

УДК 621.373.826

А.П. Погода <sup>1</sup>, В.М. Петров <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет «Военмех»

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

## СПЕКТРАЛЬНАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛЕ $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$

Проведено экспериментальное исследование спектральной селективности отражательных решеток показателя преломления в кристалле  $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$ . Предложена методика измерения спектральной селективности толстых отражательных голограмм, позволяющая производить прямое измерение спектральной селективности решетки с помощью считывающего лазера, перестраиваемого по длине волны. Получено хорошее согласие расчета с результатами измерений.

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА, СПЕКТРАЛЬНАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ, ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ СРЕДА.

Спектральная селективность объемных голограмм, возникающих в активной среде твердотельных лазеров, способствует сужению полосы генерации таких лазеров. Подобные голограммы образуются в результате многократного прохождения излучения через среду и образования в ней стоячей интерференционной картины. Такая картина приводит к возникновению набора взаимосвязанных решеток: коэффициента усиления, коэффициента поглощения и показателя преломления активного вещества. Все эти решетки имеют одинаковый период, но в общем случае могут иметь фазовый сдвиг относительно исходной интерференционной картины.

Образованные в активной среде лазера пространственные решетки по своим физическим свойствам являются толстыми отражательными голограммами. Благодаря высоким спектральным селективным свойствам, такие голограммы работают как оптические спектральные фильтры и существенно влияют на характеристики излучения, в том числе на ширину полосы генерации лазера. Например, как показал эксперимент в работе [1], наличие отра-

жательных голограмм толщиной до 11 см в активном элементе оказывает существенное влияние на характеристики излучения лазеров, реализующих явление обращения волнового фронта.

Из теории связанных волн Когельника [2] следует, что спектральная селективность отражательной голограммы  $\delta\lambda$  определяется выражением

$$\delta\lambda / \lambda = \Lambda / T, \quad (1)$$

где  $\Lambda$  – период решетки;  $T$  – толщина голограммы;  $\lambda$  – длина волны излучения, взаимодействующего с решеткой.

Экспериментальное подтверждение зависимости (1) является одной из целей представленной работы.

Ранее [3] нами был рассмотрен импульсный голографический Nd-YAG лазер, генерирующий излучение с длиной волны 1064 нм, в активном элементе которого возникают решетки коэффициента усиления. Достоверная оценка спектральной селективности решеток в таком лазере имеет принципиальное значение для его практических применений. В работе [1] была экспериментально подтверждена достовер-



ность обратно пропорциональной зависимости ширины полосы генерации от толщины голограммы. При этом спектральная селективность решеток измерялась путем исследования ширины полосы генерации лазера.

Другие работы, посвященные прямой проверке соотношения (1), нам не известны. Ввиду этого в настоящей работе проведено непосредственное экспериментальное исследование спектральной селективности отражательных решеток в зависимости от их толщины и произведено сравнение результатов с теоретическими расчетами, полученными на основании теории Когельника.

### Методика измерения спектральной селективности решеток

Для того чтобы произвести прямое экспериментальное исследование спектральной селективности решетки, необходимо использовать широкополосный источник излучения или перестраиваемый по длине волны лазер, причем использование лазера предпочтительнее ввиду высокой спектральной плотности яркости его излучения. Очевидно, что спектральная область чув-

ствительности материала должна совпадать с диапазоном излучения лазера, используемого для записи решеток. В настоящее время доступны лазеры с излучением в инфракрасной (ИК) области спектра, перестраиваемые в диапазоне 1,5 – 1,6 мкм. Использовать данные длины волн для записи голограмм невозможно из-за отсутствия материалов, чувствительных к длинам волн инфракрасного диапазона. Отсюда возникает необходимость такой экспериментальной методики, которая бы позволяла создавать решетки, отвечающие условиям Брэгга в отражательной геометрии из указанного диапазона длин волн. Поэтому нами была использована схема, позволяющая записывать голограмму излучением зеленой области спектра, к которому светочувствительны многие материалы, а за счет выбора угла между записывающими лучами подстраивать период решетки под условия считывания отражательной геометрии (рис. 1). Такие схемы успешно используются для изготовления оптических фильтров [4, 5].

