

УДК 535.421

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК С ВЫСОКОЙ ЛУЧЕВОЙ СТОЙКОСТЬЮ ДЛЯ КОМПРЕССИИ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2005 г. А. А. Андреев, доктор физ.-мат. наук; В. Д. Винокурова, канд. физ.-мат. наук; Р. Р. Герке; Е. Г. Салль; В. Е. Яшин, доктор физ.-мат. наук

НИИ лазерной физики, Санкт-Петербург

Показано, что при нанесении диэлектрического покрытия происходит отклонение формы его профиля от первоначальной формы профиля металлической решетки ("замывание"). Путем численного моделирования и измерений на электронно-лучевом микроскопе определена величина замывания. Показано, что уменьшение глубины штрихов является основным фактором, снижающим дифракционную эффективность и лучевую стойкость металлических дифракционных решеток с многослойными диэлектрическими покрытиями. Оптимизация условий нанесения таких покрытий, в том числе и с использованием диэлектриков с большой разностью показателей преломления, позволяет сгладить эффект замывания.

Коды OCIS: 140.3290.

Поступила в редакцию 06.09.2004.

### Введение

Для получения сверхкоротких лазерных импульсов с мультитераваттной и даже петаваттной мощностью используется техника сжатия частотно-модулированного (чирпированного) импульса в компрессоре, состоящем из пары дифракционных решеток. Такие решетки работают в  $-1$ -м порядке дисперсии в режиме, близком к автоколлимационному. В обычном двухпроходовом компрессоре пучок отражается от решеток четыре раза. Таким образом, если дифракционная эффективность (ДЭ) каждой решетки в минус первом порядке равна  $\eta$ , то результирующая эффективность компрессора будет равна  $\eta^4$ , и даже небольшое увеличение ДЭ решеток приведет к значительному росту эффективности компрессора.

Для решеток, используемых в мощных лазерных системах, большое значение имеет также их высокая лучевая стойкость. Именно ограниченная лучевая стойкость решеток приводит к тому, что для сжатия импульсов большой энергии приходится использовать дифракционные решетки большой апертуры, которые не только имеют высокую стоимость, но и увеличивают габариты компрессора в целом [1].

Одним из способов повышения лучевой стойкости и дифракционной эффективности является создание металлических решеток с многослойным диэлектрическим покрытием. Покрытие должно, с одной стороны, ослабить в несколько раз поток энергии, доходящий до металла, а с другой – за счет интерференционных эффектов, возникающих вследствие чередования диэлектрических слоев с резко

различными показателями преломления, обеспечить высокую ДЭ решетки.

### Результаты расчета и эксперимент

Для определения оптимальных параметров решетки с диэлектрическими покрытиями мы использовали численный метод, описанный в работах [2, 3]. Важнейшими безразмерными параметрами задачи являются  $\lambda D$  и  $H/D$ , где  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $D$  – период решетки,  $H$  – глубина штриха. Расчеты показывают, что для металлических решеток высокая ДЭ  $\eta > 80\%$  имеет место в широкой области  $1 < \lambda D < 2$ . Однако чем большее число пар диэлектрических слоев наносится на металлическую решетку, тем уже становится ее частотная рабочая область. Например, для решетки с двумя парами диэлектрических слоев высокая ДЭ и хорошая защита металла от падающего излучения достигаются при  $\lambda D = 1,8 \pm 0,1$ . Таким образом, для каждого типа лазеров, характеризующегося длиной волны генерации и усиления, необходимо использовать решетки с определенным периодом. Так, для лазера на неодимовом стекле ( $\lambda = 1,05$  мкм) оптимальными являются решетки с  $N \approx 1750$  штр/мм. В дальнейшем мы остановимся на оптимизации решеток для рабочей области  $\lambda = 1,05$  мкм.

В численной модели рассматривалась решетка с синусоидальной формой профиля штрихов, частота которых была равна 1700 штр/мм. На металлической поверхности решетки располагаются пары диэлектрических слоев, состоящих (сверху вниз) из слоя  $\text{HfO}$  (показатель преломления  $n = 1,95$ ) и слоя



$\text{SiO}_2$  ( $n = 1,45$ ). Такая решетка должна работать на длине волны  $\lambda = 1,05$  мкм в режиме, близком к автоколлимационному.

