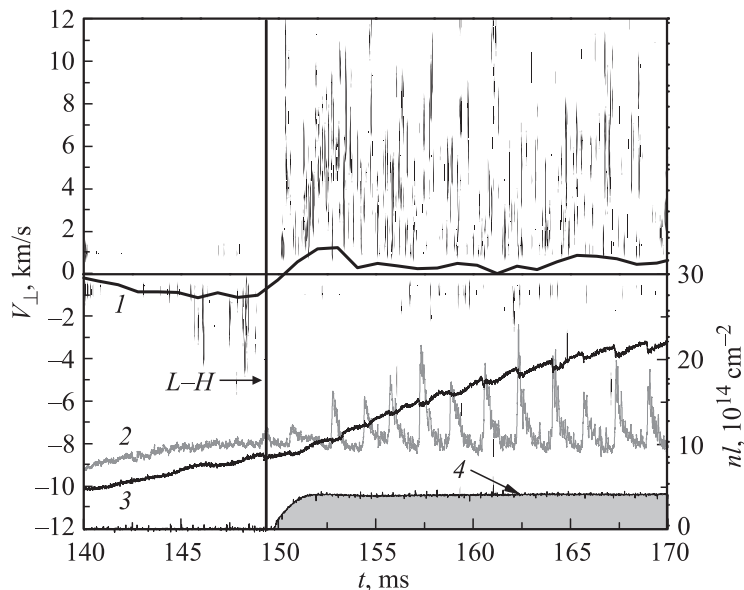


Рис. 3. Спектрограмма всплесков квазикогерентных колебаний. Положительные значения скоростей соответствуют вращению в сторону электронного диамагнитного дрейфа: 1 — скорость флуктуаций плазмы, определенная для интервалов между филаментами, 2 — эволюция среднечордовой плотности плазмы, 3 — интенсивность излучения на линии D_α , 4 — импульс тока нагревного пучка нейтральных атомов в относительных единицах.

обнаруженных в сферическом токамаке MAST [2]. В омической стадии разряда до L–H-перехода цуги квазикогерентных колебаний на фоне хаотических флуктуаций большого уровня не выделялись. Полагая, что всплески ККФ есть результат рассеяния на филаментах, можно с использованием соотношения $\Delta\omega_D = k_\perp V_\perp$ по частотным сдвигам $\Delta\omega_D$ определить скорости нитевидных образований. На рис. 3 показана спектрограмма всплесков интенсивных ККФ, представленная в виде набора отрезков вертикальных прямых. Спектры приведены в шкале скоростей V_\perp . Временное положение вертикальных отрезков отмечает момент появления филаментов, а положение по вертикальной оси определяет скорость филаментов. На спектрограмме видны спектры

только цугов ККФ, поскольку для их выделения на ней отмечаются только те спектральные значения, которые составляют не менее 60% от максимальной величины. На этом же рисунке показана эволюция среднечордовой плотности плазмы, интенсивность излучения на линии D_α и обозначено время нагрева пучком нейтральных атомов. Вертикальная прямая на изломе кривой среднечордовой плотности отмечает момент перехода в H-моду. Обращают на себя внимание значительный разброс перпендикулярных скоростей филаментов и нерегулярность в их появлении. Такой разброс, видимо, можно объяснить тем, что филаменты возникают на различных магнитных поверхностях, на которых скорости вращения плазмы существенно различаются [2]. Аналогичное нерегулярное распределение филаментов отмечалось и на токамаке MAST в L-режиме и в промежутках времени между ELM [2]. Максимальные значения скоростей филаментов (8–10 km/s) близки к неоклассическим значениям полоидальных скоростей в области периферийного транспортного барьера на токамаке Глобус-М. На рис. 3 показана также скорость флуктуаций плазмы, определенная для интервалов между филаментами. Видно, что эта скорость была значительно меньше скорости филаментов в течение всего периода существования H-моды.

Таким образом, в работе впервые была продемонстрирована возможность использования доплеровской рефлектометрии для исследования возмущений плотности плазмы в виде филаментов. Обнаружена корреляция между цугами квазикогерентных сигналов рефлектометра и импульсными сигналами зонда, которая подтверждает, что обратное рассеяние происходит на филаментах. Примечательно, что в экспериментах было обнаружено возникновение нитевидных структур внутри LCFS в интервалах между ELM первого рода. Эти данные совпадают с результатами, полученными ранее в сферическом токамаке MAST. В момент появления самого ELM, которое отмечалось пиком излучения на линии D_α и вспышкой относительно высокочастотных колебаний магнитного поля, в сигналах квадратурного детектора всегда наблюдались мощные неупорядоченные флуктуации. Эти флуктуации не поддаются простой интерпретации и, скорее всего, связаны с сильными возмущениями профиля электронной плотности в области пьедестала. Если филаменты, возникающие при развитии ELM, сейчас аргументированно интерпретируются как результат развития поверхностной баллонной моды (peeling ballooning mode) [1], то природа возникно-

вения филаментов между ELM остается неясной [2]. Можно полагать, что использование доплеровской рефлектометрии позволит провести измерения в широкой области плотностей плазмы и плазменных токов, от которых зависят параметры филаментов, и тем самым выявить характер неустойчивости.

Авторы выражают благодарность Е.З. Гусакову и В.А. Рожанскому за плодотворное обсуждение результатов.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-02-00984-а.

Список литературы

- [1] *Doyle E.J.* et al. // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. P. S18.
- [2] *Ben Ayed N.* et al. // Plasma Phys. Control Fusion. 2009. V. 51. P. 1.
- [3] *Conway G.D.* et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. V. 46. P. 951.
- [4] *Буланин В.В., Ефанов М.А.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 49.
- [5] *Gusev V.K.* et al. // Proc. 34 th EPS Conf. on Plasma Phys. Warsaw, 2007. V. 311. P. 1–078.