Действительно, голограмма может быть записана способом, показанным на рис. 1. В этом случае период решетки  $\Lambda = \lambda_w / 2\sin\theta$ . Чтобы обеспечить дифракцию на такой го-

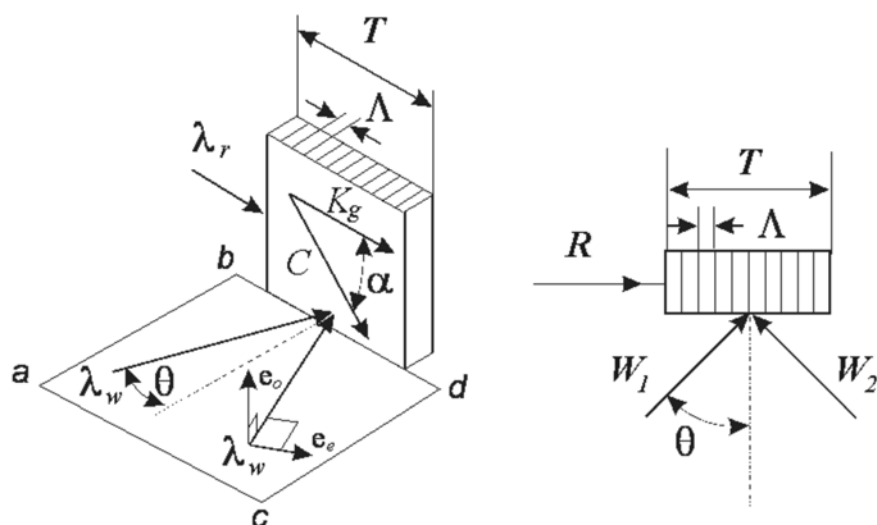


Рис. 1. Геометрия эксперимента (в двух проекциях):

$W_1, W_2$  – записывающие лазерные пучки с длиной волны  $\lambda_w$ ;  $R$  – считывающий луч с  $\lambda_r$ ;  
 $abcd$  – плоскость падения записывающих лучей;  $\Lambda, T, K_g$  – период, толщина и волновой вектор решетки;  
 $C$  – оптическая ось кристалла;  $e_o, e_e$  – векторы поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей;  
 $\theta$  – угол падения записывающего луча;  $\alpha$  – угол между вектором  $K_g$  и осью  $C$  (обеспечивает наибольшую эффективность записи решетки за счет фоторефрактивного эффекта)

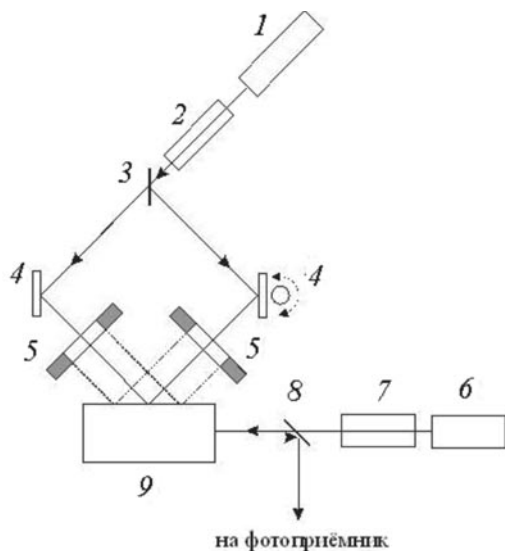


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:  
 1 – Nd-YAG- лазер с удвоением частоты;  
 2, 7 – расширители пучка; 3, 8 – светоделители;  
 4 – зеркала (одно из них помещено на вращающуюся станину); 5 – диафрагма с перестраиваемым диаметром; 6 – перестраиваемый ИК лазер;  
 9 – кристалл ВаTiO<sub>3</sub>:Co

логограмме в отражательной геометрии, необходимо выполнить условия Брэгга:

$$\lambda_r = 2 \Lambda n,$$

где  $n$  – показатель преломления вещества на длине волны считывающего излучения.

