

Исследование параметров угловой и спектральной селективности брэгговских дифракционных решеток в фото-термо-рефрактивных стеклах

Д.В. Кузьмин¹, П.А. Ханевич¹, С.Б. Одинокоев¹, М.В. Шишова¹, В.В. Колючкин¹,
Н.В. Никоноров², С.А. Иванов²

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская 5/1, Москва, Россия, 105005

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский пр. 49, Санкт-Петербург, Россия, 197101

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

1. Введение

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 решетках, так как в этих случаях происходят схожие голографические процессы. Также очень близким по смыслу процессом является дифракция электронов на элементарных ячейках кристаллов.

2. Описание исследования

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

$$Q = \frac{2\pi\lambda T}{n_{\text{sub}}d^2}$$

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]. На рисунке 1 показана геометрия дифракции на толстой голографической решетке, где 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. Модуляция показателя преломления показана синусоидальным градиентом.

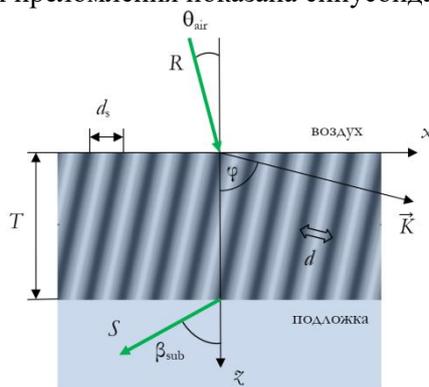


Рисунок 1. Геометрия дифракции на толстой голографической решетке с наклонными стратами.

В данной статье представлены результаты моделирования для исследования зависимости угловой и спектральной селективности от толщины объемной дифракционной пропускающей 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 $n_{1G} = 5,23 \cdot 10^{-4}$.

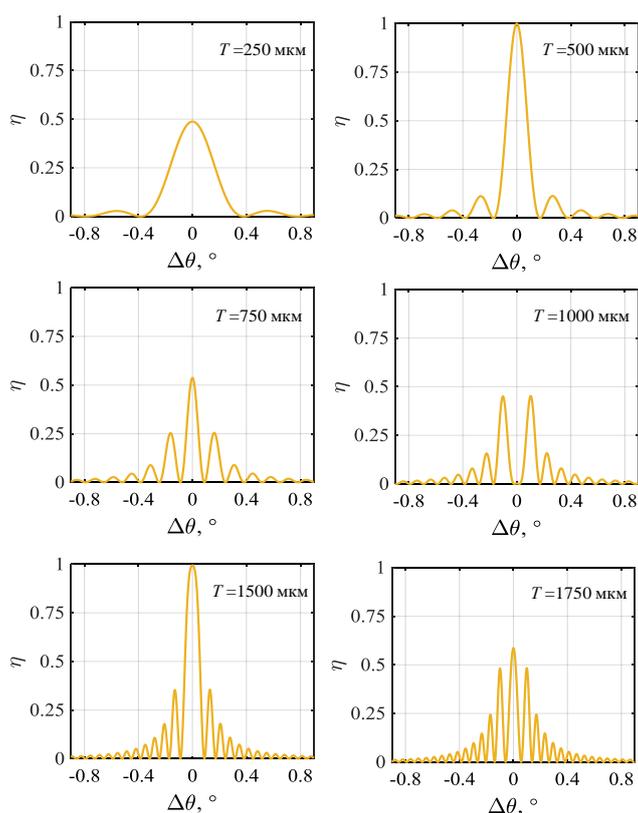


Рисунок 2. Изменение контура угловой селективности при изменении толщины пропускающей брэгговской дифракционной решетки.

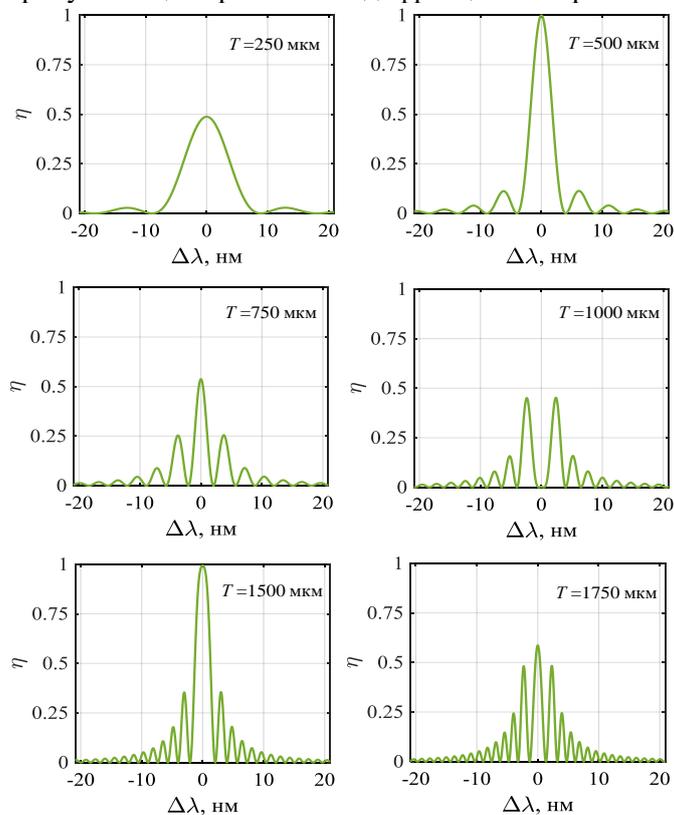


Рисунок 3. Изменение контура спектральной селективности при изменении толщины пропускающей брэгговской дифракционной решетки.

- 4) Структура полностью фазовая, показатель поглощения и его модуляция равны 0.
- 5) Период брэгговской решетки $d = 0.400$ мкм.
- 6) Поляризация ТМ.
- 7) Толщина T варьируется от 200 мкм до 2 мм.
- 8) Для исследуемых пропускающих решеток угол наклона страт (относительно поверхности подложки) составляет 90° , страты перпендикулярны подложке.

3. Заключение

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.

4. Литература

- [1] Kogelnik, H. Interaction theory for thick holographic lattices // 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. – Vol. SU-14. – P. 123.
- [3] Glebov, L.B. Laser Damage Resistance of Photo-Thermo-Refractive Glass Bragg Gratings / L.B. Glebov, L.N. Glebova, V.I. Smirnov, F.L. Tel, M. Dubinskii, L.D. Merkle // East. – 2004. – P. 4-8
- [4] Кольер, Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин – М.: Мир, 1973. – 698 с.

Investigation of the parameters of the angular and spectral selectivity of Bragg diffraction gratings in photo-thermo-refractive glasses

D.V. Kudzmin¹, P.A. Khanevich¹, S.B. Odinokov¹, M.V. Shishova¹, V.V. Koluchkin¹, N.V. Nikonov², S.A. Ivanov²

¹Moscow State Technical University named N.E. Bauman, 2nd Bauman str. 5/1, Moscow, Russia, 105005

²St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverksky Pr. 49, St. Petersburg, Russia, 197101

Abstract. This article presents the simulation results for studying the dependence of the angular and spectral selectivity on the thickness of a bulk diffraction transmitting grating made on a new photosensitive material in FTR glass. The implementation of the coupled wave method was carried out in a Matlab environment.