УДК 621.039.665 (533.924)

МНОГОСЛОЙНОЕ ЗЕРКАЛО ТОМСОНОВСКОЙ ДИАГНОСТИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ТОКАМАКЕ Т-10

В.В. Андреев¹, Н.В. Емельяненко¹, А.А. Скворода²¹Российский университет дружбы народов, Москва, Россия²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Проведено исследование изменения свойств зеркал лазерного резонатора томсоновской диагностики в эксперименте на токамаке Т-10. Предложенный комплекс измерений составляет основу технологии проверки и отбраковки зеркал для обеспечения надёжности и качества диагностики. Обнаружена эрозия просветлённой области окна ввода лазерного излучения в резонатор, что заметно влияет на работоспособность диагностики. Причины такой эрозии неясны. Не обнаружено влияния углеродных плёнок на характеристики зеркал.

Ключевые слова: многослойные зеркала, томсоновская диагностика, лазер, коэффициенты отражения и пропускания, эрозия покрытия.

MULTI-LAYER MIRROR FOR THOMSON SCATTERING DIAGNOSTIC EXPERIMENT ON T-10 TOKAMAK

V.V. Andreev¹, N.V. Emelyanenko¹, A.A. Skovoroda²¹People Friendship University of Russia, Moscow, Russia²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The study of changes in the properties of the laser cavity mirrors for Thomson scattering diagnostic experiment on T-10 tokamak is carried out. Fullfilled measurement provides the technology of mirrors validation and rejection to ensure the reliability and quality of the diagnostic. It is detected the erosion of enlightened input window for the laser radiation, which significantly affect the efficiency of diagnostic. The reasons for the erosion are unclear. Influence of carbon films on the characteristics of mirrors has not been detected.

Key words: multi-layer mirrors, Thomson diagnostic, laser, reflection and transmission coefficients, surface erosion.

ВВЕДЕНИЕ

Томсоновское рассеивание лазерного излучения является основной диагностикой для измерения пространственного распределения электронной температуры и плотности плазмы в токамаке Т-10 [1—3]. Одним из ключевых внутрикамерных узлов этой диагностики, определяющим её работоспособность, является многослойное зеркало (рис. 1).

Рис. 1. Ввод лазерного излучения в Т-10: 1 — окно для приёма рассеянного излучения; 2 — верхнее зеркало; 3 — луч лазера; 4 — плазма; 5 — нижнее зеркало с прозрачным полем для ввода излучения лазера

Рис. 2. Нижнее зеркало: 1 — поле ввода лазерного луча диаметром 15 мм; 2 — область засветки отражённым лучом лазера при многократных отражениях; 3 — область вакуумного уплотнения зеркала шириной 2 мм

ся многослойное зеркало (рис. 1).

Лазерное излучение с длиной волны 527,5 нм (1—8 импульсов длительностью 35 нс каждый, энергия 3 Дж/имп.) вводится снизу токамака в оптический резонатор многопроходной системы, образованной двумя софокусными (расстояние между зеркалами 2400 мм, радиус сферической кривизны 1200 мм) многослойными (24 чередующихся нанослоя из окиси кремния и окиси циркония на кварцевой подложке следующего состава: $\text{SiO}_2 \sim 70\%$, $\text{K}_2\text{O} \sim 15\%$, $\text{BaO} \sim 15\%$) зеркалами диаметром 52 мм (рис. 2). Фокусировка лазерного луча в центре плазмы и многократное отражение лазерного луча увеличивают интенсивность рассеянного излучения и тем самым отношение сигнал—шум диагностики.

Нижнее зеркало имеет просветлённую плоскую поверхность, расположенную на атмосфере, и вогнутую зеркальную поверхность в вакууме с просветлённым полем диаметром 15 мм без многослойного покрытия для ввода широкого полого лазерного пучка. Луч лазера имеет внешний диаметр 14 и внутренний 5,6 мм, т.е. энергия сосредоточена в кольце. Центр светлой области диаметром 5,6 мм не подвергается облучению лазера. Верхнее зеркало имеет сплошное многослойное покрытие на обращённой в вакуум вогнутой стороне.

Опыт эксплуатации диагностики в условиях токамака Т-10 показал, что наиболее слабым звеном оказывается нижнее зеркало, которое достаточно быстро получает механические повреждения под воздействием лазерного излучения. Эти повреждения не возникают при стендовых испытаниях зеркал при используемом в эксперименте уровне мощности лазерного излучения. Настоящая работа посвящена поиску объяснений такого поведения зеркал с целью увеличения надёжности работы диагностики. Изучаются характеристики зеркал и состояние их поверхностей до и после эксперимента. Обращается внимание на влияние углеродных плёнок и пыли, которые могли бы образовываться или попадать на поверхность зеркала при работе токамака.

