

СОЗДАНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ БРЭГГОВСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО НАНОСЕКУНДНОГО ЭКСИМЕРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА

В.С. Брунов, С.В. Варжель, Н.В. Никоноров, В.Е. Стригалеv

Описывается метод создания голографических брэгговских решеток в кристаллах ниобата лития в результате импульсного облучения эксимерного лазера, рассматриваются возможности записи решеток в различных режимах. Проводятся исследования зависимости основных параметров получаемых фазовых голографических элементов от мощности и количества импульсов.

Ключевые слова: брэгговские решетки, ниобат лития, фоторефрактивные материалы, фазовые голографические решетки.

Введение

Одним из наиболее перспективных материалов для создания брэгговских дифракционных структур является кристалл ниобата лития, так как сильно выраженные электрооптические, пьезооптические и нелинейно-оптические свойства кристалла могут быть использованы для их управления и перестройки [1]. В современной интегральной оптике дифракционные решетки, сформированные в этих кристаллах, активно используются в качестве перестраиваемых и фиксированных узкополосных оптических фильтров [2, 3] и интегрально-оптических частотных модуляторов [4]. В последнее время большой интерес связан с исследованиями модификации оптических свойств материалов при импульсном облучении лазерным излучением и возможностью использования лазерных импульсов для изготовления интегрально-оптических устройств. Особый интерес представляет запись дифракционных решеток в кристалле ниобата лития с волновым вектором, направленным поперек оси поляризации, что позволяет эффективно управлять такой решеткой за счет электрооптического эффекта.

Следует отметить, что технология получения дифракционных решеток в ниобате лития при импульсном облучении эксимерным лазером до сих пор недостаточно полно изучена. Используя разные режимы записи (варьируя энергию в импульсе, длительность и количество импульсов, длину волны лазерного излучения и т.д.) можно получать разнообразные характеристики решеток. В связи с этим целью данной работы является исследование процесса создания голографических брэгговских решеток в кристаллах ниобата лития, изучение влияния различных режимов записи на спектральные и голографические характеристики получаемых решеток, а также определение оптимальных условий их записи.

Запись брэгговских решеток

При облучении фоторефрактивного кристалла мощным излучением (в области его поглощения) в участках максимальной интенсивности свободные электроны кристаллической решетки поглощают энергию фотонов, и происходит перераспределение зарядов. Оно приводит к образованию локального электрического поля, которое благодаря электрооптическому эффекту вызывает локальное изменение показателя преломления [5]. Таким образом, записанная в кристалле интерференционная картина синусоидального распределения интенсивности, полученная вследствие интерференции двух падающих на образец когерентных пучков, будет представлять собой фазовую голографическую брэгговскую решетку с наведенным изменением показателя преломления. Схема записи решеток показана на рис. 1.

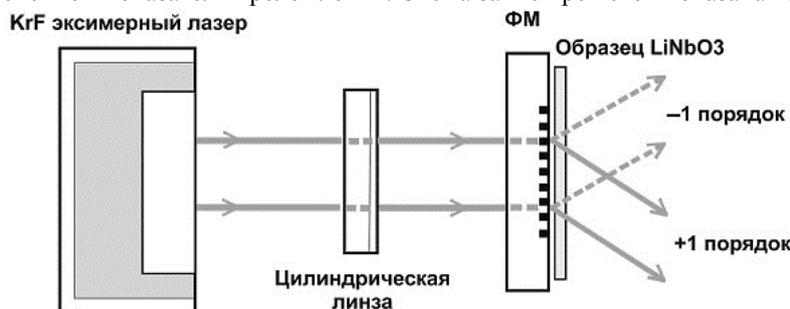


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для записи брэгговских решеток

Лазерный импульс Krf эксимерного лазера длительностью 20 нс, проходя через фазовую маску (ФМ), оптимизированную для длины волны 248 нм с подавлением нулевого порядка (< 3%), дифрагирует на +1 и -1 порядки [6, 7]. Эффективность каждого – около 37% от падающего излучения. Эти дифраги-

рованные пучки, падая под определенным углом на образец кристалла ниобата лития, при достаточной когерентности лазерного импульса создают оптическую неоднородность в материале в виде фазовой дифракционной решетки с переменным показателем преломления. Для достижения большей плотности энергии в пучке использовалась цилиндрическая линза, которая сводила пучок по одной из осей. Записанные решетки подчиняются закону Брэгга:

$$2 \cdot d \cdot \sin(\Theta) = n \cdot \lambda_{\text{Бр}}, \quad (1)$$

где d – период решетки; Θ – угол падения лучей $+1$ и -1 порядков; n – порядок дифракции; $\lambda_{\text{Бр}}$ – брэгговская длина волны.

