

Рефлектометр с лазерно-плазменным источником для аттестации рентгенооптических элементов

С.А.Гарахин¹, С.С. Морозов¹, В.Н. Полковников¹, Н.И. Чхало¹, А.Е. Пестов¹, Р.М. Смертин¹

¹ Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия

Последние несколько десятилетий оптика рентгеновского диапазона претерпевает бурный рост. Для аттестации многослойных зеркал и фильтров необходимы рефлектометры для прецизионных измерений спектральных и угловых зависимостей коэффициентов отражения и пропускания оптических элементов. Разработанный в ИФМ РАН рефлектометр работает в диапазоне длин волн 4-50 нм. Для монохроматизации излучения используется высокоразрешающий спектрометр Черни-Тюрнера с плоской дифракционной решеткой и двумя коллимирующими зеркалами. Источником рентгеновского излучения является высокоионизованная плазма, генерируемая при взаимодействии мощного лазерного пучка (плотность мощности 10^{11} - 10^{12} Вт/см²) на твердотельную мишень. Гониометр обеспечивает пять степеней свободы для образца с диаметром до 500 мм и две степени свободы для детектора.

За последнее время рефлектометр претерпел значительные конструкционные улучшения: разработана новая камера лазерно-плазменного источника с газодинамической защитой оптических элементов, реализована новая оптическая схема монохроматора и системы формирования зондирующего пучка. Проведены работы по оснащению гониометра линейными и угловыми датчиками положения.

Для максимального увеличения интенсивности регистрируемого излучения и минимизации размера изображения источника была разработана и собрана новая рентгенооптическая схема рефлектометра.

Общая длина монохроматора в этой модели составляет около 2 метров, что даёт значительный оптический рычаг, положительно влияющий на монохромизирующие свойства прибора. В схеме оба оптических рычага имеют одинаковую длину, поэтому изображение источника не увеличивается, что улучшает минимально достижимый размер источника. Эта схема также позволяет работать без входной щели, что означает, что больше фотонов попадает в монохроматизирующую систему и больше фотонов попадает на детектор. В новом монохроматоре используются новые внеосевые параболические коллимирующее и фокусирующее зеркала.

Подложки зеркал M1 и M2 одинаковы, и, согласно схеме, стремились изготовить два идентичных внеосевых параболических цилиндра. PV асферизации составил 80 мкм. В результате удалось достичь среднеквадратичного отклонения 30 нм от идеального (смоделированного) параболического цилиндра с фокусным расстоянием 948,75 мм для этих зеркал. Для формирования зондирующего пучка на образце

используется тороидальное зеркало. Принцип его действия заключается в следующем: в вертикальной плоскости тороид формирует изображение источника излучения, а в горизонтальной плоскости – выходной щели. Разработана и собрана новая камера источника. Была модернизирована конструкция мишени-барабана, имеющая меньшие механические биения для повышения стабильности положения лазерной искры. Добавлена газодинамическая и магнитная защита оптических элементов от продуктов эрозии мишени. Излучение лазера, работающего в режиме модулированной добротности (рабочая длина волны 1064 нм, частота следования импульсов 10 Гц,) с помощью длиннофокусной линзы фокусируются на мишени в пятно, диаметром около 50 мкм. Калибровка монохроматора осуществлялась по краям поглощения свободновисящих фильтров Be, Al, MoZrSi₂, MoSi₂ и ZrSi. Размер зондового пучка на образце измерялся ножевым методом и составил 0,25 мм. Регистрации рентгеновского излучения производится с помощью детектора монитора из микроканальных пластин.



Рис. 1. Внешний вид модернизированного рефлектометра.

Рефлектометр оснащен гониометром, позволяющим снимать спектральные зависимости для углов, не превышающими 89°. Для повышения точности перемещений гониометр был оснащен 2 линейными и 5 угловыми датчиками положения. Ведутся работы по реализации автоматических измерений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ РАН FFUF-2024-0022.

1. S. A. Garakhin, N. I. Chkhalo, I. A. Kas'kov et al. // Rev. Sci. Instrum. (2020). V. 91. P. 063103C.A.
2. Н. В. Загайнов, С. А. Гарахин, С. С. Морозов, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало, ЖТФ, 95:10 (2025)