

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ С ВЫСОКОЙ ЛУЧЕВОЙ СТОЙКОСТЬЮ ДЛЯ КОМПРЕССИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В. П. Иванов, А. И. Любимов, А. Ф. Скочилов

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики»,
Казань, Россия

В статье рассмотрены вопросы разработки диэлектрических дифракционных решеток с высокой лучевой стойкостью для компрессии лазерных импульсов, в том числе возможности получения крупноформатных диэлектрических дифракционных решеток.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в разработке твердотельных лазерных систем петаваттного уровня мощности с импульсами сверхкороткой (пико- и фемтосекундной) длительности [1].

Такие лазерные установки создаются и работают по принципу CPA (Chirped Pulse Amplification), который заключается в усилении широкополосных чирпированных импульсов в неодимовых стеклах, формировании требуемой формы спектра усиливаемого импульса и конструировании компрессора на основе дифракционных решеток [2, 3].

Ограничивающим фактором по выходной мощности таких лазерных систем, построенных по принципу CPA, является лучевая стойкость оптических элементов, входящих в состав лазерной системы, в том числе дифракционных решеток лазерного компрессора.

Лучевая стойкость отражательных дифракционных решеток в настоящее время очень низкая, по сравнению с другими оптическими элементами. На сегодняшний день, дифракционные решетки с металлизированным золотым покрытием имеют лучевую стойкость около $0,5\text{--}0,7$ Дж/см² [4] и не

удовлетворяют современным повышенным требованиям к этим элементам.

Поэтому разработчикам лазерных систем приходится либо использовать в конструкции компрессора составные дифракционные решетки, либо идти на значительное увеличение их размеров (до 1 метра).

Моделирование распределения амплитуды электрического поля вблизи поверхности металл-диэлектрических дифракционных решеток с высокой дифракционной эффективностью при освещении когерентной плоской волной показывает, что в результате взаимодействия между падающей и дифрагированной волнами образуется интерференционная картина «стоячих» волн (рис. 1).

Интенсивное электрическое поле проникает в материал, образующий решетку, до подложки. Усиление поля в этих «горячих» зонах за счет интерференции будет всегда больше единицы, нормированной к напряженности поля падающей волны.

Результаты по исследованию лучевой прочности, показывают, что разрушения происходят на краях штрихов решетки [5], что согласуется с результатами модели.

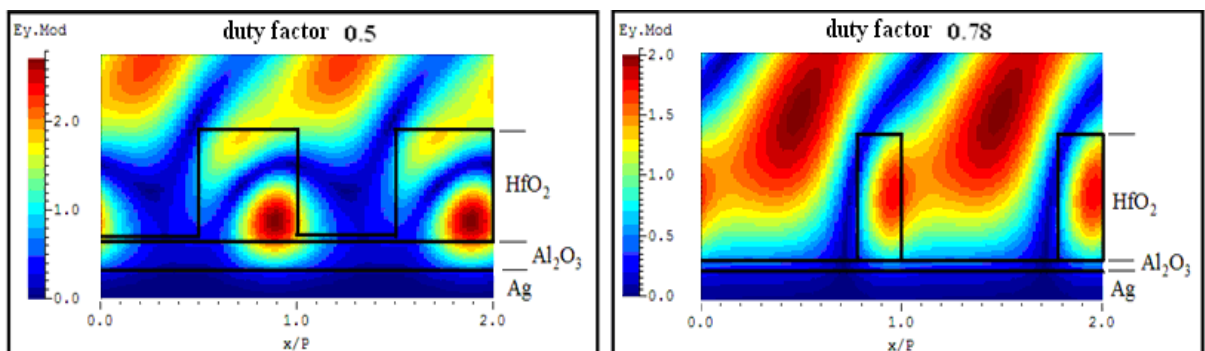


Рис. 1. Распределение амплитуды электрического поля для металл-диэлектрических решеток с различным коэффициентом заполнения (duty factor) штриха

