

49. Оценка параметров угловой селективности брэгговских дифракционных решеток для случая предельно малой толщины

*Д. В. Кузьмин¹, Д. С. Лушников¹, С. Б. Одинокоев¹, В. В. Маркин¹, А. Ю. Жердев¹,
М. В. Шишова¹, А. Ю. Бетин¹, В. Ю. Железнов¹, Н. В. Никоноров², С. А. Иванов²*

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

В данной статье представлены результаты моделирования для исследования зависимости угловой селективности от толщины объемной голографической решетки, выполненной на новом фоточувствительном материале ФТР-стекле. Реализация метода связанных волн была проведена в среде Matlab.

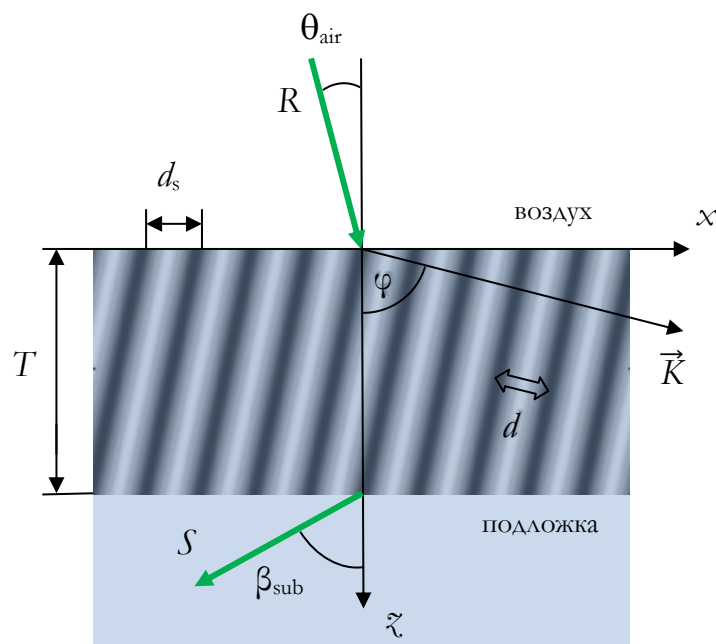
Ключевые слова: Брэгговские решетки, Угловая селективность, Дифракционные оптические элементы.

Цитирование: Кузьмин, Д. В. Оценка параметров угловой селективности брэгговских дифракционных решеток для случая предельно малой толщины / Д. В. Кузьмин, Д. С. Лушников, С. Б. Одинокоев, В. В. Маркин, А. Ю. Жердев, М. В. Шишова, А. Ю. Бетин, В. Ю. Железнов, Н. В. Никоноров, С. А. Иванов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 258–261.

В объемных голограммах свет претерпевает дифракцию при выполнении условия Брэгга, что приводит к эффективному восстановлению записанного волнового фронта. Это справедливо как для пропускающих, так и отражательных голограмм. Объемная запись интерференционной картины может быть реализована в виде пространственной модуляции показателя поглощения, показателя преломления, коэффициента усиления среды или комбинацией нескольких параметров.

При высоких дифракционных эффективностях таких решеток (90 %) падающая волна сильно теряет в интенсивности т. к. вся ее энергия перераспределяется в дифрагированную. Для анализа таких сильных решеток удобно использовать теорию связанных волн Когельника [1], так как она способна предсказать максимально возможные значения дифракционной эффективности для голограмм разных типов, а также построить угловые зависимости и зависимости эффективности от длины волны при различных условиях. Теория связанных волн, в том числе, успешно описывает дифракцию света на акустических волнах и на электрооптических решётках, так как в этих случаях происходят схожие голографические процессы. Также очень близким по смыслу процессом является дифракция электронов на элементарных ячейках кристаллов.

Теория связанных волн предполагает, что монохроматическая волна падает на решетку при условии близком к условию Брэгга и поляризована перпендикулярно плоскости падения. В



Параметры: θ_{air} — угол падения излучения на дифракционную решетку в воздухе, β_{sub} — угол падения излучения на дифракционную решетку в воздухе, \vec{K} — вектор решетки (в направлении, перпендикулярном плоскостям страт), φ — угол наклона страт, d — период объемной дифракционной решетки, d_s — поверхностный период

Рис.1. Геометрия дифракции на толстой голографической решетке с наклонными стратами. Модуляция показателя преломления показана синусоидальным градиентом.