Примечательно, что длина волны излучения, осуществляющего запись, не зависит от показателя преломления, так как при записи пропускающей решетки уменьшение

в  $n$  раз скорости прохождения волны в среде приводит к сжатию максимумов распределения интенсивности решетки вдоль их направления, то есть пространственное распределение минимумов и максимумов решетки в кристалле, а значит и период, не изменяются. В случае же уменьшения в  $n$  раз скорости прохождения считывающей волны период решетки изменяется, поэтому длина этой волны зависит от показателя преломления. Однако поскольку угол между считывающей волной и опорной близок к прямому, его синус можно полагать равным единице.

Очевидно, что данная схема позволяет отдельно исследовать процессы, связанные как с записью, так и со считыванием. Выбирая нужным образом длину волны записывающего света и угол между записывающими лучами, мы можем записать голограмму с периодом решетки, отвечающим условию резонанса:

$$\Lambda = \lambda_w / 2 \sin \theta = \lambda_r / 2n.$$

Схема эксперимента представлена на рис. 2.

Экспериментальное исследование решеток с различными параметрами приводит к необходимости использовать материалы, в которых возможна быстрая перезапись решеток, так как это значительно сокращает время измерений. Таким материалом в нашем случае являлся кристалл титаната бария.

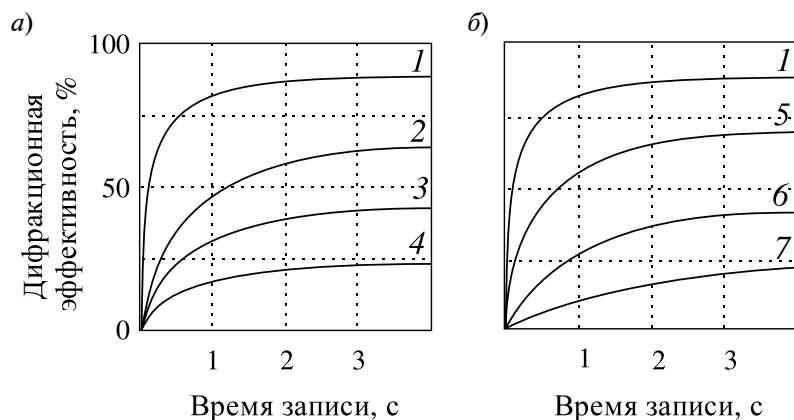


Рис. 3. Зависимости дифракционной эффективности голограмм от времени записи при различных интенсивностях  $I_w$  (а) и при значениях контраста  $m$  (б) записывающего излучения; а – значения  $I_w$ , МВт/см<sup>2</sup>: 25 (1), 18 (2), 7 (3), 2 (4);  $m = 0,98$ ; б – значения  $m$ : 0,98 (1), 0,92 (5), 0,56 (6), 0,28 (7);  $I_w = 25$  МВт/см<sup>2</sup>

В качестве материала, в котором проводилась запись решеток, использовался титанат бария, легированный кобальтом ( $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$ ); это были два образца кристалла размерами  $3 \times 4 \times 6$  мм и  $3 \times 4 \times 10$  мм; легирование кобальтом составляло 0,2 и 0,1 % вес. соответственно. На рис. 3 представлены осциллограммы, показывающие зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  от времени записи при различных интенсивностях записывающего излучения и различных значениях контраста. Отметим, что характерная длительность записи голограммы составляла около 3 с, а дифракционная эффективность в некоторых экспериментах достигала 85 – 90 %.