В работах [2, 3] численному варьированию подвергались число слоев, их толщины  $d_i$ , глубины профиля штриха, причем подразумевалось, что форма профилей штрихов на границе раздела сред сохраняется от слоя к слою. Максимальные значения дифракционной эффективности (ДЭ = 98%) и лучевой стойкости были получены для решеток с отношением глубины к периоду  $H/D = 0,3$  с двумя парами диэлектрических слоев  $d_1 = d_3 = 140$  нм,  $d_2 = d_4 = 240$  нм, нанесенных на отражающее покрытие из золота.

Однако изготовленные образцы решеток с указанными выше параметрами показали в области  $\lambda = 1,05$  мкм ДЭ на 10% ниже расчетной. По нашему мнению, несоответствие эксперимента и теории может быть вызвано двумя причинами. Во-первых, при последовательном напылении на металлическую решетку слоев диэлектрика сложно обеспечить высокую точность толщины слоя. На практике она находится в пределах  $\pm 10\%$ . Мы численно рассмотрели влияние случайных отклонений толщины каждого из наносимых слоев от оптимальных значений на ДЭ решетки. Расчет показывает, что при ошибке  $\pm 10\%$  для  $\lambda = 1,05$  мкм ДЭ решетки с эквидистантным покрытием стабильна (ее изменение не превышает 3%).

Во-вторых, при нанесении диэлектрического покрытия возможно отклонение формы его профиля от первоначальной формы профиля металлической решетки (неэквидистантное покрытие).

### Определение величины замывания

Получение эквидистантных покрытий сталкивается с технологическими сложностями. Такие покрытия могли бы быть получены лишь при перемещении частиц напыляемого диэлектрика по нормали к плоскости решетки. Но реально при изготовлении дифракционных решеток с многослойным диэлектрическим покрытием путем последовательного напыления слоев диэлектрика вектор скорости частиц испаряемого диэлектрика имеет некоторое угловое распределение. Это приводит к постепенному уменьшению глубины профиля поверхности покрытия (замыванию профиля) и к отклонению его формы от синусоидальной. На рис. 1 изображены профили границ раздела диэлектриков при гипотетической модели напыления, когда толщина напыляемого слоя растет равномерно по нормали к его поверхности. Такая модель, по нашему мнению, соответствует равномерному угловому распределению скоростей частиц напыляемого диэлектрика.

Определим коэффициент замывания как отношение глубины штрихов на поверхности напыляемого

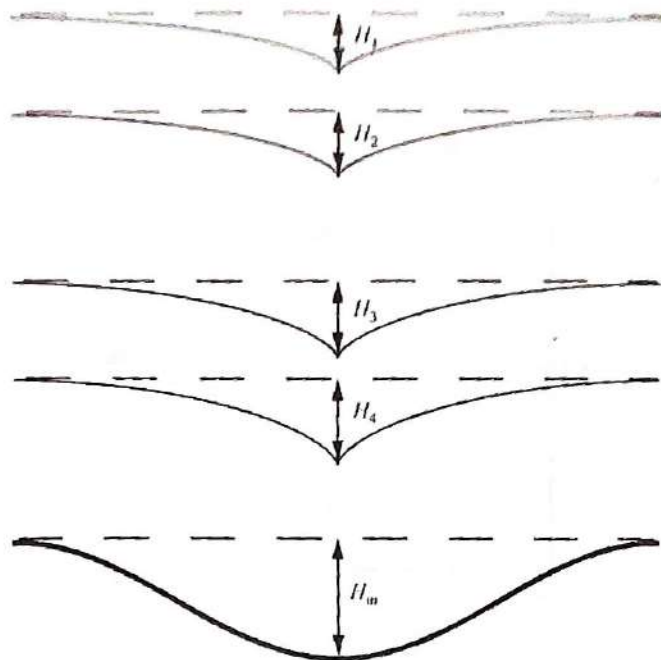


Рис. 1. Модель изменения профиля штрихов дифракционной решетки с четырехслойным покрытием в предположении, что рост толщины покрытия происходит вдоль нормали к поверхности.

диэлектрика  $H_{\text{coat}}$  к глубине штрихов металлизированной основы решетки  $H_m$ . Замывание зависит от толщины наносимого покрытия и от исходной глубины металлизированной решетки. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента замывания от толщины покрытия для рассмотренной выше модели напыления.

