ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 535.417.26

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

И.А. Биленко, Е.С. Громова

(кафедра физики колебаний) E-mail: igorbilenko@phys.msu.ru

Предлагается описание оригинальной методики для диагностики отражающих покрытий. С ее помощью исследованы многослойные зеркала, применяемые в лазерных гравитационных антеннах. Обсуждается возможное влияние обнаруженных дефектов на чувствительность антенн.

Введение

Использование диэлектрических зеркал с многослойными отражающими покрытиями позволяет создавать оптические резонаторы с резкостью F, достигающей $10^5 \dots 10^6$. Применение таких резонаторов и мощных высокостабильных лазеров дает возможность измерять рекордно малые перемещения и ускорения. В существующих лазерных гравитационных антеннах минимальная регистрируемая амплитуда относительных колебаний зеркал составляет $h = 10^{-16}$ см в полосе 1 Гц на частоте 100 Гц, в антеннах следующего поколения эта величина должна быть еще на порядок меньше.

Наличие дефектов в покрытиях зеркал может быть фактором, ограничивающим возможность дальнейшего повышения чувствительности таких систем. Так, дополнительный нагрев дефектных областей может привести к увеличению термоупругих шумов [1], а при определенных условиях — к повреждению покрытия.

Известно много методов исследования оптических свойств многослойных покрытий. Один из самых чувствительных методов — это измерение фототепловых деформаций [2]. С использованием этого метода в работе [3] были выполнены измерения поглощения и рассеяния с использованием различных масштабных окон. Пространственное разрешение составляло 3 мкм, порог детектирования 10^{-7} для поглощения и 10^{-8} для рассеяния. В настоящее время существуют быстродействующие фототепловые микроскопы, использующие ССD матрицы [4].

В настоящей работе предлагается метод сканирования покрытий, основанный на одновременном измерении интенсивности прошедшего и рассеянного света. Отличие предлагаемого метода состоит в высоком пространственном разрешении (порядка 1 мкм) и возможности получения большой (до $W_s = 300 \text{ кBr/см}^2$) плотности мощности непрерывного излучения на поверхности образца.

Метод был использован для исследования покрытий Ta_2O_5/SiO_2 , имеющих максимальный коэффициент отражения для излучения с длиной волны $\lambda = 1.064$ мкм.

1. Описание экспериментальной установки

Нами использовался CW YAG лазер LightWave 1064-100 мощностью 100 мВт. Фокусировка производилась с помощью асферической оптики, что позволяло получить размер фокального пятна, близкий к дифракционному пределу. Исследовались пластинки из плавленого кварца толщиной 100 мкм размером 2 × 0.5 см с покрытием из 20 слоев Та₂O₅/SiO₂. Средний коэффициент пропускания по мощности составлял $T = 5 \cdot 10^{-3}$. Образец и линзы находились в вакуумной камере (рис. 1). Перемещение образца производилось при помощи пьезокерамической подачи (по оси У) и прецизионных шаговых двигателей (по оси X и вдоль оптической оси Z для точной фокусировки). Подача обеспечивала ограниченный диапазон перемещений (10 мкм), но большую скорость и отсутствие люфта, в то время как диапазон перемещения двигателей составлял 2.5 см. Движение передавалось в камеру через гибкий сильфон. Точность позиционирования составляла 0.5-1 мкм и ограничивалась деформациями крепления. Сканирование производилось полосами 200 × 10 мкм, время сканирования одной полосы 2 мин.

Прошедший свет попадал на фотодетектор, величина рассеяния оценивалась с помощью фотоумножителя. Точность измерения коэффициента пропускания и относительных изменений рассеяния составляла 1% и 0,5% соответственно. Основным фактором, ограничивающим точность, были флук-



Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования отражающих покрытий

туации, возникающие при перемещении образца и связанные с попаданием в детекторы света, рассеянного на его задней поверхности, фокусирующих линзах и стенках камеры.

Управление сканированием и запись информации производились компьютером под управлением специальной программы в среде LabView. Дополнительно регистрировались изменения прохождения и рассеяния при длительном (до 30 мин) воздействии лазерного излучения на одну точку и переходные процессы, происходящие за время $10^{-3} \div 1$ с после включения лазера.