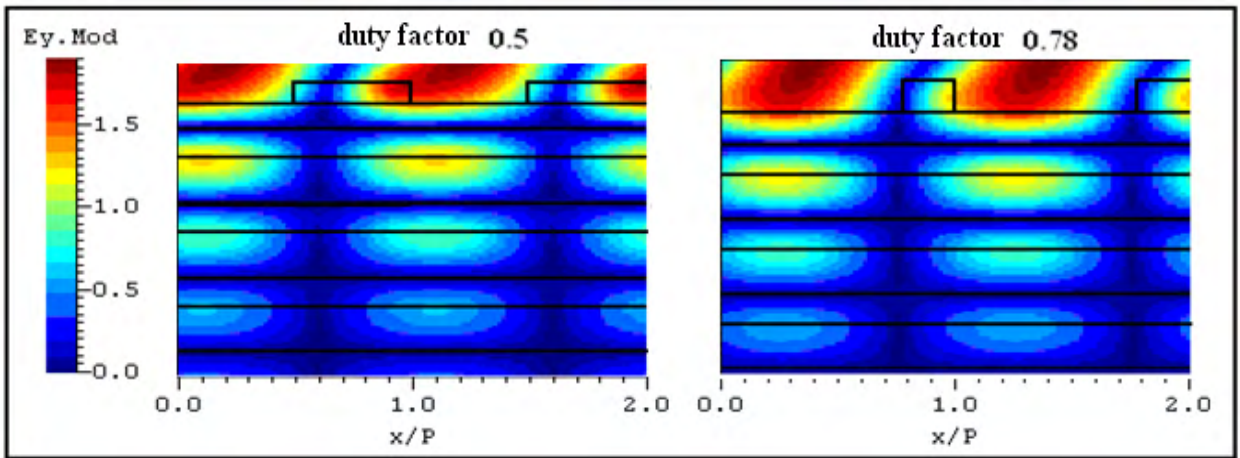


Рис. 2. Распределение амплитуды электрического поля для металл-диэлектрических решеток с различным фактором заполнения (duty factor) штриха

При коэффициенте заполнения равном 0,5 электрическое поле значительно проникает в штрих и амплитуда электрического поля (E_y) имеет значение около 2, а при коэффициенте заполнения равном 0,78 значение E_y приближается к 1,7–1,8, что указывает на недостаточную стойкость таких решеток к оптическому пробою.

Ограниченное применение дифракционных решеток с металлическим покрытием (золото, серебро) для средней и большой пиковой мощности потребовало разработки технологии многослойных диэлектрических дифракционных решеток (ДДР).

Наши расчеты ДДР были направлены на минимизацию амплитуды электрического поля, существующего в объеме штриха и материалах нижележащих интерференционных слоев.

В качестве примера на рис. 2. представлен расчет многослойной ДДР на подложке из кварца (SiO_2), состоящей из многослойного зеркала (19 четвертьволновых слоев HfO_2 и SiO_2), промежуточного слоя кварца и верхнего слоя двуокиси гафния, имеющего гофрированную границу с воздухом прямоугольного профиля.

Распределения амплитуды электрического поля вблизи гофрированных границ ДДР имеют одно важное отличие (рис. 2) от распределения электрического поля металл-диэлектрических решеток при одинаковых факторах заполнения штриха. Для металл-диэлектрических решеток характерно, что высокая величина амплитуды электрического поля всегда находится внутри штриха, в то время как при изменении коэффициента заполнения штриха ДДР электрическое поле концентрируется в большей мере между штрихами.

При коэффициенте заполнения 0,5 электрическое поле значительно проникает в штрих и E_y имеет значение $\sim 1,8$, в то время как при коэффициенте заполнения 0,78 значение E_y приближается к 1,2–1,3. В последнем случае лучевая прочность второй конструкции ДДР будет в 1,5 раза выше [6].



Рис. 3. Фото диэлектрической дифракционной решетки

В АО «НПО ГИПО» в период с 2015 по 2016 годы проводилась работа по отработке технологии получения ДДР.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных работ в АО «НПО ГИПО», впервые получены отечественные образцы голограммных диэлектрических дифракционных решеток (рис. 3.) со следующими параметрами: частота штрихов ДДР 1740 мм^{-1} , дифракционная эффективность в минус 1 первом порядке дифракции 0,93, при угле падения лазерного излучения 70° с длиной волны 1053 нм. Лучевая прочность ДДР составила $2,8 \text{ Дж/см}^2$.

Заключение

Выбраны и реализованы конструкции голограммных диэлектрических дифракционных решеток, обеспечивающие: дифракционную эффективность 0,93 (ТЕ – поляризация) и лучевую прочность до 2,8 Дж/см² при длительности лазерного импульса 1–3 нс.

Разработка технологии производства такого класса ДДР позволит решить проблему импортозамещения для отечественных разработчиков мощных лазерных систем.

Список литературы

1. Коржиманов А. В., Гносков А. А., Хазанов Е. А., Сергеев А. М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов // УФН. 2011. Т. 181, № 1. С. 9–32.

2. Miller G. H., Moses E. I., Wuest C. R. The National Ignition Facility // Optical Engineering. 2004. V. 43, N 12. P. 2841–2853.

3. Andre M. L. Status of the LMJ project // Proceedings 2-d Annual Conference SolidLaser for Application to ICF, October 1996, Paris, France, ed. M. L. Andre SPIE, Vol. 3047, 38 (1997).

4. Neauport J., Lavastre E., Razé G. et al. Effect of electric field on laser induced damage threshold of multilayer dielectric gratings // Optics express, 17 September, 2007. Vol. 15, N 19. P. 12508–12522.

5. Stuart B. C., Feit M. D., Herman S. M., Rubenchik A. M., Shore B. W., Perry M. D. Ultrashort-Pulse Optical Laser-Induced Damage in Optical Materials // 27th Boulder Damage Symposium, H. E. Bennett et al., eds, Proc. SPIE vol. 2714, 616-627, (1995).

6. Skochilov A. F., Lyubimov A. I., Belokopytov A. A., Korennoy K. S. // Laser pulse compression gratings. Proc. of 11 Int. conf. HoloExpo 2014 (September 2014, Sochi), Moscow, 2014. P. 172–177.