

17. Исследование модуляции показателя преломления брэгговских дифракционных решеток

Е. Ким, М. В. Шишова, С. Б. Одинок

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

В работе предоставлено исследование модуляции показателя преломления с помощью дифрактометрии брэгговских дифракционных решеток. Метод основан на измерении контура угловой селективности дифрагированного пучка. Модуляция показателя преломления дифракционной решетки вычисляется в три этапа: получение экспериментальных данных на разработанном стенде, аппроксимация и сравнение полученного контура с математической моделью, сформированной по теории связанных волн.

Ключевые слова: Оптика, Голография, Дифракционные оптические элементы, Модуляция показателя преломления, Селективность.

Цитирование: **Ким, Е.** Исследование модуляции показателя преломления брэгговских дифракционных решеток / Е. Ким, М. В. Шишова, С. Б. Одинок // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 111–116.

Введение

Брэгговские дифракционные решетки распространены в различных областях фотоники: в лазерной технике для спектральной фильтрации, в голографии, для создания систем дополненной реальности и др. Ключевыми параметрами брэгговских решеток являются толщина и модуляция показателя преломления — фазовая характеристика фоточувствительной среды. Эти параметры оказывают наибольшее влияние на дифракционную эффективность фазовых объемных решеток [1].

В зависимости от условий записи брэгговских дифракционных решеток по-разному используется динамический диапазон фоточувствительной среды. Измерения модуляции показателя преломления показывают, насколько изменился показатель преломления в области записи, и позволяют корректно регулировать дозу излучения в процессе экспонирования. При неправильно подобранной экспозиции и проведении мультиплексирования, модуляция показателя преломления будет отличаться от рассчитанной на основе экспозиционной характеристики фоточувствительного материала. Следовательно, несоответствие дифракционной эффективности ожидаемому значению связано с неэффективным использованием модуляции показателя преломления среды.

Целью данной работы является разработка метода измерения модуляции показателя преломления с погрешностью 10^{-5} . Для этого предложен метод лазерной дифрактометрии, и разработан экспериментальный стенд для измерения контура угловой селективности. В данной работе не рассматриваются среды, в которых брэгговские дифракционные решетки создаются посредством амплитудной модуляции коэффициента поглощения.

В дифрактометрии решается обратная задача: производится предварительное моделирование, измерение дифракционной эффективности, и на основе этих значений получают информацию об исследуемой дифракционной решетке. В нашем случае, варьируется величина углового отклонения от условия Брэгга, и в пределах контура селективности измеряется дифракционная эффективность. Эта зависимость является данными для последующей аппроксимации [2]. Модуляция показателя преломления вычисляется в три этапа: оптические измерения на разработанном стенде, аппроксимация экспериментальных данных в виде контура угловой селективности и поиск полученного контура в предварительно сформированной библиотеке. Библиотека базируется на моделировании различных контуров селективности для заданного значения толщины дифракционной решетки. Моделирование проводится по теории связанных волн Когельника [3].

1. Моделирование зависимости контура угловой селективности от модуляции показателя преломления

Рассмотрим зависимость контура угловой селективности от модуляции показателя преломления. Дифракционная эффективность пропускающей фазовой брэгговской решетки в соответствии с теорией Когельника вычисляется

$$\eta = \frac{\sin^2(\xi^2 + \Phi^2)^{1/2}}{1 + \frac{\xi^2}{\Phi^2}}, \quad (1)$$

где Φ — набег фазы или коэффициент расфазировки, ξ — параметр рассогласования.

Набег фазы определяет максимальную дифракционную эффективность брэгговской решетки при выполнении условия Брэгга и определяется по формуле

$$\Phi = \frac{\pi t \delta n}{\lambda_0 F_\varphi}, \quad (2)$$

где t — толщина, δn — модуляция показателя преломления, λ_0 — центральная длина волны, F_φ — это коэффициент наклона.

Коэффициент наклона описывается формулой

$$F_\varphi = \sqrt{-\cos(\varphi - \theta_m^*) \cos(\varphi + \theta_m^*)}, \quad (3)$$

где θ_m^* — угол падения Брэгга, φ — угол наклона поверхности одинаковой фазы решетки.