Запись решеток в кристалле осуществлялась излучением твердотельного Nd-YAG лазера, преобразованным во вторую гармонику ( $\lambda_w = 532$  нм). Записывающие пучки пересекались под углом  $2\theta$  так, что биссектриса угла их пересечения совпадала с нормалью к освещаемой плоскости кристалла. В этом случае волновой вектор записанной голограммы ориентирован параллельно этой плоскости. Считывание голографических решеток проводилось вдоль длинной стороны кристалла, при этом на соответствующе грани было нанесено антиотражающее интерференционное покрытие. Считывание производилось в отражательной геометрии перестраиваемым полупроводниковым лазером с диапазоном

излучения 1456 – 1583 нм. Считывающий пучок дифрагировал на толстой голограмме, в результате чего нулевой порядок дифракции проходил сквозь кристалл, а первый порядок – отражался. Интенсивность отраженного света измерялась широкополосным инфракрасным фотоприемником; измерялась также интенсивность падающего света. Отношение этих величин задавало дифракционную эффективность записанной решетки.

За меру спектральной селективности голограммы принималась ширина главного максимума на зависимости дифракционной эффективности от длины волны считывающего излучения – это разность длин волн между центральным максимумом и первым минимумом.

#### Экспериментальные результаты

Были получены экспериментальные зависимости дифракционной эффективности решетки от длины волны считывающего света для толщин решеток  $T$  в диапазоне от 2 до 9 мм. Примеры таких зависимостей для значений  $T = 9$  и 5 мм показаны на рис. 4.

Теоретические расчеты зависимостей дифракционной эффективности от длины волны проводился в соответствии с теорией Когельника (см. соотношения (2) и (3)) для случая стационарной решетки, когда дифракционную эффективность решетки можно считать постоянной:

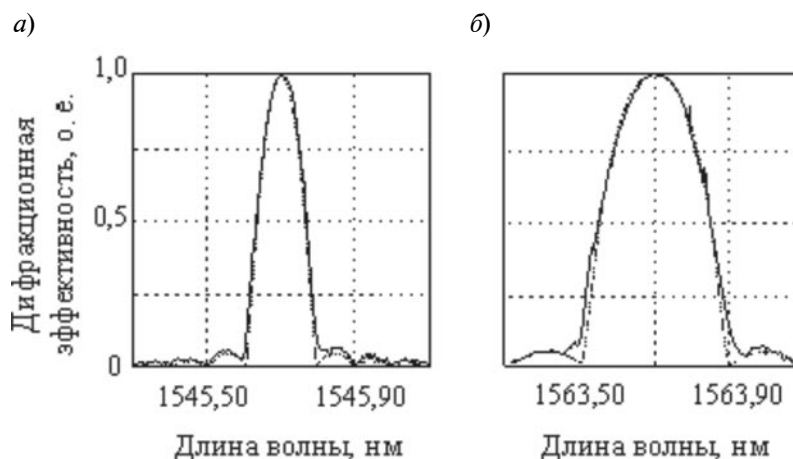


Рис. 4. Зависимости дифракционной эффективности голограмм от длины волны считывающего излучения при значениях толщины решетки  $T = 9$  мм (а) и 5 мм (б). Экспериментальные кривые аппроксимированы расчетными (пунктир) согласно теории Когельника

$$\eta = \left\{ \left( \frac{\xi_r}{v_r} \right)^2 + \left[ 1 - \left( \frac{\xi_r}{v_r} \right)^2 \right] \times \right. \\ \left. \times \operatorname{cth}^2(\sqrt{v_r^2 - \xi_r^2}) \right\}^{-1}, \quad (2)$$

где

$$\xi_r = \frac{\Gamma T}{2 \sin \theta_0}; \quad (3a)$$

$$v_r = \frac{\pi n_1 T}{\lambda \sin \theta_0}. \quad (3b)$$

Из экспериментально измеренной величины дифракционной эффективности была получена оценка амплитуды решетки  $n_1$ . Напомним, что  $\sin \theta_0 = 1$  (см. рис. 1). Величина  $\Gamma$  в данном случае является варьируемым параметром, который можно определить из величины спектральной селективности решетки.