случае, когда волна поляризована в плоскости падения, необходимо учитывать взаимную ориентацию векторов поляризации в дифрагированной и падающей волне, что в конечном итоге снижает общую эффективность решетки. При анализе предполагается, что лишь две волны существуют в среде: падающая и дифрагированная. Только эти две волны удовлетворяют условиям Брэгга. Применимость данной теории ограничивается влиянием остальных порядков дифракции. В данной теории полагается, что они либо отсутствуют, либо условие Брэгга для них не выполняется и ими можно пренебречь.

Теория связанных волн справедлива (наилучшим образом согласуется с экспериментом) при выполнении следующих допущений:

1) Пространственная модуляция показателя преломления и показателя поглощения в среде является синусоидальной функцией.

2) Присутствуют небольшие потери, связанные с поглощением и медленным энергетическим взаимодействием между двумя связанными волнами. Математически это выражается в пренебрежении вторыми производными для прошедшей и дифрагированной волн после подстановки исходной волны в уравнения Максвелла.

3) Излучение падает под углом Брэгга (или около данного угла) и рассматриваются только дифракционные порядки, которые удовлетворяют данному условию. Остальными порядками теория пренебрегает. Данное условие в свою очередь справедливо для «толстых решеток».

Обычно такую классификацию проводят по параметру Клейна [2]:

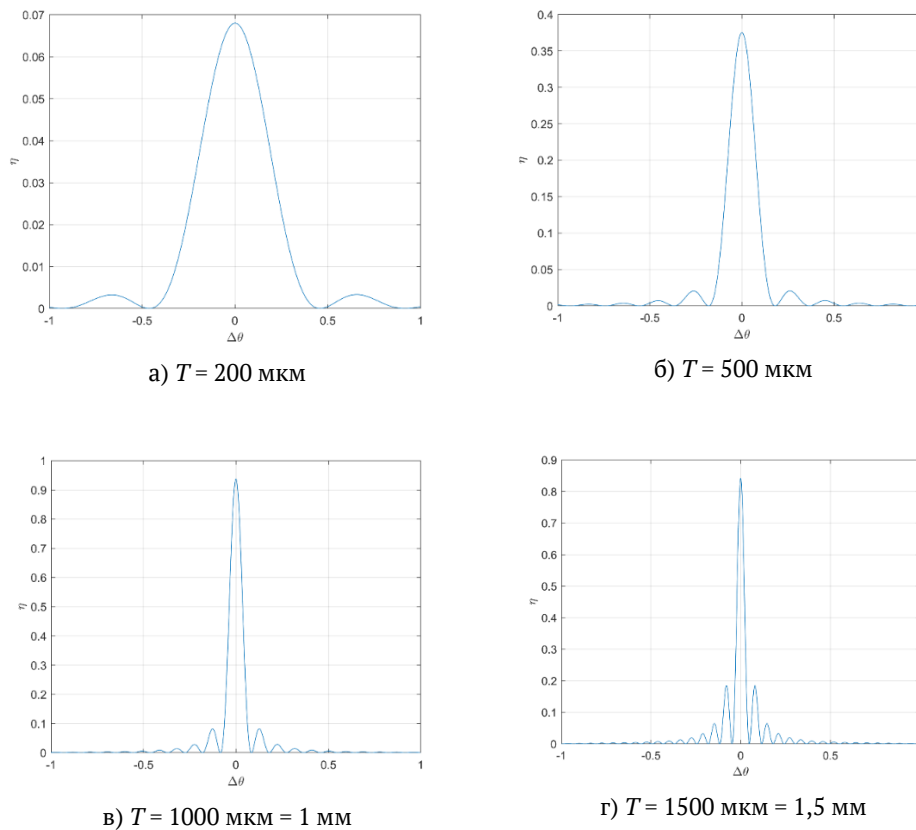


Рис. 2. Зависимость ДЭ от отклонения от условия Брэгга, для пропускающей решетки

$$Q = \frac{2\pi\lambda T}{b_{sub}d^2}.$$

Если $Q \gg 1$, то данную объемную решетку можно отнести к толстым, на которых излучение дифрагирует в режиме Брэгга. В частности, Х. Когельник упоминает, что теория связанных волн дает хорошие результаты для $Q \geq 10$. Более подробно критерий режима Брэгга при дифракции рассмотрен в работе М. Мохарама и др. [3].

В данной статье представлены результаты моделирования для исследования зависимости угловой селективности от толщины объемной голографической решетки, выполненной на новом фоточувствительном материале ФТР-стекле. Реализация метода связанных волн была проведена в среде Matlab.