В первом разделе изучаются макроскопические характеристики зеркал, такие, как радиус кривизны и его постоянство на вогнутой поверхности зеркал, плоскостность базовой поверхности зеркал и прохождение базовой оси кривизны вогнутой поверхности в центре зеркала (центр кривизны зеркала), отражательная способность зеркала. Эти характеристики влияют на характер и качество юстировки диагностики на токамаке. Сложность юстировки может приводить при неблагоприятных обстоятельствах к порче зеркал (например, выход луча за пределы прозрачного поля и пр.). В последующих разделах изучается микроскопическое качество поверхности на различных участках зеркал, использованных в диагностической кампании на Т-10 (многослойное покрытие, поле ввода луча лазера, область перехода от поля ввода к многослойному покрытию), с акцентом на дефекты зеркал (пыль, трещины и др.). В Заключение делаются выводы и рекомендации.

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕРКАЛ

Для измерения радиуса кривизны, плоскостности и положения центра кривизны зеркала использовался профилометр Dektak 150. Технология измерения включала выравнивание с точностью 100 нм поверхности платформы профилометра, на которую плоской стороной устанавливались исследуемые зеркала, и многократное сканирование под различными углами. Для изучения были выбраны три зеркала, два из которых использовались в эксперименте на Т-10.

На рис. 3 показаны результаты сканов типичного нижнего зеркала, применявшегося в эксперименте.

Рис. 3. Профили типичного нижнего зеркала, использованного в эксперименте: направления сканов (а), скан 1 (б), скан 2 (в), скан 5 (г), скан 3 (д), скан 4 (е); — положение максимальной глубины

На рис. 3—6, 10, 11 по оси абсцисс отложена величина длины скана, начиная с края зеркала, по оси ординат — глубина, отсчитываемая тоже с края зеркала (начала скана). Направление сканов отмечено стрелками на отдельных рисунках (см. рис. 3, а). При радиусе кривизны 1200 мм максимальная глубина должна быть 260,4 мкм, что находится в хорошем соответствии с измерениями 268 ± 10 мкм. Положение центра кривизны совпадает с центром зеркала с хорошей точностью (расстояние от края зеркала 25 ± 1 мм).

Рис. 4. Диаметральный скан лучшего зеркала

Рис. 5. Профили худшего нижнего зеркала: а — направления сканов, б* — положение центра кривизны; б — скан 1; в — скан 2; г — скан 5; д — скан 3; е — скан 4; — положение максимальной глубины

Рис. 6. Неплоскость обратной стороны наихудшего зеркала

на отдельных рисунках (см. рис. 3, а). При радиусе кривизны 1200 мм максимальная глубина должна быть 260,4 мкм, что находится в хорошем соответствии с измерениями 268 ± 10 мкм. Положение центра кривизны совпадает с центром зеркала с хорошей точностью (расстояние от края зеркала 25 ± 1 мм).

Заметим, что вклад в неточность измерений вносит невозможность идеально точно поставить зеркало на платформу профилометра, вызванная неплоскостью обратной стороны зеркала и изменением толщины кварцевой заготовки при изготовлении зеркала. На рис. 4 показан диаметр-

ральный скан лучшего из использованных в эксперименте зеркала с идеальной плоскостью основания подложки. Мы видим идеальное совпадение с заданными параметрами. Для сравнения на рис. 5 показаны сканы плохого зеркала, которое не применялось в эксперименте. На рис. 5, а показаны направления сканов и недопустимо сильно смещённое положение центра кривизны.

Причину такого плохого качества этого зеркала, возникшего на стадии его изготовления, мы нашли в достаточно большой неровности обратной стороны. На рис. 6 показан диаметральный скан «плоской» стороны, который демонстрирует выпуклость поверхности с макси-

мальной высотой 2,2 мкм. Всплески на рисунке отражают наличие крупных пылевых частиц с высокой адгезией. Этот дефект кварцевой заготовки зеркала и привёл к браку при производстве.

Таким образом, все зеркала отличаются своими геометрическими характеристиками. В эксперименте необходимо использовать зеркала с хорошими, соответствующими паспортным значениям характеристиками, что требует их предварительной проверки на профилометре и отбраковки. Недопустимым оказалось несовпадение геометрического центра зеркала с центром кривизны более чем на 10 мм.

Изучение отражательных и пропускающих характеристик зеркал проводилось на спектрофотометре LAMBDA 950 с точностью $\sim 1\%$. На рис. 7 сравниваются отражательные характеристики в центре зеркал.

Видно, что на длине волны лазера 527,5 нм зеркала, как правило, обладают высоким коэффициентом отражения в спектральном окне ~ 100 нм. Однако пример зеркала 3 указывает на необходимость отбраковки зеркал по малости коэффициента отражения в нужном диапазоне длин волн.

На рис. 8 сравниваются коэффициенты пропускания излучения лазера через просветлённое поле диаметром 15 мм на нижних зеркалах.

