ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОРОГА РАЗРУШЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК С ЗОЛОТЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИХ МОЩНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

В. Н. Пугачева, П. А. Пугачев, И. С. Тимофеев, В. Н. Юфа

Московский физико-технический институт, г. Москва

Задача определения порога разрушения оптических элементов в фемтосекундных лазерных системах является одной из важнейших для получения предельных параметров (значений) концентрации мощности лазерного излучения в малых объемах вещества. Существует целый ряд физических явлений, которые препятствуют прямому усилению коротких лазерных импульсов. К таким явлениям следует отнести как оптический пробой, так и различные нелинейные эффекты, такие как, явление самофокусировки и вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна [1]. В этом случае широко используются системы с стретчированием фемтосекундного импульса (см. рис. 1), что позволяет, при определенном подборе параметров, увеличить длительность фемтосекудного импульса (~50–70 фс) до сотен пикосекунд (~200–300 пс), эффективно провести усиление и, скомпресировав его, получить высокую мощность излучения.

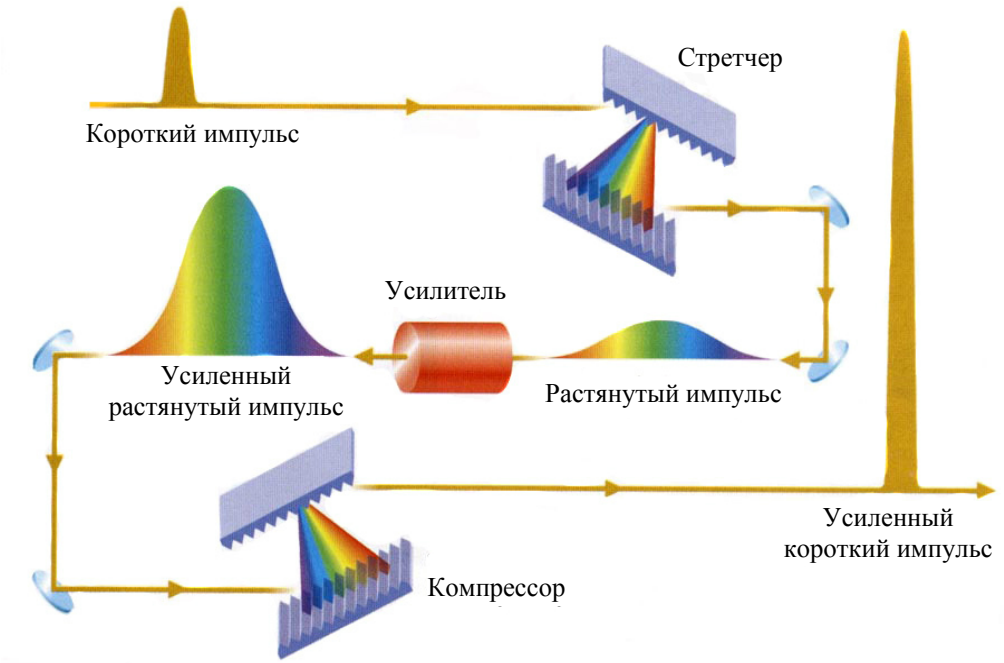


Рис. 1. Принцип работы схемы стретчер-компрессор

Увеличение длительности импульса во времени производится с помощью стретчера [2], представляющего собой пару дифракционных решеток, установленных под углом блеска (в соответствие со схемой Литрова [3]) к падающему импульсу. После отражении от первой дифракционной решетки и разложения в спектр, коротковолновая и длинноволновая составляющие, имеющие незначительную разницу в скоростях, проходят различные оптические пути. Вследствие этого, коротковолновая составляющая опережает длинноволновую, и мы получаем растянутый во времени лазерный импульс. Из-за различия скоростей спектральных составляющих импульса, расстояние между решетками, так же способствует увеличению его длительности, а специальная телескопиче-

ская система, устанавливаемая между решетками, изменяет знак дисперсии, что позволяет сохранить апертуру выходного импульса. Растянутый таким образом импульс подается в усилительный каскад, после чего сжимается с помощью компрессора [4], также состоящего из двух дифракционных решеток.

