

04:07:12

Лазерное многопроходное зондирование в томсоновской диагностике плазмы

© М.Ю. Кантор, Д.В. Куприенко

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 27 декабря 1996 г.

В работе излагается новый подход к системе лазерного зондирования для томсоновской диагностики высокотемпературной плазмы. Подход основан на принципах многопроходного и внутрирезонаторного лазерного зондирования, что позволяет на один-два порядка поднять чувствительность метода и обеспечить измерения электронной температуры с частотой более 10 кГц. Представлены экспериментальные результаты тестирования системы зондирования, разработанной для токамака ФТ-2.

1. Введение

Томсоновская диагностика широко используется для измерений локальной электронной температуры горячей плазмы. При плотности плазмы выше 10^{13} см^{-3} она обладает широкими возможностями, включая измерения эволюции пространственных профилей температуры. При более низкой плотности из-за малой энергии рассеянного излучения диагностика сталкивается со значительными трудностями. Тем не менее в этих условиях достойной альтернативы ей нет, так как другие методы не дают достоверных данных из-за искажений функции распределения электронов. При измерениях эволюции температуры плазмы низкой плотности возникают дополнительные трудности. Большая скорость переходных процессов требует применения в этих условиях лазеров с частотой генерации импульсов порядка десятка килогерц. Высокая чувствительность необходима и в условиях плотной плазмы для измерений функции распределения электронов или плотности тока плазмы [1], а также профилей электронной температуры с помощью одного спектрального прибора.

В настоящей работе излагается новый подход к томсоновской диагностике, основанный на принципах многопроходного и внутрирезонаторно-

го зондирования, позволяющий более чем на порядок поднять чувствительность метода и обеспечить измерения электронной температуры с частотой порядка 10 кГц. При многопроходном зондировании лазерный луч многократно пересекает исследуемый объем, что повышает чувствительность диагностики за счет роста энергии рассеянного излучения. После прохождения плазменного объема луч возвращается в активные элементы лазера. Таким образом, плазменный объем заключается в лазерный резонатор, что существенно уменьшает потери излучения в системе. Этот эффект не может быть использован для значительного увеличения энергии излучения в импульсе (как правило, она и так близка к предельной допустимой величине). Однако он позволяет расширить возможности лазера, в частности в режиме многоимпульсной генерации. В работе приводятся результаты по экспериментальному исследованию новой системы зондирования, разработанной на этих принципах для томсоновской диагностики плазмы токамака ФТ-2.

2. Оптическая схема многопроходного внутрирезонаторного лазерного зондирования

Внутрирезонаторное зондирование требует пересмотра оптической схемы лазера для томсоновской диагностики. Обычная многокаскадная схема (генератор и усилитель) оказывается здесь малоэффективной, так как возвращаемый пучок вынужден проходить через лазерный генератор, который не способен не только поддержать энергию пучка, но и выдержать его высокую интенсивность. В этом случае необходимо отказаться от многокаскадной схемы и использовать один активный элемент для генерации излучения. Эффективное преобразование запасенной инверсии в лазерное излучение обеспечивается низкими потерями излучения в протяженном лазерном резонаторе. Впервые подобная система применялась на токамаке ФТ-1 [2]. Оптическая схема многопроходного внутрирезонаторного лазерного зондирования показана на рис. 1.

Для модуляции добротности резонатора, образованного глухим зеркалом (1) и зеркалами многопроходной системы (6, 7), используется фототропный фильтр (4). Обладая высоким начальным поглощением, фильтр позволяет запасти в активной среде достаточно высокую инверсию. Лавинообразное просветление фильтра под действием спонтанного излучения приводит к генерации мощного лазерного импульса, что

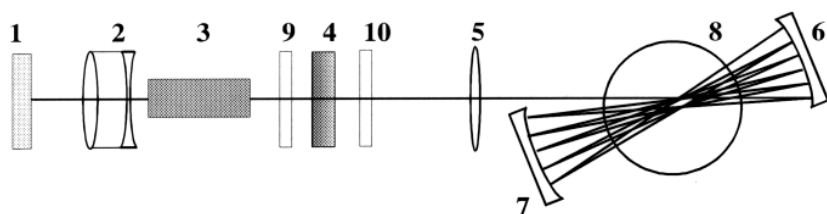


Рис. 1. Оптическая схема многопроходного внутрирезонаторного лазерного зондирования: 1 — 100%-ное зеркало резонатора; 2 — объектив; 3 — активный элемент лазера; 4 — фототропный фильтр; 5 — фокусирующая линза; 6, 7 — зеркала многопроходной системы; 8 — плазменный объем.

может повторяться многократно на протяжении одного разряда ламп накачки.

