

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯЦИИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ  
ОБЪЕМНЫХ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СРЕД****Ким Ехан**yoob800@gmail.com  
SPIN-код: 4932-6637**МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация****Аннотация**

Представлено исследование модуляции показателя преломления с помощью дифрактометрии брэгговских дифракционных решеток. Рассмотрены несколько методов измерения контура селективности на основе изменения показателя преломления, толщины и среды. Метод в данной работе основан на измерении контура угловой селективности дифрагированного пучка. Приведен способ вычисления модуляции показателя преломления дифракционной решетки в три этапа: получение экспериментальных данных на разработанном стенде, аппроксимация и сравнение полученного контура с математической моделью по теории связанных волн. Разработанный метод позволяет осуществлять быстрое измерение модуляции показателя преломления в лабораторных условиях, а также решает проблему эффективного использования динамического диапазона фоточувствительной среды и соответствующей максимизации дифракционной эффективности.

**Ключевые слова**

Брэгговские дифракционные решетки, дифракция, селективность, модуляция показателя преломления, дифракционная эффективность, фоточувствительные среды, дифрактометрия, контур угловой селективности

Поступила в редакцию 15.06.2020  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

**Введение.** Брэгговские дифракционные решетки распространены в различных областях фотоники: в лазерной технике они применяются 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 динамический диапазон фоточувствительной среды используют по-разному. 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 [2]. Следова-

тельно, 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 [3]. В данной работе не рассматриваются среды, в которых брэгговские дифракционные решетки созданы посредством амплитудной модуляции коэффициента поглощения.

В дифрактометрии решают обратную задачу: осуществляют предварительное моделирование, измерение дифракционной эффективности и на основе найденных значений получают информацию об исследуемой дифракционной решетке. В рассматриваемом случае варьируется угловое отклонение от условия Брэгга и в пределах контура селективности измеряется дифракционная эффективность. Зависимость дифракционной эффективности от угла Брэгга служит основой для последующей аппроксимации [4]. Модуляцию показателя преломления вычисляют в три этапа: 1) проводят оптические измерения на разработанном стенде; 2) аппроксимируют экспериментальные данные в виде контура угловой селективности; 3) осуществляют поиск полученного контура в предварительно сформированной библиотеке. Библиотека содержит данные, полученные при моделировании различных контуров селективности для заданного значения толщины дифракционной решетки. Моделирование осуществляется согласно теории связанных волн Когельника [5].

**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 согласно формуле

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

где  $\xi$  — параметр рассогласования;  $\Phi$  — набег фазы или коэффициент расфазировки.

Набег фазы определяет максимальную дифракционную эффективность брэгговской решетки при выполнении условия Брэгга. Его вычисляют по формуле

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

Здесь  $t$  — толщина;  $\delta^n$  — модуляция показателя преломления;  $\lambda_0$  — центральная длина волны;  $F_\varphi$  — коэффициент наклона.

Параметр рассогласования  $\xi$  в формуле (1) учитывает малые угловые отклонения  $\Delta\theta_m$  от угла падения Брэгга  $\theta_m^*$  и/или небольшие отклонения от центральной длины волны  $\lambda_0$  и описывается формулой

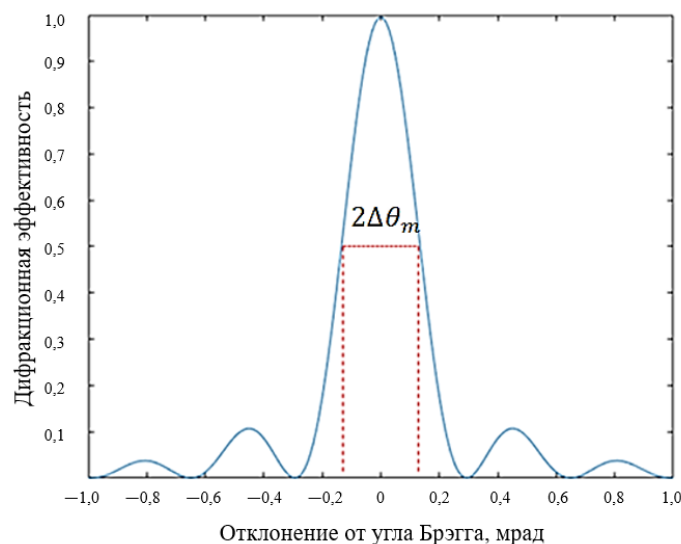
$$\xi = \frac{\pi f t}{\cos(\varphi - \theta_m^*) - \left(\frac{f \lambda_0}{n_{av}}\right) \cos \varphi} \left( \Delta\theta_m \sin \theta_m^* - \frac{f}{2n_{av}} \lambda \right), \quad (3)$$

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 уравнения (2) и (3) в уравнение (1):

$$\eta(\Delta\theta_m) = \frac{\sin^2 \left\{ \pi^t \left[ (\delta^n / \lambda_0 F_{\pi/2}) \right]^{1/2} \right\}}{1 + (\lambda_0 f F_{\pi/2} \Delta\theta_m / \delta^n)^2}. \quad (4)$$

На основе формулы (4) формируется график зависимости дифракционной эффективности от отклонения от брэгговского угла, как показано на рис. 1.