На следующем этапе по этим зависимостям (см. рис. 4) была определена спектральная селективность  $\delta\lambda$  решетки как разность между длиной волны максимума дифракционной эффективности и длиной волны, соответствующей первому минимуму.

В наших экспериментах вариация толщины решетки (0 – 10 мм) достигалась изменением ширины пучков, записывающих голограмму. Для этого указанные пучки

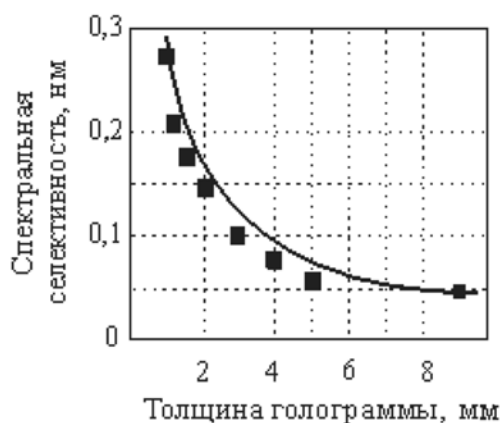


Рис. 5. Экспериментальная (символы) и теоретическая (линия) зависимости спектральной селективности отражательной голограммы от толщины решетки;  $\lambda = 1,5$  мкм,  $n = 2,4$

пропускались через щели с зазором, перестраиваемым в данном диапазоне. Данное дополнение отличает схему от приведенной в работе [4].

На рис. 5 представлена полученная нами экспериментальная зависимость спектральной селективности решеток показателя преломления от толщины голограммы, а также теоретическая кривая, рассчитанная по теории Когельника согласно соотношению (1), где  $\Lambda = \lambda/2n$ . Отсюда следует, что спектральная селективность следует выражению

$$\delta\lambda = \lambda^2/2nT.$$

Видно, что экспериментальные точки хорошо ложатся на кривую, полученную теоретическим расчетом.

### Обсуждение и выводы

В результате проведенной работы представлена оригинальная методика создания объемных отражательных голограмм с управляемыми параметрами в кристалле и измерения их спектральной селективности. Особенностью данной методики является запись и считывание голограммы в ортогональной геометрии, что позволяет использовать для записи и считывания два независимых источника излучения. Эта независимость позволяет нам выбрать для записи источник с длиной волны, находящейся в области максимальной чувствительности материала. Для считывания используется перестраиваемый по длине волны источник, причем его длина волны может существенно отличаться от длины волны записывающего лазера.

Оригинальная геометрия записи и считывания решеток дала возможность измерить зависимость дифракционной эффективности голограммы от длины волны считывающего излучения. Это позволяет сделать выводы о спектральной селективности решеток в кристалле. Получено соответствие результатов эксперимента и теоретического расчета зависимости спектральной селективности от толщины решетки. Продемонстрировано, что при изменении толщины отражательной решетки от 1 до 9 мм ее спектральная селективность



изменяется примерно от 275 до 52 пм, что соответствует изменению ширины частотной полосы отраженного излучения от 33,1 до 6,5 ГГц.

Разработанная методика дает возможность оценить ширину полосы генерации лазера, в активной среде которого формируются пространственные решетки.