Измерение параметров записанных решеток

В работе измерения проводились с использованием He-Ne лазера на длине волны 633 нм (рис. 2). Исследуемый образец с решеткой находился на поворотном столике, управляемом с компьютера и обеспечивающем шаг поворота 10^{-5} рад.

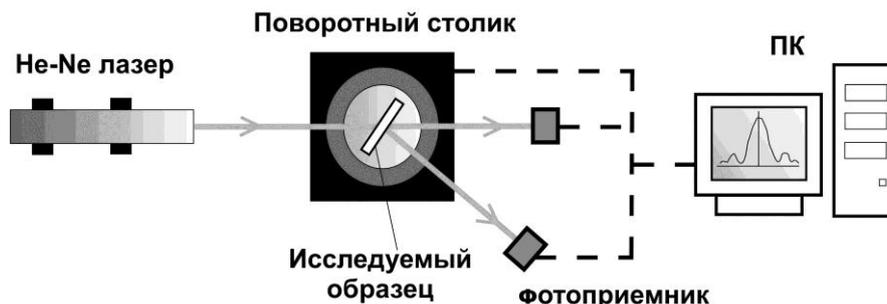


Рис. 2. Схема установки для тестирования брэгговских решеток

Измерение зависимости интенсивности прошедшего и дифрагированного пучка с последовательным изменением угла поворота столика позволяет построить контур угловой селективности решетки и определить дифракционную эффективность решеток, их глубину и величину амплитуды модуляции наведенного показателя преломления.

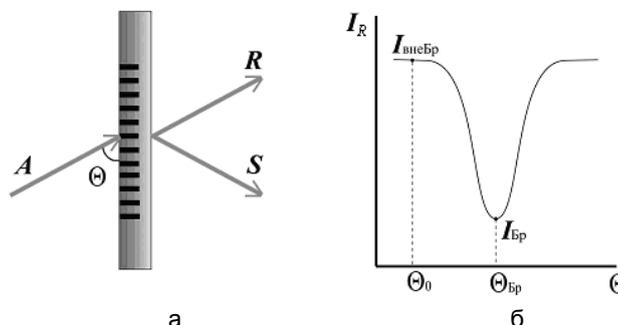


Рис. 3. Схема дифракции лучей на фазовой голографической решетке (а); зависимость интенсивности проходящего пучка от угла падения (б)

При анализе дифракции на объемных решетках необходимо учитывать, что каждый луч последовательно рассеивается от большого числа периодически расположенных поверхностей. На рис. 3, а, показана схема дифракции лучей на фазовой голографической решетке: A – падающая волна; S – дифрагированная; R – прошедшая. Для того чтобы амплитуда результирующей дифрагированной волны S была максимальной, волны, рассеянные последовательными слоями, должны быть синфазными. Для этого необходимо выполнить определенное соотношение между длиной волны света λ , углом падения Θ и периодом решетки d . Это соотношение представляет собой закон Брэгга (1). При отступлении от условий Брэгга интенсивность дифрагированной волны падает и определяется спектрально-угловой селективностью данной голографической решетки. Дифракционная эффективность η первого порядка дифракции определялась из контура, прошедшего через решетку пучка R вблизи выполнения условий Брэгга, по формуле

$$\eta = \frac{I_{\text{вне Бр}} - I_{\text{Бр}}}{I_{\text{вне Бр}}},$$

где $I_{\text{Бр}}$ – значение интенсивности проходящего через решетку пучка R при выполнении условий Брэгга; $I_{\text{вне Бр}}$ – значение интенсивности проходящего пучка R при выходе за пределы выполнения условий Брэгга. На рис. 3, б, продемонстрирована зависимость интенсивности проходящего пучка R от угла падения Θ .