Получается, что усиление в таких лазерных системах осуществляется при относительно большой длительности импульса, а компрессия производится уже на выходе лазерной системы. Так как на дифракционные решетки компрессора падает импульс с наибольшей мощностью, то они становятся самым уязвимым элементом в оптической системе. Следовательно, для построения работоспособной лазерной системы необходимо знать и учитывать величину порога разрушения дифракционных решеток компрессора.

Целью данной работы было экспериментальное исследование величины порога разрушения дифракционных решеток с золотым покрытием при облучении их мощными лазерными импульсами.

Исследования проводились на лазерной установке «Сатурн» [5]. Для проведения экспериментов использовалась часть оптической схемы установки с использованием задающего генератора, предварительного усилителя, усилителя с диаметром активной среды 10 мм и двухпроходного усилителя диаметром 20 мм. Задающий генератор, работающий в режиме пассивной модуляции добротности, генерировал световые импульсы с длинной волны 1,054 мкм, длительностью 30 нс и энергией ~ 5 мДж.

Световые импульсы, после прохождения затвора Фарадея и предварительного усилителя ПУС10, направлялись в оптическую схему формирования пространственного распределения лазерного пучка и далее на поверхность исследуемой дифракционной решеткой (рис. 2).

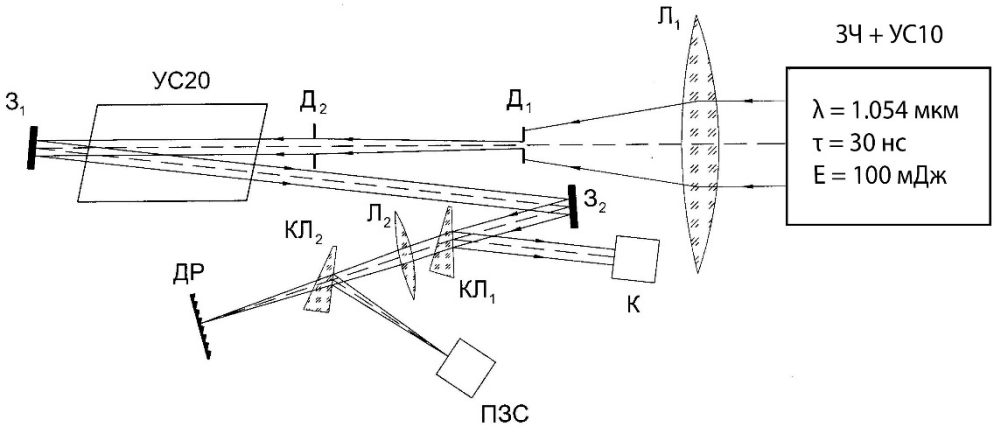


Рис. 2. Оптическая схема исследования порога разрушения дифракционных решеток: ЗЧ – задающая часть, $Л_1$ и $Л_2$ – линзы, $Д_1$ и $Д_2$ – формирующие диафрагмы, $З_1$ и $З_2$ – поворотные зеркала, УС10, УС20 – усилительные элементы с диаметром активной среды 10 мм и 20 мм соответственно, $КЛ_1$ и $КЛ_2$ – оптические клинья, ДР – дифракционная решетка, ПЗС и К – пзс-камера и калориметр

Линза $Л_1$, фокусным расстоянием 100 см, поджимала световой поток на диафрагме $Д_1$ диаметром ~1 мм. Диафрагма $Д_2$ была расположена за дальней зоной дифракции, граница которой была найдена по формуле (1)

$$Z \geq \frac{R_1^2}{\lambda} = \frac{(0,5\ \text{мм})^2}{1,054\ \text{мкм}} \approx 24\ \text{см}. \qquad (1)$$

Распределение интенсивности света на диафрагме $Д_2$ представляет собой дифракционную картину Фраунгофера, из которой ею вырезался нулевой порядок. Подбирая параметры $Д_2$ было получено Гауссово распределение интенсивности в лазерном пятне. Изменяя накачку активной среды усилительного элемента УС20 можно регулировать энергию полученного светового импульса в требуемом диапазоне. Зеркала $З_1$ и $З_2$ направляли световой поток в зону испытаний.