Многопроходная система — ключевой элемент в реализации нового подхода. Система, обеспечивающая большое число проходов луча через плазму с их фокусировкой на оси наблюдения и возвращение пучка обратно в лазер, была предложена в [3] и применялась на токамаке ФТ-1 [4]. Она состоит из двух сферических зеркал (6, 7), между которыми размещается плазменный объем (8), и линзы (5), фокусирующей излучение на оси наблюдения. Зеркала расположены на расстоянии, равном сумме их радиусов кривизны. Максимальное число проходов луча в системе $N \equiv 8D/b$ достигается при смещении центров кривизны зеркал относительно друг друга на расстояние $b^2/16D$ вдоль оси наблюдения. Здесь b — диаметр входного луча, D — размеры зеркал вдоль оси наблюдения. Расходимость луча должна быть не выше $b/2NF$, где F — фокус линзы. Иначе рост поперечных размеров пучка приведет к потерям излучения из системы. Жесткие требования к расходимости излучения могут привести к серьезным ограничениям на применение многопроходного зондирования в плазменном эксперименте.

Ослабить их позволяют специальная юстировка многопроходной системы и меры по уменьшению расходимости пучка. Суть юстировки состоит в оптимальном расположении зеркал системы и линзы. Небольшой сдвиг зеркал друг к другу переводит многопроходную систему в класс устойчивых оптических резонаторов, что обеспечивает удержание расходящихся пучков. Величина сдвига диктуется необходимостью удержать пучок в системе и избежать его фокусировки вблизи поверхности зеркал.

При этом определяющую роль играет расходимость лазерного пучка. Обычно используемые способы уменьшения расходимости не годятся при внутрирезонаторном зондировании. Для решения этой проблемы в резонатор был введен объектив (2), корректирующий оптическую неоднородность активного элемента (3), что существенно снизило расходимость излучения. Этим вопросам будет посвящена отдельная работа.

При малых потерях излучения перечисленных элементов достаточно для генерации. Для дополнительного управления лазером может оказаться полезным вспомогательный резонатор, для чего вблизи активного элемента и фототропного фильтра ставятся одно или два полупрозрачных зеркала (9, 10) с небольшим коэффициентом отражения. В случае больших потерь излучения этот резонатор становится необходимым для формирования начального импульса.

3. Экспериментальные результаты

В системе зондирования использовался рубиновый стержень длиной 240 мм и диаметром 21 мм с концентрацией примеси Cr_2O_3 0.012%. Апертура кристалла ограничивалась 16-мм дифрагмой. В качестве фототропного фильтра использовалось цветное стекло типа КС-19 с примесью CdSe. Многопроходная система состояла из двух зеркал радиусом кривизны 1000 мм и диаметром 120 мм и линзы с фокусом 1250 мм, расположенной на расстоянии 3 м от кристалла. Поверхности всех оптических элементов, кроме торцов рубина, были просветлены.

Между активным элементом и глухим зеркалом (1) был установлен объектив, состоящий из положительной ($F = 1250$ мм) и отрицательной ($F = -1500$ мм) линз. Выбором фокусного расстояния объектива расходимость пучка была уменьшена с 6 до 1 мрад, а пороговая энергия накачки лазера снижена почти вдвое. При сдвиге зеркал на 10 мм друг к другу получалось до 36 проходов луча через систему. Размеры перетяжки веера лучей на оси наблюдения составляли $2 \cdot 12$ мм², а выходящий пучок был согласован с апертурой активного элемента.

Для исследования системы использовались два измерителя энергии излучения ИКТ-1М и ИКТ-1Н и коаксиальный фотоэлемент ФЭК-1, с помощью которого измерялась мощность лазерной генерации. Один из измерителей определял энергию прямого пучка, выходящего из

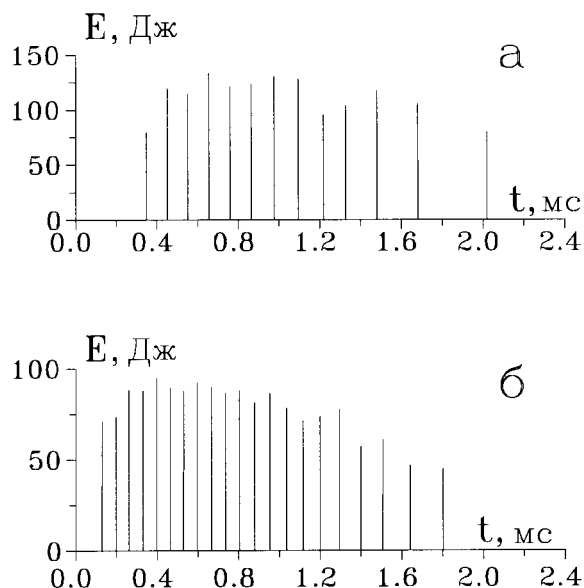


Рис. 2. Многоимпульсная генерация лазера: *а* — 55%-ный фильтр, *б* — 70%-ный фильтр.

активного элемента, а другой — обратного, возвращающегося из многопроходной системы в лазер. По этим измерениям определялась энергия зондирования. Сигнал с ФЭК-1 оцифровывался шестью 7-разрядными АЦП с тактовой частотой 10–40 МГц.