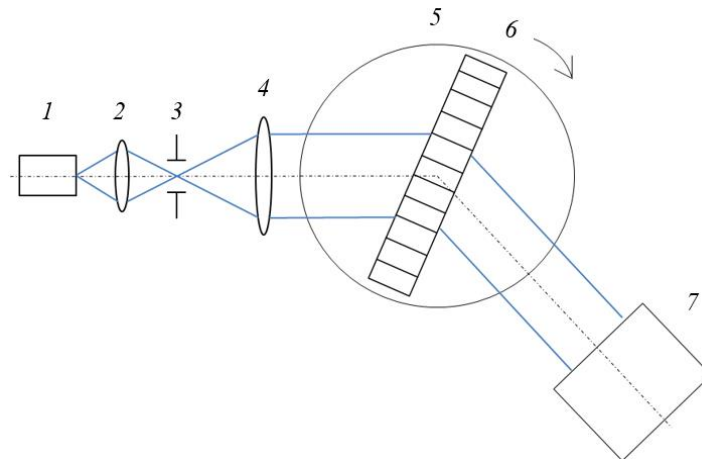
**Рис. 1.** График зависимости дифракционной эффективности от отклонения от угла Брэгга

Представленный контур рассчитан для дифракционной решетки с параметрами  $t = 2$  мм,  $n_{av} = 1,4867$ ,  $f = 1086$  мм<sup>-1</sup>,  $\lambda_0 = 1085$  нм,  $\delta^n = 0,002$ . Такие контуры селективности для различных значений  $\delta^n$  формируют исходную

библиотеку для априорно заданных параметров: пространственной частоты  $f$ , толщины  $t$  и угла наклона  $\varphi$  поверхностей одинаковой фазы (штрихов) для брэгговской решетки. Как правило, эта информация известна. Длина волны  $\lambda_0$  соответствует длине волны лазера, применяемого в измерительном стенде. Аналогичные выкладки реализованы для отражательных решеток.

Вид контура селективности задает 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 рис. 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.

**Экспериментальный стенд.** Для реализации метода исследования был разработан стенд, схема которого с учетом всех технологических соображений показана на рис. 2 [6].



**Рис. 2.** Экспериментальный стенд:

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

Перед началом исследования лазер следует прогреть до выхода на стабильный по мощности режим работы с низкой флуктуацией в области записи [7]. 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 [8]. После пинхола устанавливается коллиматор 4 для получения параллельного оптической оси пучка с плоским волновым фронтом. Затем из-

лучение падает на брэгговскую дифракционную решетку 5, где происходит дифракция [9] в направлении приемника излучения 7. Приемник излучения фиксирует интенсивность дифрагированного пучка излучения. Брэгговскую дифракционную решетку устанавливают на поворотном столике 6 для того, чтобы получать различные дискретные значения дифракционной эффективности в зависимости от угла падения излучения [10].

Выполняем аппроксимацию полученных данных по тригонометрической функции  $\sin^2 \theta$  [2]. По вычисленным значениям аппроксимации выстраиваем контур и определяем по контуру экспериментальную угловую селективность  $\Delta \theta_{\text{exp}}$ . Затем осуществляем библиотечный поиск. Полученное значение угловой селективности сравниваем с полученными по математической модели значениями  $\Delta \theta_m$ . Находим ближайшее значение модуляции показателя преломления, которое соответствует измеренной угловой селективности. Условие поиска соответствует  $|\Delta \theta_{\text{exp}} - \Delta \theta_m| \rightarrow 0$ .