Пластины $КЛ_1$ и $КЛ_2$ направляли часть излучения на пзс-камеру (ПЗС) для регистрации пространственного распределения излучения на поверхности дифракционной решетки и на калориметр (К) для измерения энергии излучения, падающего на испытываемую поверхность. Причем для того что бы плоскости решетки ДР и пзс-камеры были сопряжены, расстояния от пластины КЛ2 до решетки ДР и до пзс-камеры (ПЗС) должны быть одинаковы. Линза $Л_2$ создавала световое пятно диаметром 2 мм на поверхности исследуемой дифракционной решетки (ДР). На рис. 3 показан профиль распределения интенсивности на поверхности дифракционной решетки.

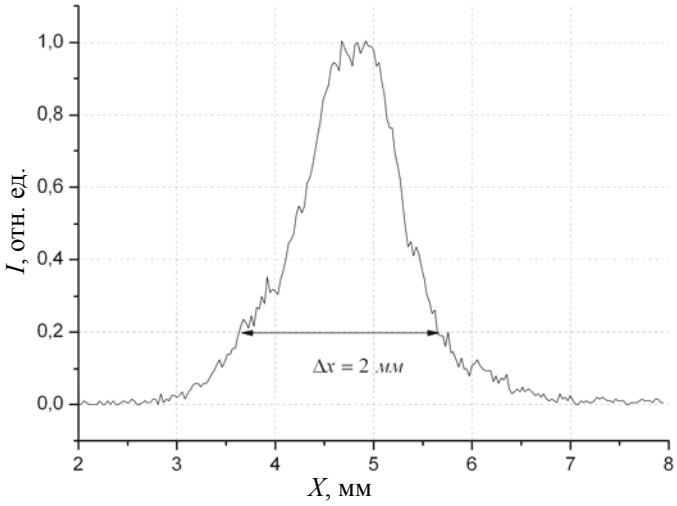


Рис. 3. Профиль распределения интенсивности на поверхности решетки

Дифракционная решетка устанавливалась на вращающимся столе, который позволял изменять угол между облучаемой поверхностью и направлением лазерного излучения в широких пределах. Ось вращения облучаемой поверхности и ось падающего излучения совмещались и были взаимно перпендикулярны. Такая юстировка обеспечивала контролируемые изменения размеров пятна облучения при повороте решетки на требуемый угол падения излучения.

Эксперименты проводились при различных ориентациях вектора напряженности электрического поля светового импульса в плоскость угла падения на поверхность дифракционной решетки. Для изменения направления вектора поляризации применялась пластина из кристаллического кварца, которая устанавливалась перед линзой $Л_1$.

На рис. 4 представлены фотографии участков поверхности дифракционной решетки до облучения. Видно, что исследуемая поверхность неидеальна. Это приводило к необходимости тщательного выбора зоны облучения перед каждым экспериментом и не исключало ошибки в определении пороговых значений плотности мощности для повреждения поверхности дифракционной решетки.