Параметр рассогласования ξ в формуле (1) учитывает малые угловые отклонения $\Delta\theta_m$ от угла падения Брэгга θ_m^* и/или небольшие отклонения от центральной длины волны λ_0 , описывается формулой

$$\xi = \frac{\pi f t}{\cos(\varphi - \theta_m^*) - \frac{f \lambda_0}{n_{av}} \cos \varphi} \left[\Delta\theta_m \sin \theta_m^* - \frac{f}{2n_{av}} \Delta\lambda \right], \quad (4)$$

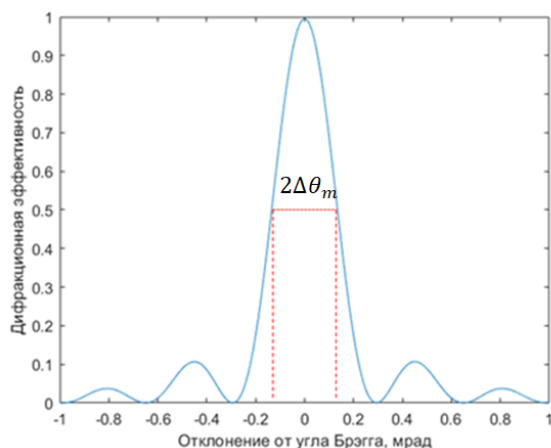


Рис. 1. График зависимости дифракционной эффективности от отклонения от угла Брэгга

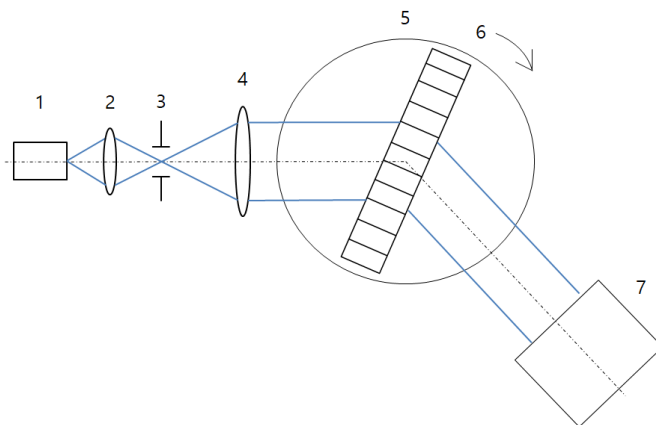
где f — пространственная частота, n_{av} — средний показатель преломления среды, $\Delta\theta_m$ — угловое отклонение от условия Брэгга, $\Delta\lambda$ — спектральное отклонение от условия Брэгга.

Дифракционную эффективность брэгговской решетки можно определить, подставив уравнение (2) и (4) в уравнение (1).

$$\eta(\Delta\theta_m) = \frac{\sin^2\left(\pi t \sqrt{\frac{\delta n}{\lambda_0 F_{\pi/2}}}\right)}{1 + \left(\frac{\lambda_0 f F_{\pi/2} \Delta\theta_m}{\delta n}\right)^2}. \tag{5}$$

На основе формулы (5) формируется график зависимости дифракционной эффективности от величины отклонения от брэгговского угла, как показано на рисунке 1. Представленный контур рассчитан для дифракционной решетки с параметрами: $t = 2,6$ мм, $n_{av} = 1,4867$, $f = 1086$ мм⁻¹, $\lambda_0 = 555$ нм, $\delta n = 0,002$. Такие контуры селективности для различных значений δn формируют исходную библиотеку для априорно заданных параметров: пространственной частоты f , толщины t и угла наклона φ поверхностей одинаковой фазы (штрихов) для брэгговской решетки. Как правило, эта информация известна. Длина волны λ_0 соответствует длине волны лазера, применяемого в измерительном стенде. Аналогичные выкладки реализованы для отражательных решеток.

Вид контура селективности определяет требования по угловому разрешению поворотного позиционера в измерительном стенде. Для проведения корректной аппроксимации экспериментальных данных должно быть измерено не менее 10 точек в пределах всех гармоник с дифракционной эффективностью выше 1%. Данное условие определяет разрешение поворотного столика в экспериментальном стенде. Например, для контура селективности на рисунке 1 угловая селективность составляет $2\Delta\theta_m \approx 0,3$ мрад, а эффективные пики на графике наблюдаются в пределах от 2 мрад. Тогда разрешение поворотного столика должно быть не менее $\Delta\gamma = 0,2$ мрад.



1 — лазер, 2 — микрообъектив, 3 — пинхол (точечная диафрагма), 4 — коллиматор, 5 — брэгговская дифракционная решетка, 6 — поворотный столик, 7 — приемник излучения

Рис. 2. Экспериментальный стенд

2. Экспериментальный стенд

Для реализации метода исследования был разработан стенд, схема которого показана на рисунке 2 учетом всех технологических соображений.

Перед началом исследования лазер следует прогреть до выхода на стабильный по мощности режим работы с низкой флуктуацией в области записи. Процесс измерения чувствителен к колебаниям схемы и турбулентностям воздуха, поэтому экспериментальный стенд следует виброизолировать и по возможности располагать в комнате, где включена вентиляция и поддерживается стабильный режим температуры.