Спектры ослабления голографических элементов

В исследовании спектральных характеристик полученных голографических элементов были получены зависимости величины ослабления сигнала от длины волны при разном количестве и разной мощности импульсов. Спектры ослабления измерялись на спектрофотометре в диапазоне 200–1700 нм с шагом 1 нм (рис. 4, 5).

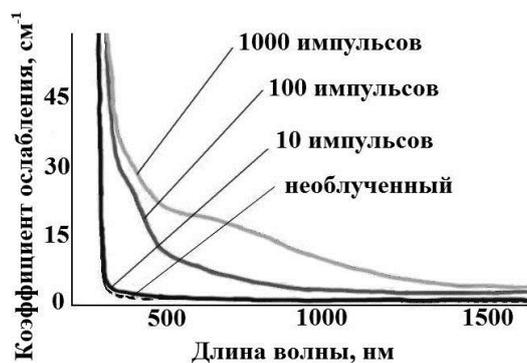


Рис. 4. Зависимость коэффициента ослабления от длины волны при разном количестве импульсов

Из спектра ослабления (рис. 4) видно, что поглощение в слое монотонно растет с увеличением числа импульсов и при больших количествах (100, 1000 импульсов) становится критическим.

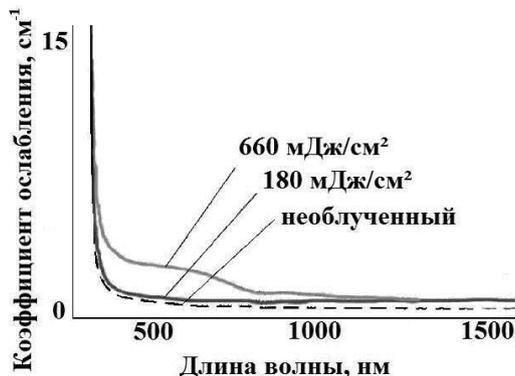


Рис. 5. Зависимость коэффициента ослабления от длины волны при разной мощности импульсов

Также небольшой рост поглощения наблюдается и при увеличении мощности импульса (рис. 5).

Результаты

На рис. 6 показаны фотографии записанных микроструктур.

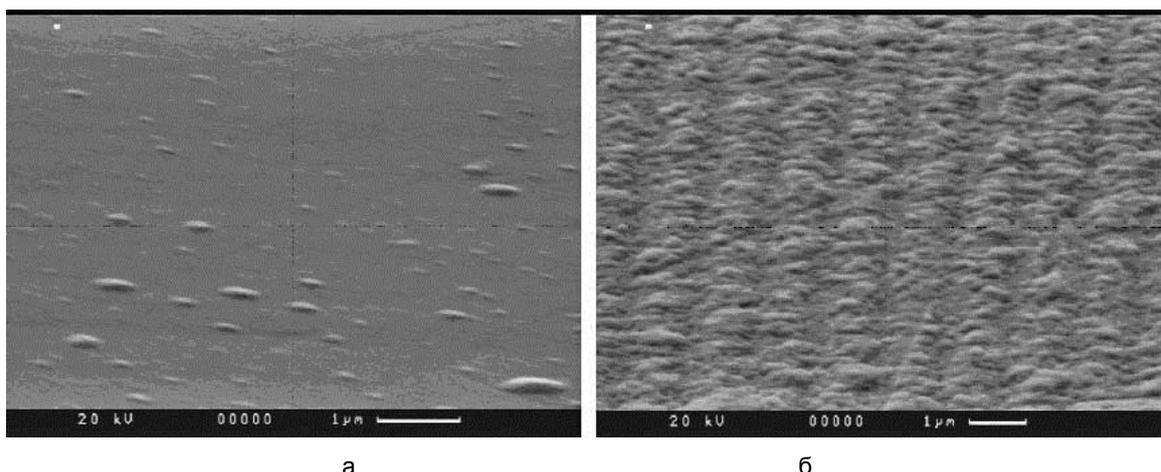


Рис. 6. Фотографии записанных микроструктур: решетка с изменением показателя преломления (а); решетка с поверхностным рельефом (б)

Снимок на рис. 6, а, свидетельствует о том, что в данной решетке после облучения мощным эксимерным лазером произошло изменение показателя преломления, связанное с фоторефрактивными свойствами ниобата лития. При увеличении мощности и количества импульсов в образце происходит модификация поверхности вследствие выжигания материала в зонах максимальной интенсивности. Такая структура имеет вид периодической поверхностной решетки с ярко выраженным рельефным характером (рис. 6, б).