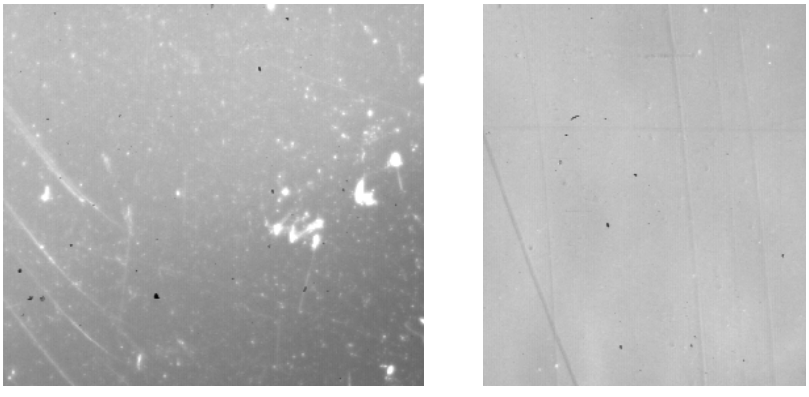
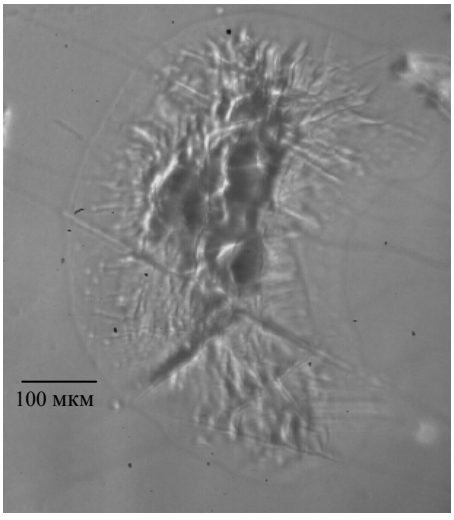
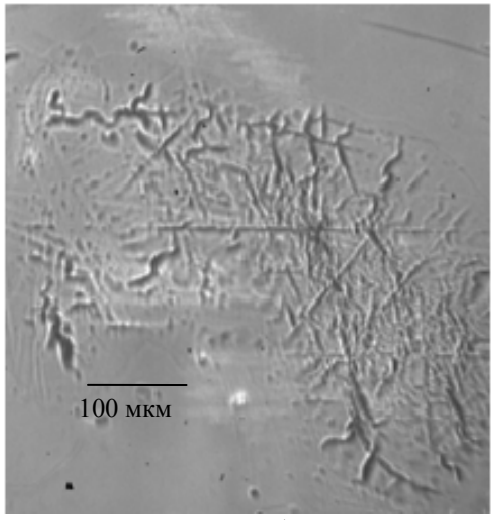


Рис. 4. Фотографии участков поверхности дифракционной решетки до облучения

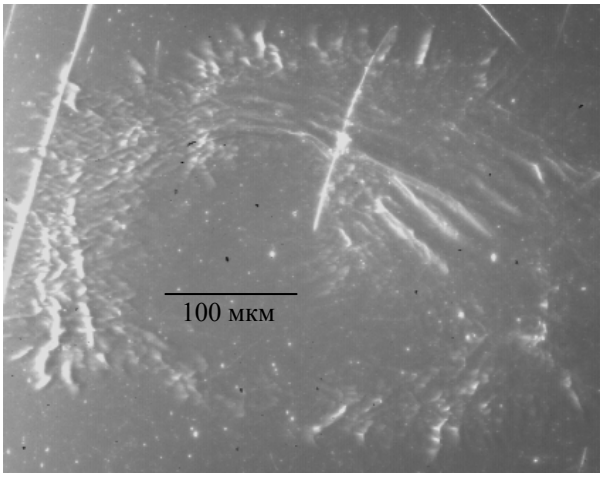
Характерные фотографии исследуемой поверхности при воздействии на нее пороговых значений плотности мощности представлены на рис. 5,а – е. Фотографии иллюстрируют эксперименты с различными углами падения излучения на решетку в случае p-поляризации и в случае s-поляризации. Видно, что характерные разрушения поверхности дифракционной решетки при воздействии на нее пороговых значений плотности мощности представляют собой вспучивание или отслаивание покрытия решетки на ограниченном размере.