При 28–30 проходах луча до 80% излучения возвращалось из многопроходной системы в кристалл, что соответствует 25–27-кратному увеличению энергии зондирования. Эффективная длина лазерного резонатора при этом составляет около 70 м. Для управления системой применялись два фототропных фильтра с начальным пропусканием 55 и 70%. С первым фильтром большая часть запасенной инверсии используется для генерации импульса, что увеличивает энергию и мощность излучения в импульсе. При этом частота генерации импульсов и их число становятся меньше. Цуги зондирующих импульсов, полученные с 70 и 55%-ными фильтрами, показаны на рис. 2. Полная энергия зондирования в обоих случаях превышает 1500 Дж. Средняя мощность

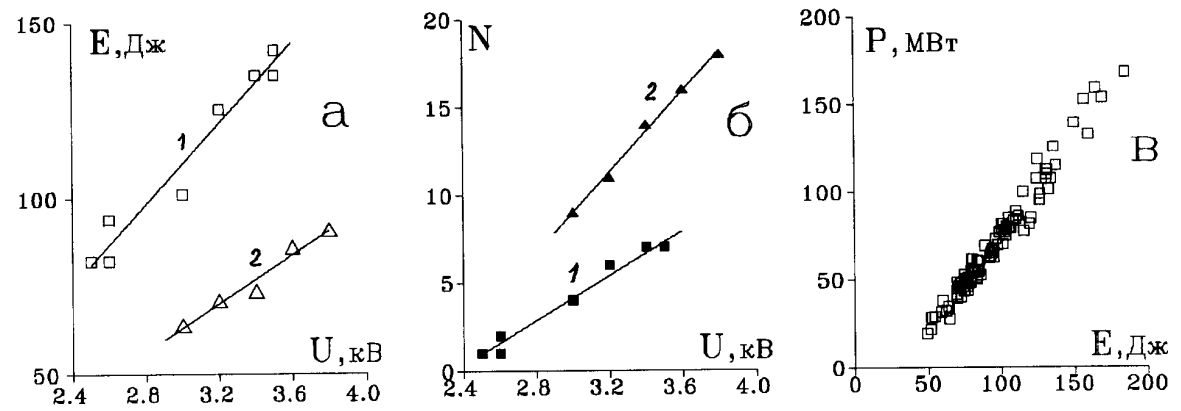


Рис. 3. *a* — зависимость энергии в лазерном импульсе от накачки лазера: 1 — 55%-ный фильтр, 2 — 70%-ный фильтр; *б* — зависимость числа импульсов в генерации от накачки лазера, 1 — 55%-ный фильтр, 2 — 70%-ный фильтр; *в* — зависимость между мощностью и энергией зондирующего лазерного импульса.

излучения в импульсах составляет 50 и 115 МВт соответственно. Энергия и мощность в импульсе, а также их число варьируются с помощью накачки и фильтров (рис. 3). Частота генерации импульсов в основном определяется пропусканием фильтра, немного снижаясь при уменьшении уровня накачки. Как видно из рисунков, с 70 %-ным фильтром лазер обеспечивает цуг генерации из 20 импульсов с частотой следования до 15 кГц.

Из-за большой длины резонатора длительность лазерных импульсов составляет 1–2 мкс, что совсем не типично для томсоновской диагностики. Тем не менее мощность зондирования вполне достаточна для превышения сигнала рассеяния над фоновым излучением плазмы. Измерения свечения плазмы показали, что его вычитание в томсоновских измерениях при таких длительностях сигнала проводится корректно.

Энергия и мощность зондирования в экспериментах были ограничены с тем, чтобы плотность энергии на активном элементе в импульсе была не выше 5 Дж/см² в импульсе. Но даже с таким ограничением новая система обеспечивает примерно 20-кратное увеличение энергии зондирования в каждом импульсе по сравнению с обычной схемой. При этом она обеспечивает многократный режим измерений с частотой до 15 кГц. Накопление сигналов от всех импульсов цуга генерации позволяет повысить чувствительность томсоновской диагностики примерно в 300 раз. При использовании элемента с большей предельной допустимой плотностью энергии зондирующий импульс может быть дополнительно усилен как с помощью накачки, так и установкой более плотного фототропного фильтра.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ, грант № 95-02-04072.

Список литературы

- [1] *Van Lammeren A.C.A.P., Barth C.J., van Est Q.C. et al. // Nuclear Fusion. 1992. V. 32. N 4. P. 655.*
- [2] *Kantor M.Yu., Razdobarin G.T. // 6th Intern. Sympos on Laser Aided Plasma Diagnostics. Bar Harbor, USA, 1993. P. 267.*
- [3] *Гусев В.К., Кантор М.Ю., Раздобарин Г.Т. Авт. свид. № 1421072 // Открытия и изобретения. 1990. № 8. С. 286.*
- [4] *Акатова Т.Ю., Булыгинский Д.Г., Завадский В.М. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 2. С. 166.*