Сравнивая результаты проделанной работы с результатами статьи [1], можно отметить следующее. Нами в этой работе исследовались решетки показателя преломления, причем толщина решетки изменялась в диапазоне от 1 до 9 мм, тогда как в работе [1] – решетки коэффициента

усиления толщиной от 35 до 105 мм. Кроме того, различались методики измерения спектральной селективности: в этой работе проводилось прямое измерение параметров контура дифракционной эффективности, тогда как в работе [1] оценка спектральной селективности проводилась путем измерения ширины полосы генерации лазера, в активном элементе которого образованы решетки. На основании проведенного сравнения можно заключить, что спектральная селективность решеток определяется исключительно их геометрическими параметрами – толщиной и периодом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погода А.П., Ермолаев А.А., Лебедев В.Ф., Сметанин С.Н., Борейшо А.С. Спектральная селективность голографических решеток коэффициента усиления в мощном твердотельном лазере с петлевым резонатором // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2013. № 2(170). С. 121–129.

2. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.

3. Pogoda A.P., Lebedeva T.B., Yusupov M.R., Liventsov R.A., Lebedev V.F., Boreysho A.S., Gavrilo A.V., Smetanin S.N., Fedin A.V. High power Nd:YAG laser with self-pumped phase-conjugate

loop cavity and repetitive pulsed diode-matrix side-pumping // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8677. P. 86770Z.

4. Петров В.М., Лихтенберг С., Шамрай А. Спектральный оптический фильтр с управляемой передаточной характеристикой на основе динамических объемных голограмм в титанате бария // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 12. С. 56–60.

5. Breer S., Buse K. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate // Appl. Phys. B. 1998. Vol. 66, pp. 339–345.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОГОДА Анастасия Павловна** – ассистент кафедры И1 «Лазерная техника» Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф. Устинова.

190005, Россия, г. Санкт-Петербург, Красноармейская ул., 1  
pogoda@systems.ru

**ПЕТРОВ Виктор Михайлович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
vikpetrov@mail.ru

#### *Pogoda A.P., Petrov V.M. THE SPECTRAL SELECTIVITY OF REFLECTIVE HOLOGRAPHIC GRATINGS IN THE BaTiO<sub>3</sub>: Co CRYSTAL.*

The spectral selectivity of refractive-index gratings in the BaTiO<sub>3</sub>: Co crystal has been investigated. A new technique for the spectral selectivity measurement of thick reflective holograms was suggested. That technique allowed direct measurement of the spectral selectivity of gratings using a tunable wavelength laser reader. A good agreement between experimental data and theoretical calculations was obtained.

HOLOGRAPHIC GRATING, SPECTRAL SELECTIVITY, DYNAMIC HOLOGRAPHIC MEDIUM.

#### REFERENCES

1. **Pogoda A.P., Ermolaev A.A., Lebedev V.F., Smetanin S.N., Boreysho A.S.** Spectral selectivity of holographic gain gratings in the multiloop cavity laser. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 2013, No. 2 (170), pp. 121-129. (rus)
2. **Collier R.J., Burkhardt C.B., Lin L.H.** *Opticheskaya golografiya* [Optical Holography]. Moscow, Mir, 1973. 686 p. (rus)
3. **Pogoda A.P., Lebedeva T.B., Yusupov M.R., Liventsov R.A., Lebedev V.F., Boreysho A.S., Gavrilov A.V., Smetanin S.N., Fedin A.V.** High power Nd:YAG laser with self-pumped phase-conjugate loop cavity and repetitive pulsed diode-matrix side-pumping. *Proc. SPIE*, 2013, Vol. 8677, P. 86770Z.
4. **Petrov V.M., Likhtenberg S., Shamray A.** Spektral'nyy opticheskiy fil'tr s upravlyаемой peredatochnoy kharakteristikoy na osnove dinamicheskikh ob'emnykh gologramm v titanate bariya. *ZhTF*, 2004, Vol. 74, No. 12, pp. 56-60. (rus)
5. **Breer S., Buse K.** Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate. *Appl. Phys. B*, 1998, Vol. 66, pp. 339-345.

#### THE AUTHORS

**POGODA Anastasiya P.**

*Baltic State Technical University,*  
1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 190005, Russia  
pogoda@lsystems.ru

**PETROV Viktor M.**

*St. Petersburg State Polytechnical University,*  
29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
vikpetrov@mail.ru