2. Экспериментальные результаты

Были измерены пространственные распределения коэффициентов пропускания и рассеяния для пяти образцов. Всего было просканировано 85 полос, общая площадь 0.5 мм², некоторые полосы сканировались многократно, до и после повторной очистки для проверки повторяемости результатов. Примеры получаемых зависимостей приведены на рис. 2.

В эксперименте были обнаружены области с характерными размерами от 3 до 20 мкм, в которых отличие коэффициентов пропускания и/или рассеяния от своих средних значений составляло от 1% до 1.5–2 раз как в большую, так и в меньшую сторону.

Всего обнаружена 81 такая область, общая площадь их составила 0.008 мм², или 1.5% от общей обследованной площади. Примерно в 20% областей, в которых пропускание отличалось от среднего, рассеяние превышало среднее по образцу значение. В 9 областях, в которых рассеяние значимо отличалось от средней величины, отклонение коэффициента пропускания не превысило 1%. Повторная очистка не влияла на эти области. Напротив, пылинки, которые так же наблюдались в эксперименте в виде точек размером менее 5 мкм с большим (в 2 и более раз превышающим среднее значение) рассеянием, исчезали после промывки.



Рис. 2. Зависимости коэффициента пропускания (вверху) и относительной величины рассеяния на поверхности (внизу) от координат

В пределах погрешности измерений не было обнаружено изменений, происходящих под воздействием лазерного излучения с плотностью мощности до $W_s = 300 \text{ кBt/cm}^2$ за время от 10^{-3} с до 30 мин, как в областях со средним, так и с аномальным рассеянием и поглощением.

Основываясь на результатах измерений, можно сделать оценку максимально возможного дополнительного нагрева, возникающего в дефектных областях. Рассмотрим области, в которых пропускание было на 10% меньше среднего ($T = 4.5 \cdot 10^{-3}$ вместо $5 \cdot 10^{-3}$), а избыточного рассеяния не наблюдалось. Можно предположить, что излишек энергии ($5 \cdot 10^{-4}$ от падающей волны) поглощался дефектом. Согласно [5], в пределе, когда коэффициент теплопроводности покрытия k_f много больше, чем у подложки, изменение температуры ΔT_0 в центре фокального пятна

$$\Delta T_0 = \frac{W_{\text{ads}}}{2\sqrt{\pi}k_f d} \simeq 0.06 \text{ K.}$$
(1)

В нашем случае (мощность лазерного луча, сфокусированного на дефект, W = 50 мВт) мощность поглощаемая дефектом $W_{ads} = 25$ мкВт, $k_f = 33$ Вт/мК, $d = 10^{-6}$ м.

Такой слабый нагрев не может стать причиной повышения уровня термоупругих шумов. Можно также отметить, что, поскольку суммарная площадь обнаруженных дефектов не превышает 2% от площади зеркала, их влияние на резкость резонаторов с такими зеркалами может быть пренебрежимо мало, если площадь светового пятна на зеркале

достаточно велика. В то же время для пучков с малым поперечным сечением (менее 20 мкм на зеркале) возможно значительное падение резкости.

Выводы

Разработана методика диагностики отражающих наноструктур с высоким пространственным разрешением, создана экспериментальная установка и проведено тестирование многослойных диэлектрических зеркал. Получены пространственные распределения коэффициентов прохождения и рассеяния для образца зеркала с покрытием Ta₂O₅/SiO₂. Обнаружены области с аномальным рассеянием и пропусканием, что, предположительно, связано с дефектами многослойной структуры.

Литература

- Braginsky V.B., Vyatchanin S.P. // Phys. Lett. A. 2003. 312. P. 244.
- Wu Z.L., Thomsen M., Kuo P.K. et al. // Opt. Eng. 1997. 36, N 1. P. 251.
- Gatto A., Commandre M. // Applied Optics. 2002. 41, N 1. P. 225.
- Stolz C.J., Chinn D.J., Huber R.D. et al. // Annual symposium on optical materials for high power lasers. 2003. Boulder. Report Number UCRL-CONF-153485.
- Abraham E., Halley J.M. // Appl. Phys. A. 1987. 42. P. 279.

Поступила в редакцию 10.03.2008