Коэффициент пропускания на длине волны лазера не превышает 90% у неиспользованного зеркала. Для использованных зеркал он может падать до 75%. Причину такого падения пропускания мы связываем с обнаруженным (см. рис. 10) разрушением просвечивающего покрытия со стороны вакуума. Верхнее зеркало, которое не содержит просветлённой области, естественно демонстрирует хорошее отражение, т.е. низкий коэффициент прохождения. Зеркало 3 сильно отличается по всем показателям. Оказалось, что оно было изготовлено в другом месте, и мы связываем обнаруженные отличия с нарушением технологии изготовления.

На рис. 9 сравниваются отражательные характеристики с зеркальной стороны в центре просветлённой области 15 мм. Видно, что по сравнению с неиспользованными зеркалами существенно возрастает отражение от этой поверхности.

Рентгеноструктурный анализ окисных плёнок зеркал показал наличие циркония ($\sim 3\%$) и мышьяка ($\sim 2\%$). Зеркало 3 на рис. 7 отличалось отсутствием мышьяка.

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ

Для микроскопического исследования качества поверхности зеркал использовался профилометр Dektak 150. По техническим причинам просканировать поле для ввода лазерного излучения 1 (см. рис. 2)

Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от длины волны λ в центре не стоявшего в токамаке зеркала (0), использованных верхнего (0') и нижних зеркал (2, 3)

Рис. 8. Спектральная характеристика коэффициента пропускания в центре просветлённой области диаметром 15 мм не стоявшего в токамаке зеркала (0), использованных верхнего (4) и нижних зеркал (1—3)

Рис. 9. Спектральная характеристика коэффициента отражения в центре просветлённой области диаметром 15 мм не стоявшего в токамаке зеркала (0), использованных нижних зеркал (1—3)

за один проход с высоким разрешением оказалось невозможным. На рис. 10 показаны два скана вдоль одной хорды через центр поля с захватом перехода на многослойное зеркальное покрытие. С левого (а) и

Рис. 10. Левый (а) и правый (б) сканы просветлённой области

правого (б) краёв видны эти резкие переходы. Обращает на себя внимание локальная область эрозии шириной ~ 2 мм и глубиной $\sim 0,2$ мкм на обоих сканах. Характерный радиус ~ 5 мм указывает на формирование внутри окна кольца эрозии, совпадающего с размером вводимого кольцевого лазерного луча. На рис. 11

Рис. 11. Кольцевой слой эрозии в поле ввода лазерного луча

но мы не нашли явных признаков напыления металлических и диэлектрических плёнок на зеркалах токамака Т-10 ни от плазмы, ни от чистящих разрядов, которые сильно меняли бы отражательные свойства зеркал (см. рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что все зеркала отличаются своими геометрическими и отражательными характеристиками. Для улучшения надёжности и качества диагностики необходимо использовать зеркала с одинаковыми, соответствующими паспортным значениям характеристиками, что невозможно без их предварительной проверки и отбраковки. Предложенный комплекс измерений может составить основу технологии проверки и отбраковки зеркал для обеспечения надёжности и качества диагностики.

Обнаружена эрозия просветлённой области, что заметно снижает интенсивность вводимого излучения лазера (см. рис. 8). Хотя причины такой эрозии неясны, но снижение мощности лазера является очевидным способом решения этой проблемы. Если этот способ не подходит, то нужно использовать другие материалы для просветляющих покрытий и проводить испытания зеркал на специальном вакуумном лазерном стенде.

Не обнаружено влияния углеродных плёнок на характеристики зеркал в процессе эксперимента на токамаке T-10. К этому выводу нас приводят отсутствие изменения коэффициента отражения на рис. 7 и сильное падение пропускания на рис. 8 из-за деградации просвечивающего покрытия для работавших зеркал по сравнению с неработавшими.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госконтракта № 14.740.11.1376 и частично поддержана грантом НШ-4361.2012.2 Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ.

REFERENCES

1. Gorshkov A.V., Barth C.J., Bel'bas I.S., Donné A.J.H., Maslov M.V., v.d. Meiden H.J., Oyevaar T., Razumova K.A., Sannikov V.V., Sannikov O.V. — In: Proc. 11th Intern. Symp. on Laser-Aided Plasma Diagnostics. Les Houches, France, 2003, P-20.
2. Bel'bas I.S., Gorshkov A.V., Sannikov V.V. — In coll.: 34-th Zvenigorod conference on plasma physics and CTF. 12—16 February 2007; <http://plasma.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXIV> (in Russian).
3. Bel'bas I.S., Gorshkov A.V., Sannikov V.V. — In coll.: 36-th Zvenigorod conference on plasma physics and CTF. 9—13 February 2009; <http://plasma.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVI> (in Russian).

AUTHORS

Andreev V.V. People Friendship University of Russia, Miklukho-Maklaya str. 6, 117198, Moscow, Russia
vvandreev@mail.ru

Emelyanenko N.V. People Friendship University of Russia, Miklukho-Maklaya str. 6, 117198, Moscow, Russia; nata_ice-floe@mail.ru

Skovoroda A.A. NRC "Kurchatov Institute", pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; skovorod@nfi.kiae.ru

Received 19 July 2013
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Termoyadernyi sintez, 2013, vol. 36, issue 4, pp.70—75