**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.

## Литература

- [1] Ciapurin I.V., Glebov L.B., Smirnov V.I. Modeling of phase volume diffractive gratings, part 1: transmitting sinusoidal uniform gratings. *Opt. Eng.*, 2006, vol. 45, no. 1, art. 015802. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2159470>
- [2] Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М., Наука, 1988.
- [3] Лушников Д.С., Жердев А.Ю., Маркин В.В. и др. Расчёт и исследование угловой и спектральной селективностей для полнопараллаксных голограммных стереограмм. *Компьютерная оптика*, 2016, т. 40, № 6, с. 802–809. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-6-802-809>
- [4] Голубинский А.Н. Методы аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей. *Вестник Воронежского института МВД России*, 2007, № 2, с. 138–143.
- [5] Дмитриев В.Ф. Теория связанных волн-универсальный метод расчета устройств на поверхностных акустических волнах. *ЖТФ*, 2004, т. 74, № 10, с. 94–102.
- [6] Беляев Г.Я., ред. Технология машиностроения. Ч. 2. Минск, БНТУ, 2012.
- [7] Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. М., Машиностроение, 1985.
- [8] Metzler S.D., et al. Analytic determination of pinhole collimator sensitivity with penetration. *IEEE Trans. Med. Imag.*, 2001, vol. 20, no. 8, pp. 730–741. DOI: <https://doi.org/10.1109/42.938241>
- [9] Болотовский Б.М., Галстьян Е.А. Дифракция и дифракционное излучение. *УФН*, 2000, т. 170, № 8, с. 809–830. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200008a.0809>
- [10] Пен Е.Ф., Родионов М.Ю. Неоднородные и нестационарные брэгговские голограммы: модели и методы исследований. *Автометрия*, 2005, т. 41, № 2, с. 98–114.

**Ким Ехан** — студент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Одинокоев Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Ким Ехан. Исследование модуляции показателя преломления объемных фоточувствительных сред. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 09(50). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-09-638>

## STUDY OF REFRACTIVE INDEX MODULATION OF VOLUME PHOTOSENSITIVE MEDIA

Kim Yehan

yoob800@gmail.com

SPIN-code: 4932-6637

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The article presents a study of the modulation of the refractive index using diffractometry of Bragg diffraction gratings. Several methods are considered for measuring the selectivity contour based on changes in the refractive index, thickness, and medium. The method in this work is based on measuring the contour of the angular selectivity of the diffracted beam. A method is presented for calculating the modulation of the refractive index of a diffraction grating in three stages: obtaining experimental data on the developed installation, approximating and comparing the resulting contour with a mathematical model according to the theory of coupled waves. The developed method allows one to quickly measure the modulation of the refractive index in laboratory conditions, and also solves the problem of efficient use of the dynamic range of a photosensitive medium and the corresponding maximization of the diffraction efficiency.

### Keywords

Bragg diffraction gratings, diffraction, selectivity, refractive index modulation, diffraction efficiency, photosensitive media, diffractometry, angular selectivity contour

Received 15.06.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

---

### References

- [1] Ciapurin I.V., Glebov L.B., Smirnov V.I. Modeling of phase volume diffractive gratings, part 1: transmitting sinusoidal uniform gratings. *Opt. Eng.*, 2006, vol. 45, no. 1, art. 015802. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2159470>
- [2] Ostrovskiy Yu.I., Shchepinov V.P., Yakovlev V.V. Golograficheskie interferentsionnye metody izmereniya deformatsiy [Holographic interferometric technique for measuring deformations]. Moscow, Nauka Publ., 1988 (in Russ.).
- [3] Lushnikov D.S., Zherdev A.Yu., Markin V.V., et al. Calculation of angular and spectral selectivity for full-parallax holographic stereograms. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2016, vol. 40, no. 6, pp. 802–809. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-6-802-809> (in Russ.).
- [4] Golubinskiy A.N. Data approximation and modeling methods. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [Vestnik of Voronezh Institute of The Ministry of Interior of Russia], 2007, no. 2, pp. 138–143 (in Russ.).
- [5] Dmitriev V.F. Coupled wave theory — an universal calculation method on acoustic waves surface. *ZhTF*, 2004, vol. 74, no. 10, pp. 94–102 (in Russ.).
- [6] Belyaev G.Ya., ed. *Tekhnologiya mashinostroeniya. Ch. 2* [Machine engineering technology. Vol. 2]. Minsk, BNTU Publ., 2012 (in Russ.).

- [7] Klimkov Yu.M. *Prikladnaya lazernaya optika* [Applied laser optics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985 (in Russ.).
- [8] Metzler S.D., et al. Analytic determination of pinhole collimator sensitivity with penetration. *IEEE Trans. Med. Imag.*, 2001, vol. 20, no. 8, pp. 730–741. DOI: <https://doi.org/10.1109/42.938241>
- [9] Bolotovskiy B.M., Galst'yan E.A. Diffraction and diffraction radiation. *UFN*, 2000, vol. 170, no. 8, pp. 809–830. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200008a.0809> (in Russ.). (Eng. version: *Phys. Usp.*, 2000, vol. 43, no. 8, pp. 755–775. DOI: <https://doi.org/10.1070/PU2000v043n08ABEH000683>)
- [10] Pen E.F., Rodionov M.Yu. Non-uniform and nonstationary Bragg holograms: models and research methods. *Avtometriya*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 98–114 (in Russ.).

**Kim Yehan** — Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Odinokov S.B., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Kim Yehan. Study of refractive index modulation of volume photosensitive media. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 09(50). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-09-638.html> (in Russ.).