Излучение лазера 1 сужается и фильтруется с помощью микрообъектива 2 и пинхола 3. После пинхола устанавливается коллиматор 4 для получения параллельного оптической оси пучка с плоским волновым фронтом. Затем излучение падает на брэгговскую дифракционную решетку 5, где происходит дифракция в направлении приемника излучения 7. Приемник излучения фиксирует интенсивность дифрагированного пучка излучения. Брэгговская дифракционная решетка устанавливается на поворотном столике 6 для того, чтобы получать различные дискретные значения дифракционной эффективности в зависимости от угла падения излучения.

Полученные данные аппроксимируются по тригонометрической функции $\sin^2\theta$ [2]. По полученным значениям аппроксимации выстраиваем контур и определяем по контуру экспериментальную угловую селективность $\Delta\theta_{\text{exp}}$. Затем производится библиотечный поиск. Полученное значение угловой селективности сравнивается с математической моделью и значениями $\Delta\theta_m$. Находится ближайшее значение модуляции показателя преломления, которое соответствует измеренной угловой селективности. Условие поиска соответствует $|\Delta\theta_{\text{exp}} - \Delta\theta_m| \rightarrow 0$.

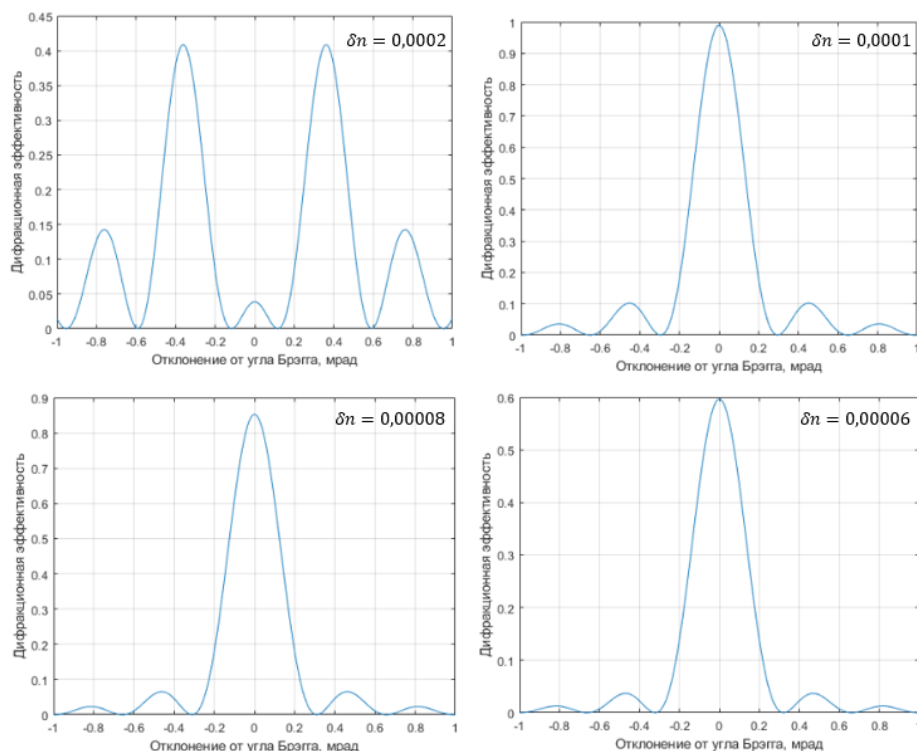


Рис 3. Изменение контура угловой селективности при изменении модуляции показателя преломления

Результаты моделирования для исследования зависимости угловой селективности от модуляции показателя преломления брэгговской дифракционной решетки показаны на рисунке 3. Реализация метода была проведена в среде Matlab.

Исходные данные:

- Длина волны $\lambda_0 = 555$ нм.
- Толщина $t = 2,6$ мм.
- Средний показатель преломления $n_{av} = 1,4867$.
- Модуляция показателя преломления δn варьируется от 0,00006 до 0,0002.
- Угол падения излучения соответствует условию Брэгга для достижения максимума дифракционной эффективности.
- Для исследуемых решеток угол наклона страт (относительно поверхности подложки) составляет 90° , страты перпендикулярны подложке.

Заключение

Разработанный метод позволяет осуществлять быстрое измерение модуляции показателя преломления в лабораторных условиях. Он решает проблему эффективного использования динамического диапазона фоточувствительной среды и соответствующей максимизации дифракционной эффективности.

Список источников

- [1] **Ciapurin, I. V.** Modeling of phase volume diffractive gratings, part 1: transmitting sinusoidal uniform gratings //Optical Engineering. — 2006. — Том 45. — № 1. — С. 015802.

- [2] **Голубинский, А. Н.** Методы аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей // Вестник Воронежского института МВД России. — 2007. — №2.
- [3] **Kogelnik, H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings // Landmark Papers On Photorefractive Nonlinear Optics. — 1995. — С. 133–171.