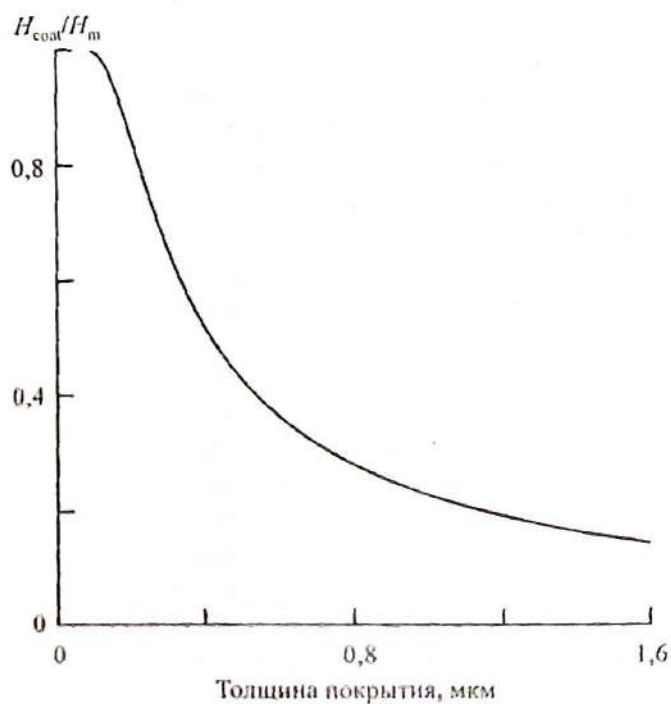


Рис. 2. Зависимость расчетного значения коэффициента замывания поверхностного профиля решетки от толщины покрытия для  $H_m/D = 0,3$  в предположении, что рост толщины покрытия происходит вдоль нормали к поверхности.



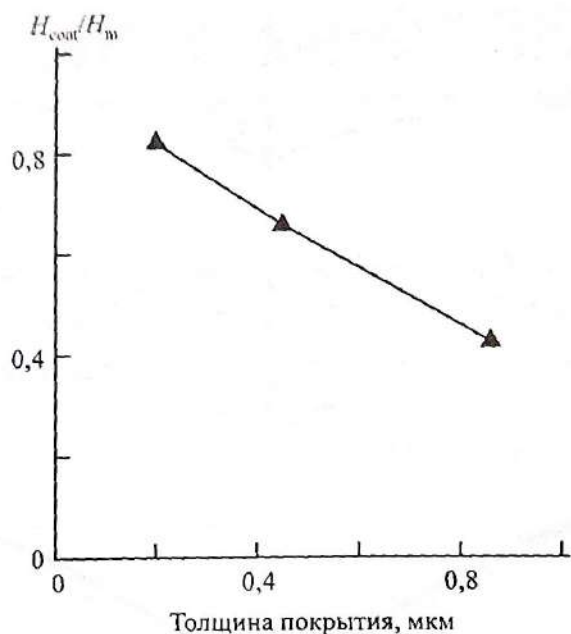


Рис. 3. Зависимость установленного значения коэффициента замыывания поверхностного профиля решетки от толщины покрытия для  $H_m/D = 0,3$ .

Для проверки модели замыывания было проведено экспериментальное определение коэффициента замыывания. С этой целью была измерена спектральная зависимость ДЭ решетки с 1700 штр/мм и относительной глубиной  $H_m/D = 0,3$ , покрытой слоем золота толщиной 200 нм. После этого на поверхность золота были нанесены две пары слоев  $SiO_2$  и  $HfO$  толщиной 180 и 160 нм соответственно. Поверхность получившейся многослойной структуры была покрыта слоем золота толщиной 200 нм. Кривая спектральной зависимости ДЭ этой золоченой решетки идет значительно ниже, чем для исходной с относительной глубиной  $H_m/D = 0,3$ .

Такое уменьшение ДЭ может быть вызвано значительным уменьшением глубины рельефа решетки и изменением формы ее профиля. Сопоставление результатов расчета и измерений позволяет сделать вывод об уменьшении глубины профиля поверхности диэлектрика при напылении его на гофрированную металлическую основу при незначительных отклонениях формы профиля штриха от синусоидальной. Коэффициент замыывания рельефа при нанесении на поверхность решетки с относительной глубиной  $H_m/D = 0,3$  слоя толщиной 880 нм составляет 0,42. Аналогичным способом был измерен коэффициент замыывания при нанесении на поверхность такой решетки слоя толщиной 200 и 480 нм (рис. 3). Сравнение кривых на рис. 2 и на рис. 3 показывает, что реальное замыывание меньше, чем замыывание, определяемое равномерным по углу распределением скоростей напыляемого диэлектрика. Это позволяет сделать вывод о преобладании частиц испаряемого диэлектрика с составляющей вектора скорости вдоль нормали к плоскости решетки.

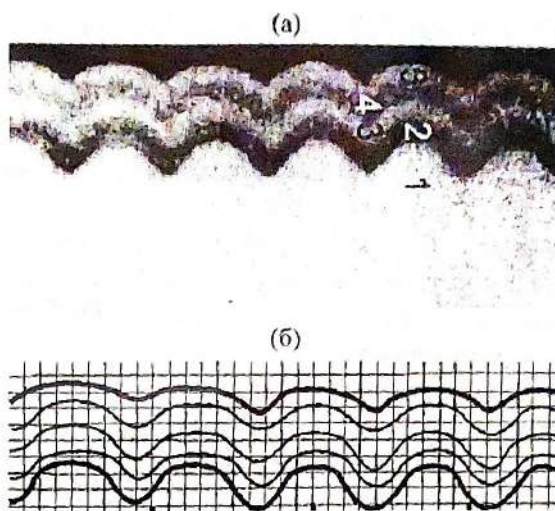


Рис. 4. а – изображение поперечного среза решетки с частотой 1200 штр/мм с покрытием, состоящим из двух пар слоев  $SiO_2$  и  $HfO$  толщиной 180 и 130 нм, полученное с помощью электронно-лучевого микроскопа; б – профили границ раздела между слоями в диэлектрическом покрытии решетки, полученные при обработке изображения на рис. 4а.

Непосредственное измерение величины замыывания рельефа решетки было проведено с помощью электронно-лучевого микроскопа. На рис. 4а показано изображение поперечного среза решетки с частотой 1200 штр/мм с покрытием, состоящим из двух пар слоев  $SiO_2$  и  $HfO$  толщиной 180 и 130 нм. Профили границ раздела между слоями, полученные при обработке этого изображения, показаны на рис. 4б. Наблюдаются как уменьшение глубины профиля слоев в покрытии, так и отклонение формы профиля покрытия от синусоидальной формы профиля металлизированной решетки. Математическая обработка данных по профилям границ раздела слоев в покрытии, приведенных на рис. 4б, показывает, что зависимость коэффициента замыывания от толщины слоя покрытия хорошо соответствует кривой на рис. 3.

### Оптимизация энергетических характеристик решетки

Замывание профиля границ раздела диэлектриков в покрытии решетки влияет на ее энергетические характеристики, приводя к уменьшению дифракционной эффективности и лучевой стойкости в рабочей области спектра. Для примера рассмотрим решетку с  $N = 1700$  штр/мм и относительной глубиной  $H_m/D = 0,3$ , покрытую двумя парами слоев  $HfO$  и  $SiO_2$  толщиной 140 и 240 нм. В дальнейшем будем предполагать линейную зависимость (рис. 3) коэффициента замыывания с увеличением толщин слоев покрытия. Расчеты показывают, что если при эквидистантном покрытии для длины волны падающего излучения  $\lambda = 1,05$  мкм ДЭ = 98% и до металла доходит 30% падающей энергии, то при наличии за-



мывания ДЭ = 91% и до металла дойдет половина энергии падающего излучения.

Для оптимизации энергетических характеристик решеток с покрытиями в зависимости от ее структурных параметров следует рассматривать дифракционную эффективность и лучевую стойкость в совокупности. Связь между этими характеристиками вследствие сложности интерференционных эффектов не тривиальна. Например, в работе [4] обнаружена область значений толщин слоев покрытия, для которой даже при наличии замывания ДЭ решетки очень высока. Но при этом, как показывают расчеты, до поверхности металла доходит 98% энергии падающего извне излучения и лучевая стойкость такой решетки оказалась практически равной стойкости металлизированной не покрытой диэлектрическими слоями решетки. Оба эти факта были подтверждены экспериментально.

Для эквидистантных покрытий увеличение числа слоев в покрытии приводит к повышению ДЭ и к повышению лучевой стойкости решетки вследствие увеличения доли энергии, отражающейся от границ слоев покрытия [2]. Наличие установленного замывания нивелирует этот эффект. Так, использование четырех пар слоев, как показывают расчеты, позволит уменьшить долю падающей на металл энергии до 33% от полной энергии, падающей на структуру, но приведет к уменьшению ДЭ решетки до 74%. Таким образом, увеличение числа диэлектрических слоев в покрытии не позволяет решить проблему повышения лучевой стойкости высокоэффективной решетки.

Другой путь повышения дифракционной эффективности и лучевой стойкости решетки – использование для диэлектрического покрытия материалов с более контрастными показателями преломления. Если в качестве материала покрытий выбрать  $\text{TiO}_2$  ( $n_1 = 2,45$  при нанесении с прогревом) и  $\text{SiO}_2$  ( $n_2 = 1,45$ ), то общая толщина покрытия, состоящего из двух пар четвертьволновых диэлектрических слоев, составит 580 нм. Спектральная зависимость ДЭ для золоченой решетки с  $N = 1800$  штр/мм и относительной глубиной  $H_m/D = 0,3$ , с двумя парами диэлектрических покрытий толщиной  $d_1 = 107$  нм и  $d_2 = 181$  нм показана на рис. 5. При типичной ошибке в толщине напыляемых диэлектрических слоев  $\pm 10\%$  ДЭ на длине волны 1,05 мкм останется в пределах 97%, а часть доходящей до поверхности металла энергии не превысит 25% от энергии падающего на поверхность решетки излучения.

Таким образом, использование пар диэлектрических слоев с более контрастными показателями преломления позволяет увеличить лучевую стойкость высокоэффективной решетки с синусоидальной формой профиля штриха в четыре раза по сравнению с металлической решеткой.

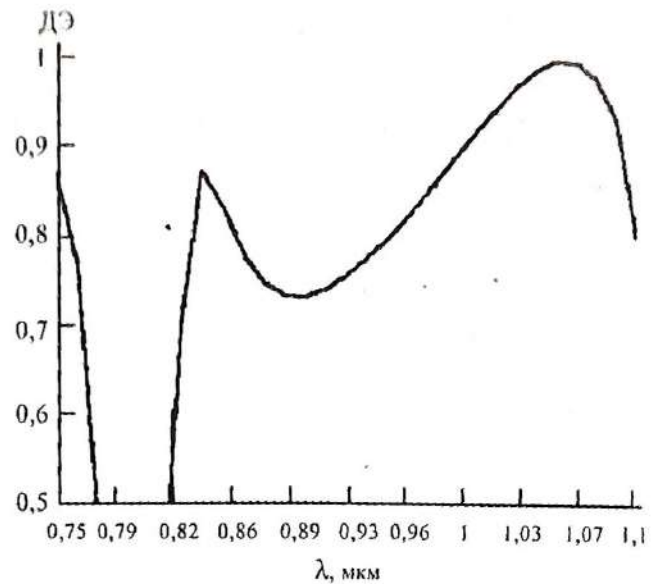


Рис. 5. Спектральная зависимость ДЭ для золоченой решетки с синусоидальной формой профиля штриха, 1800 штр/мм, относительной глубиной  $H_m/D = 0,3$ , с двумя парами диэлектрических покрытий  $\text{TiO}_2$  ( $n_1 = 2,45$ ) и  $\text{SiO}_2$  ( $n_2 = 1,45$ ) толщиной  $d_1 = 107$  нм и  $d_2 = 181$  нм при установленном значении коэффициента замывания (рис. 3).

## Заключение

Численное моделирование и измерения, проведенные с помощью электронного микроскопа, показали, что замывание глубины штрихов является основным фактором, снижающим дифракционную эффективность и лучевую стойкость металлических дифракционных решеток с многослойными диэлектрическими покрытиями. Оптимизация условий нанесения таких покрытий, в том числе и с использованием диэлектриков с более контрастными показателями преломления, позволяет сгладить эффект замывания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.А., Мак А.А., Яшин В.Е. Генерация и применение сверхсильных лазерных полей // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. В. 2. С. 99–114.
2. Винокурова В.Д., Герке Р.Р. Численное моделирование голограммных дифракционных решеток с покрытиями для компрессии мощных лазерных импульсов // Опт. и спектр. 1997. Т. 83. № 6. С. 990–994.
3. Андреев А.А., Винокурова В.Д., Шацев А.Н. Оптимизация лучевой стойкости дифракционных решеток на основе численного моделирования // Опт. и спектр. 1998. Т. 85. № 2. С. 281–286.
4. Винокурова В.Д., Герке Р.Р., Салль Е.Г., Яшин В.Е. О влиянии неэквидистантности диэлектрических покрытий и профиля штриха на энергетические характеристики голограммных дифракционных решеток // Опт. и спектр. 2002. Т. 93. № 2. С. 328–330.