Исходные данные:

- 1) Длина волны излучения $\lambda_G = 520$ нм, $\Delta\lambda = 33$ нм.
- 2) Угол падения излучения соответствует условию Брэгга для достижения максимума дифракционной эффективности.
- 3) Показатель преломления $n_G = 1,5007$; амплитуда синусоидальной модуляции показателя преломления $n_{1G} = 5,23 \times 10^{-4}$.
- 5) Структура полностью фазовая, показатель поглощения и его модуляция равны 0.
- 4) Период брэгговской решетки $d = 0,400$ мкм.
- 5) Поляризация ТМ.
- 6) Толщина T варьируется от 20 мкм до 2 мм.

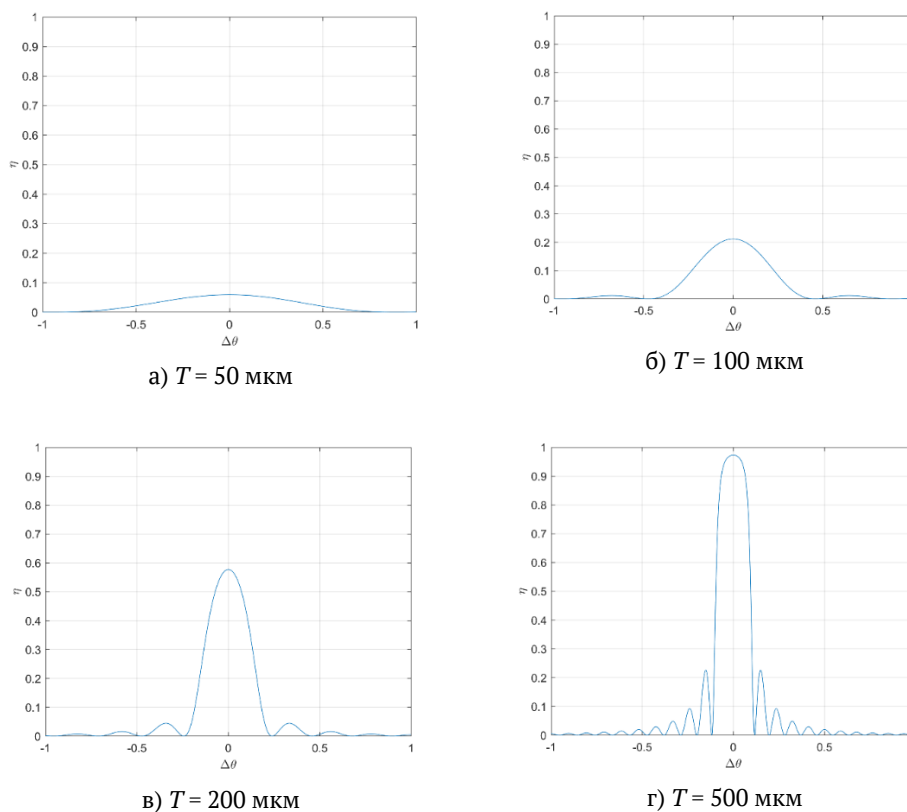


Рис. 3. Зависимость ДЭ от отклонения от условия Брэгга, для отражательных решеток

7) Для исследуемых пропускающих решеток угол наклона страт (относительно поверхности подложки) составляет 90° , страты перпендикулярны подложке.

8) Для исследуемых отражательных решеток угол наклона страт составляет 0° , страты параллельны подложке.

Необходимо отметить, что в данном моделировании для каждой отдельной решетки используется весь динамический диапазон записи, поэтому эффективность максимальная несмотря на то, что уже кажется чрезвычайно малой по сравнению с аналогичной для галогенида серебра. В случае, если динамический диапазон будет распределен на нужное количество решеток в соответствии с рекомендациями, приведёнными в [4], дифракционная эффективность будет снижаться.

Список источников

- [1] **Kogelnik, H.** Теория взаимодействия для толстых голографических решеток / H. Kogelnik // Bell. Syst. Tech. Journ. — 1969. — Vol. 48. — № 9. — P. 2909–2947.
- [2] **Klein, W. R.** Unified approach to ultrasonic light diffraction / W. R. Klein, B. D. Cook // IEEE Trans. Sonic Ultrason, 1967. — SU-14. — P. 123.
- [3] **Moharam, M. G.** Criteria for Bragg regime diffraction by phase gratings / M. G. Moharam, T. K. Gaylord, and R. Magnusson // J. Opt. Commun. — 1980. — Vol. 32. — № 14.
- [4] **Кольер, Р.** Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. — М.: Мир, 1973. — 698 с.