Измерение дифракционной эффективности η , толщины полученной голограммы T и величины модуляции показателя преломления Δn проводилось для решеток, не имеющих критического поглощения в рабочих длинах волн. Результаты измерений сведены в таблицу.

Количество импульсов	180 мДж/см ²	660 мДж/см ²
1	$\eta = 0,5\%$; $T = 4$ мкм; $\Delta n = 1,9 \times 10^{-3}$	$\eta = 1,55\%$; $T = 7$ мкм; $\Delta n = 3,37 \times 10^{-3}$
10	$\eta = 0,8\%$; $T = 5$ мкм; $\Delta n = 2,46 \times 10^{-3}$	*
100	–	–
1000	–	–

* – Высокое поглощение

Таблица. Результаты измерений

По результатам измерений получаем, что решетки с максимальной дифракционной эффективностью и наиболее пригодные к использованию соответствуют двум различным режимам записи – одноимпульсному с плотностью энергии 660 мДж/см² и многоимпульсному (10 импульсов с плотностью энергии 180 мДж/см² в импульсе). Остальные режимы с большим количеством импульсов и плотностью энергии ведут к разрушению материала (превышению порога абляции) и, как следствие, к большому поглощению во всем диапазоне длин волн.

Заключение

Получены брэгговские дифракционные структуры в кристалле ниобата лития в одноимпульсном и многоимпульсном режиме записи наносекундным КгF эксимерным лазером, обладающие большим динамическим диапазоном модуляции показателя преломления ($\Delta n \sim 3 \times 10^{-3}$) и дифракционной эффективностью $\sim 1,5\%$. Определены оптимальные режимы записи на длине волны 248 нм. Исследовано влияние плотности энергии и количества импульсов на характеристики записанных решеток.

Авторы выражают благодарность А.В. Шамраю, заведующему лабораторией квантовой электроники Физико-технического института им. Иоффе РАН, за предоставленные образцы кристалла ниобата лития и полезные обсуждения в ходе выполнения настоящей работы.

Литература

1. Серебрякова В.С. Оптимизация параметров изготовления интегрально-оптических элементов для волоконно-оптических гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 49. – С. 42–53.
2. Pierno L., Dispenza M., Secchi A. A lithium niobate electro-optic tunable Bragg filter fabricated by electron beam lithography // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2008. – V. 10. – № 6. – P. 1–6.
3. Shamray A.V., Ilichev I.V., Kozlov A.S. Controllable Holographic Optical Filters in Photorefractive Crystals // Journal of Holography and Speckle. – 2009. – № 5. – P. 1–10.
4. Ryoung-Han Kim. Design and fabrication of highly efficient electrooptic modulators using Bragg gratings reflectors / Ph.D. dissertation. – Texas A&M University, 2005. – 140 p.
5. Sones C., Valdivia C., Scott J. Ultraviolet laser induced sub-micron periodic domain formation in congruent undoped lithium niobate crystals // Appl. Phys. B. – 2005. – V. 80. – P. 341–344.
6. Luo G.P., Lu Y.L., Ming N.B. LiNbO₃ phase gratings prepared by a single excimer pulse through a silica phase mask // Appl. Phys. Lett. – 1996. – V. 69. – P. 1352–1354.
7. Luo Guipeng, Wu Haiming. Periodic surface structures fabricated by one excimer laser pulse through a silica phase mask grating // Chinese Science Bulletin. – 1997. – V. 42. – 1997. – P. 1787–1792.

- Брунов Вячеслав Сергеевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, brunov@oi.ifmo.ru
- Варжель Сергей Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vsv187@gmail.com
- Никоноров Николай Валентинович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, nikonov@oi.ifmo.ru
- Стригалева Владимир Евгеньевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru