

Металлизированные голографические дифракционные решетки с повышенной лучевой стойкостью для систем компрессии лазерных импульсов

В.Д.Винокурова, Р.Р.Герке, Т.Г.Дубровина, М.Д.Михайлов,
Е.Г.Салль, А.В.Чарухчев, В.Е.Яшин

Рассмотрены методы повышения лучевой стойкости и прочности металлизированных дифракционных решеток для оптических систем компрессии импульсов. Показано, что модификация способа нанесения золота на поверхность решетки, записанной голографическим методом, позволяет существенно повысить порог разрушения решеток. Показано также, что использование дополнительных диэлектрических покрытий дает возможность дополнительного двукратного увеличения порога разрушения для наносекундных лазерных импульсов.

Ключевые слова: дифракционная решетка, дифракционная эффективность, лучевая стойкость, оптический пробой.

1. Введение

В настоящее время металлизированные дифракционные решетки являются основным дисперсионным элементом, применяемым для компрессии мощных чирпированных лазерных импульсов [1, 2]. Однако лучевая стойкость таких решеток существенно (на порядок и более) уступает стойкости остальных элементов лазерных систем, что приводит к необходимости использования компрессоров с большой световой апертурой. Так, например, в лазерных системах с петаваттным уровнем мощности [3] поперечный размер решеток достигает 1 м. Еще больший размер решеток необходим для достижения эксаваттного (10^{18} Вт) и зеттаваттного (10^{21} Вт) уровней пиковой мощности. Возможности создания таких лазерных систем рассматриваются, например, в работе [4]. Такой большой размер решеток и следующих за ними оптических элементов (элементов диагностирующей и фокусирующей оптики) приводит к сильному увеличению их стоимости и стоимости всей лазерной системы. По этой причине поиск путей и разработка способов повышения лучевой стойкости решеток, несомненно, являются актуальными задачами. При этом увеличение прочности не должно сопровождаться снижением дифракционной эффективности (ДЭ) решеток, превышающей в настоящее время 90 % [5].

Существует несколько методов повышения лучевой стойкости решеток [2], включая перспективный метод создания специального профиля решетки на диэлектрическом зеркале [6, 7]. Однако и возможности увеличения

стойкости традиционных металлизированных решеток, для производства которых существует хорошо отработанный технологический процесс, еще далеко не исчерпаны. Эти возможности заключаются в оптимизации толщины и способа нанесения металлического покрытия и будут рассмотрены в настоящей работе. В результате такой оптимизации лучевая стойкость была повышена в три раза. Дополнительная возможность увеличения прочности состоит в нанесении на металлические покрытия защитных диэлектрических слоев, что дает двукратный рост порога разрушения и позволяет сохранить высокую ДЭ в определенном участке спектра.

2. Исследование методов повышения порогов разрушения металлизированных дифракционных решеток

Для изготовления дифракционных решеток использовался разработанный ранее технологический процесс [8], заключающийся в интерференционной записи голографических решеток на светочувствительном халькогенидном стекле излучением аргонового лазера, травлении записанной голограммы и последующем нанесении на решетки металлического слоя. В качестве металлического покрытия решеток, применяемых для сжатия мощных лазерных импульсов, используется, как правило, золото. Это связано с тем, что золото обеспечивает более высокие пороги разрушения, чем, например, алюминий, и практически не меняет своих отражательных свойств на воздухе с течением времени. Обычная толщина золотого покрытия, наносимого, чаще всего, методом электронно-лучевого испарения, составляет 200 нм, что сравнимо с глубиной профиля решетки h .

Возможность увеличения лучевой прочности металлических покрытий связана с увеличением их толщины и плотности. Однако увеличение толщины покрытия при электронно-лучевом способе его нанесения ограничено эффектом уменьшения глубины профиля штрихов и искажения самого профиля, что приводит к падению ДЭ. Этот эффект иллюстрируется электронно-лучевой фотографией (рис. 1), на которой явно наблюдается изменение

В.Д.Винокурова, Е.Г.Салль, В.Е.Яшин. ФГУП «НИИ лазерной физики», Россия, 199034 С.-Петербург, Биржевая л., 12; e-mail: vinokurova@ilph.spb.ru, elena_sall@mail.ru, Vladimir_yashin@mail.ru

Р.Р.Герке, Т.Г.Дубровина, М.Д.Михайлов. ЗАО «Хологрэйт», Россия, 190068 С.-Петербург, Вознесенский просп., 39; e-mail: gerke@holograte.com, tg@holograte.com, mikhail@mail.holograte.com

А.В.Чарухчев, ФГУП «НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем», Россия, 188540 Сосновый Бор, Ленинградская обл.; e-mail: avc@niiki.ru

Поступила в редакцию 16 марта 2005 г.

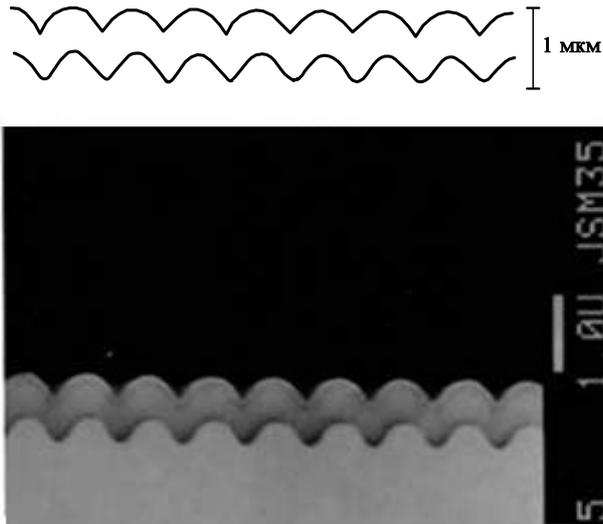


Рис.1. Фотография (внизу) рельефного профиля голографической решетки с частотой штрихов $N = 1200$ штр./мм, на поверхность которой нанесена электронно-лучевым способом пленка хрома толщиной 400 нм, и обработка этой фотографии (вверху).

профиля штрихов. Влияние такого изменения на ДЭ решетки показано на рис.2. Из него видно, что с увеличением толщины пленки золота от 200 до 400 нм ДЭ заметно уменьшается в коротковолновой части спектра. Вместе с тем для длинноволнового участка спектра высокие значения эффективности сохраняются. Дальнейшее увеличение толщины пленки золота приводит к спаду эффективности решетки во всем рабочем спектральном диапазоне. Измеренный порог разрушения решеток с пленкой золота толщиной 400 нм составил $0.5-0.6$ Дж/см², что примерно вдвое больше порогов для пленки толщиной 200 нм. Таким образом, электронно-лучевой способ распыления золота не всегда позволяет повысить лучевую стойкость решетки при увеличении толщины отражающего слоя и сохранении высокой ДЭ.

В связи с этим нами был испытан другой – магнетронный – способ нанесения пленочного золотого покрытия, позволяющий улучшить световую стойкость. Аргументами в его пользу служат более высокие, чем при использовании электронно-лучевого метода, равномерность нанесения металлической пленки и плотность покрытия.

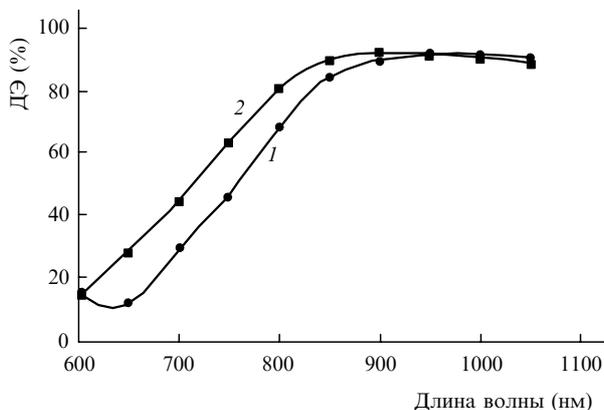


Рис.2. Спектральная зависимость ДЭ решетки с $N = 1200$ штр./мм и нанесенной на ее поверхность отражающей пленкой золота толщиной 400 (1) и 200 нм (2).

Сравнивая технологии магнетронного распыления золота с технологией электронно-лучевого испарения этого металла, отметим, что средняя энергия частиц при магнетронном распылении в несколько десятков раз выше, чем при электронно-лучевом, что способствует большему проникновению частиц в подложку и более плотной упаковке атомов на ее поверхности. В результате при напылении получается пленка металла лучшего качества. Кроме того, электронно-лучевое распыление обычно проводится при более высоком вакууме и больших температурах металла (примерно равных температуре плавления). Испаряемые атомы имеют большую длину свободного пробега и движутся к подложке по практически прямым траекториям в соответствии с диаграммой направленности испаряемого вещества. Вследствие этого при наличии на подложке рельефной поверхности на ней образуются участки затенения и неравномерность напыления увеличивается, приводя к искажению профиля.

При магнетронном распылении металла длина пробега испаренных частиц существенно уменьшается, т. к. распыление происходит при существенно более высоких давлениях остаточного газа (5×10^{-3} мбар). Поэтому в результате столкновений испаряемых частиц с молекулами газа диаграмма направленности этих частиц расширяется, уменьшая влияние эффекта затенения. Эти качественные соображения подтверждают измерения профиля рельефа дифракционной решетки, сделанные на сканирующем электронном микроскопе (рис.3). Из рис.3 видно, что после напыления пленки металла толщиной 300 нм рельеф решетки практически не изменился и такая решетка может эффективно отражать излучение во всем рабочем диапазоне спектра. Это подтверждает рис.4, на котором приведены спектральные зависимости коэффициента отражения дифракционной решетки с частотой штрихов $N = 1200$ штр./мм при различных способах нанесения на ее поверхность отражающей пленки металла. Из рис.4 видно, что только магнетронный способ напыления золота позволяет получить максимальную ДЭ для всего рабочего спектрального диапазона.

Измерения порогов разрушения голографических дифракционных решеток с золотым покрытием толщиной 400 нм, наносимым магнетронным способом, показали, что для импульсов с длительностью 1.5 нс и длиной волны 1064 нм плотности энергии разрушения достигают 1 Дж/см². Это значение более чем втрое превышает порог разрушения для решеток с пленкой золота толщиной 200 нм, наносимой электронно-лучевым методом.

Дополнительное увеличение порога разрушения металлизированных дифракционных решеток можно получить при нанесении на металл нескольких пар диэлектри-

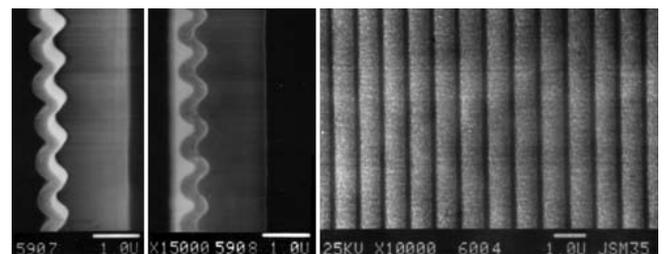


Рис.3. Фотографии рельефного профиля голографической решетки с $N = 1200$ штр./мм (слева) и решетки, на поверхность которой магнетронным способом нанесена алюминиевая пленка толщиной 300 нм (в центре). Справа – вид на решетку сверху.

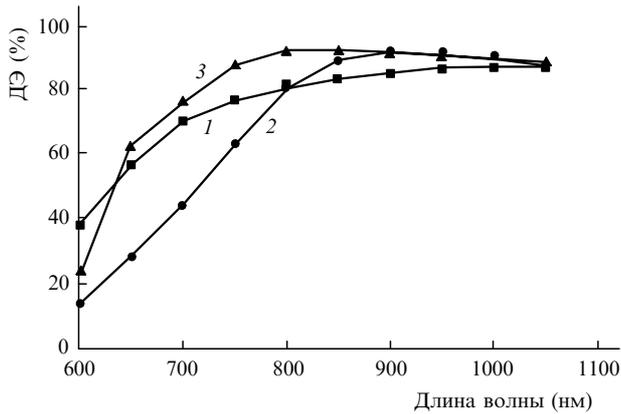


Рис.4. Спектральная ДЭ решетки с $N = 1200$ штр./мм при разных способах напыления отражающей пленки: напыление Al термическим способом (1) и напыление Au электронно-лучевым (2) и магнетронным (3) способами.

ческих слоев с высоким и низким показателями преломления [9]. Оптическая толщина слоев, подбираемая с помощью численного расчета, должна быть близка к $\lambda/4$. Работая как интерференционное зеркало, эти слои уменьшают интенсивность лазерного излучения на металле. Как показывают расчеты [10], в идеальном случае сохранения профиля решетки увеличение числа диэлектрических слоев позволяет уменьшить интенсивность излучения на металле в любое требуемое число раз. Однако основной проблемой такого способа увеличения лучевой прочности является изменение профиля штрихов решетки при нанесении «толстых» слоев диэлектриков [11]. Этот эффект иллюстрируется фотографией, сделанной на электронно-лучевом микроскопе (рис.5). Из рис.5 видно, что уже при нанесении двух пар диэлектрических слоев глубина профиля уменьшается примерно в два раза.

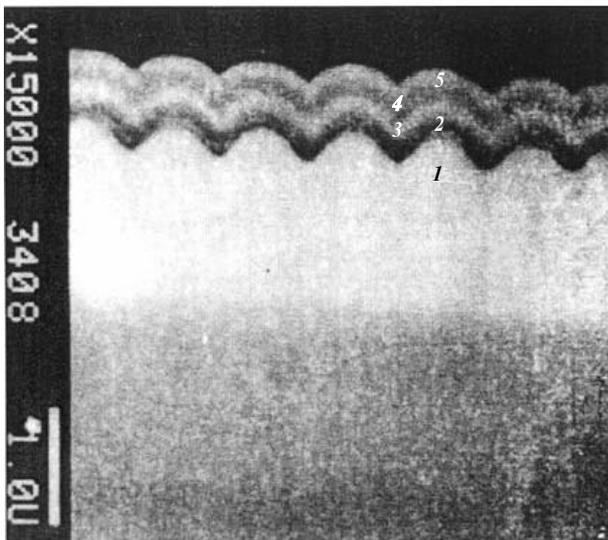
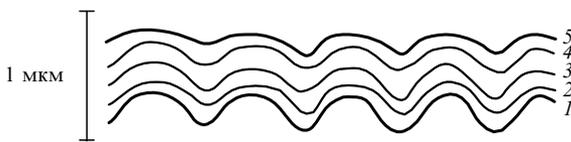


Рис.5. Фотография (внизу) рельефного профиля голографической дифракционной решетки с $N = 1700$ штр./мм, золотым покрытием и двумя парами дополнительных диэлектрических слоев $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$, а также обработка этой фотографии (вверху).

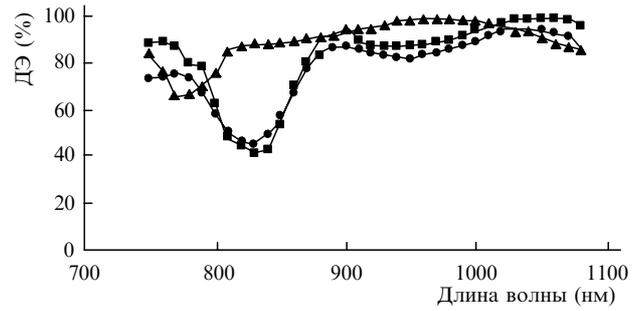


Рис.6. Влияние изменения рельефа штрихов на ДЭ металлизированной решетки с дополнительными диэлектрическими покрытиями из двух пар слоев $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$: результаты измерений (●) и численного расчета с учетом (■) и без учета (▲) изменения профиля.

Влияние данного эффекта на ДЭ решетки показано на рис.6. Качественное изменение зависимости ДЭ от длины волны такое же, как и для чисто металлизированных решеток с увеличенным слоем металла: ДЭ сильно падает в коротковолновой части спектра, сохраняя высокие значения (90 %) в длинноволновой области, где отношение длины волны падающего на решетку излучения к ее периоду больше 1.5. Уменьшение ДЭ в коротковолновом участке спектра в данном случае существенно превышает ее уменьшение для металлизированных решеток, что связано с резонансным характером интерференции. По этим причинам для эффективной работы решеток с диэлектрическими покрытиями в ближнем ИК диапазоне спектра ($\lambda = 700 - 1100$ нм) необходимо использовать решетки с $N > 1500$ штр./мм. Наши многократные измерения показали, что порог разрушения металлизированных дифракционных решеток с $N = 1700$ штр./мм и двумя дополнительными парами диэлектрических покрытий из SiO_2 и HfO_2 увеличивается в среднем в два раза для наносекундных лазерных импульсов. Дальнейшее увеличение пар диэлектрических слоев при технологически доступном отношении глубины профиля к периоду решетки ($h/d < 0.4$) приведет к заметному снижению ДЭ для оптимизированной частоты штрихов решетки.

Таким образом, для создания решеток с $N \approx 1200$ штр./мм, необходимых, например, для сжатия мощных широкополосных импульсов в системах параметрического усиления chirпированных импульсов [12], оптимальными являются чисто металлизированные решетки с увеличенной толщиной слоя золота, наносимого магнетронным методом. Такие решетки размером 380×240 мм и были изготовлены для параметрической системы.

С другой стороны, для мощных субпикосекундных лазерных систем на неодимовом или эрбиевом стекле [2 – 4, 13 – 15] вполне допустимо использование решеток с $N = 1500 - 1700$ штр./мм. Для них дополнительное двукратное повышение лучевой стойкости может быть получено при нанесении нескольких пар защитных диэлектрических слоев.

3. Заключение

Как показали наши исследования, лучевая стойкость традиционных металлизированных дифракционных решеток, наиболее широко используемых для сжатия мощных лазерных импульсов, может быть существенно повышена.

Увеличение толщины золотого покрытия и оптимизация способа его нанесения приводят к почти трехкрат-

ному увеличению лучевой прочности при сохранении высокой ДЭ во всем рабочем диапазоне спектра. Дополнительное двукратное повышение порога разрушения может быть достигнуто при нанесении двух пар диэлектрических слоев. Однако при этом высокая ДЭ сохраняется лишь для длинноволновой части спектра, что ограничивает частоту штрихов: $N \geq 1500$ штр./мм.

Таким образом, использование исследованных методов увеличения лучевой стойкости металлизированных дифракционных решеток может повысить порог разрушения решеток примерно в шесть раз для наносекундных лазерных импульсов, вплотную приближая их прочность к прочности экспериментальных решеток, создаваемых на диэлектрическом зеркале. Такое увеличение лучевой стойкости позволяет существенно уменьшить световую апертуру компрессоров петаваттных лазерных систем, создаваемых в настоящее время в различных научных центрах мира.

1. Strickland D., Mourou G. *Opt. Commun.*, **56**, 219 (1985).
2. Андреев А.А., Мак А.А., Яшин В.Е. *Квантовая электроника*, **24**, 99 (1997).
3. Perry M.D., Pennington D., Stuart B.C., et al. *Opt. Lett.*, **24**, 160 (1999).
4. Tajima T., Mourou G. <http://arXiv.org/physics/0111091> v.1, 2001.
5. Boyd R.D., Britten J.A., Decker D.E., Shore B.W., Stuart B.C., Perry M.D., Li L. *Appl. Opt.*, **34**, 1697 (1995).
6. Perry M.D., Boyd R.D., Britten J.A., Decker D.E., Shore B.W., Shannon C., Shults E. *Opt. Lett.*, **20**, 940 (1995).
7. Свахин А.С., Сычугов В.А., Тихомиров А.Е. *Квантовая электроника*, **21**, 250 (1994).
8. Герке Р.Р., Мамедов С.Б., Михайлов М.Л., Юсупов И.Ю., Яковук О.А. *Успехи научной фотографии*, **26**, 52 (1990).
9. Yashin V., Mak A., Bakh L., Yakovlev E., Gerke R., Usupov I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3291**, 199 (1998).
10. Андреев А.А., Винокурова В.Д., Шацев А.Н. *Оптика и спектроскопия*, **85**, 281 (1998).
11. Винокурова В.Д., Герке Р.Р., Салль Е.Г., Яшин В.Е. *Оптика и спектроскопия*, **93**, 328 (2002).
12. Андреев Н.Ф., Беспалов В.И., Бредихин В.И. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **79**, 178 (2004).
13. Maine P., Strickland D., Bado P., Pessot M., Mourou G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 398 (1988).
14. Бородин В.Г., Комаров В.М., Красов С.В., Малинов В.А., Мигель В.М., Никитин Н.В., Попов В.С., Потапов С.Л., Чарухчев А.В., Чернов В.Н. *Квантовая электроника*, **25**, 116 (1998).
15. Andreev A.A., Bayanov V.I., Chizhov S.A., Van'kov A.B., Kozlov A.A., Kurmin I.V., Solov'ev N.A., Yashin V.E. *Laser Phys.*, **8**, 565 (1998).