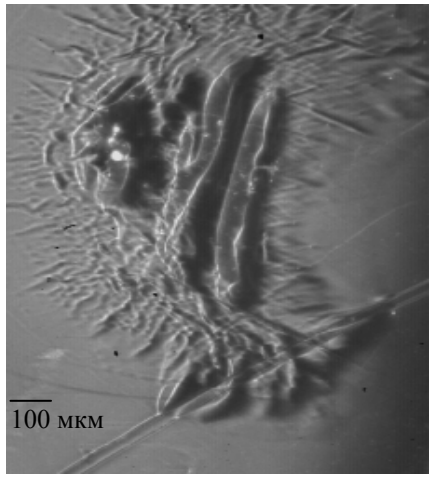
а



б

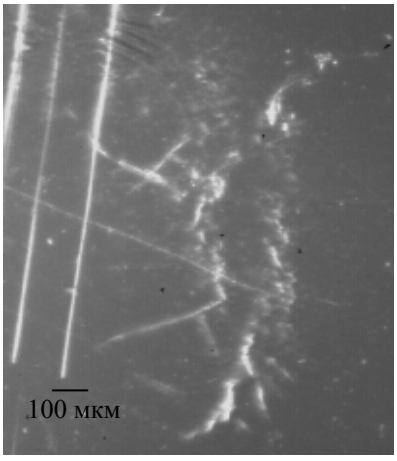


в

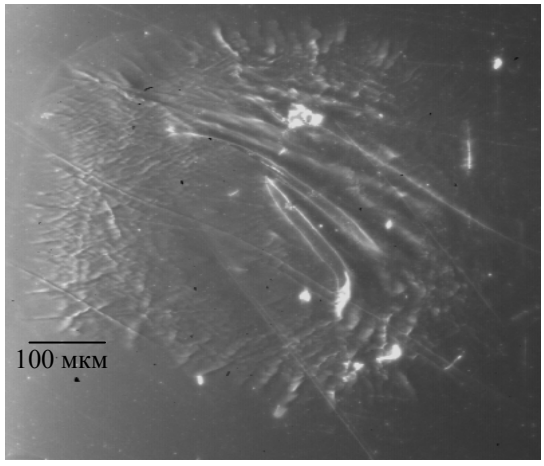


г

Рис. 5. Иллюстрация экспериментов с различными углами падения излучения на решетку в случае p-поляризации и в случае s-поляризации: а – положение решетки – 0°, поляризация – *P*, энергия – 23 мДж, плотность мощности – 24 МВт/см^2, размер повреждения – 534 мкм; б – положение решетки – 55° поляризация – *P*; энергия – 55 мДж, плотность мощности – 37 МВт/см^2; размер повреждения – 380 мкм; в – положение решетки – 55°, поляризация – *S*, энергия – 18 мДж, плотность мощности – 13 МВт/см^2, размер повреждения – 945 мкм; г – положение решетки – 17°, поляризация – *P*, энергия – 30 мДж, плотность мощности – 32 МВт/см^2; размер повреждения – 932 мкм; д – положение решетки – 0°, поляризация – *S*, энергия – 8 мДж, плотность мощности – 8 МВт/см^2, размер повреждения – 1102 мкм; е – положение решетки – 37°, поляризация – *S*, энергия – 13 мДж, плотность мощности – 14 МВт/см^2, размер повреждения – 547 мкм (окончание рис. см. на с. 222)



д



е

Рис. 5. Окончание

При значительном превышении пороговых значений интенсивности, происходит разрыв покрытия и деформация подложки (рис. 6).

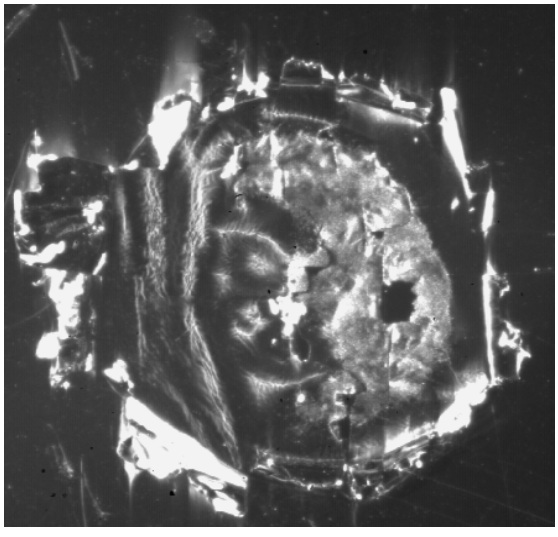


Рис. 6. Положение решетки – 0°, поляризация – *S*, энергия – 18 мДж, плотность мощности – 19 МВт/см^2, размер повреждения – 904 мкм

Величины пороговой плотности мощности для различных углов падения излучения на решетку при s- и p-поляризациях приведены в таблице.

Угол,°	Поляризация	Порог разрушения, МВт/см^2
0	S	8
	P	24
17	S	8
	P	30
37	S	8
	P	33
55	S	11
	P	37
70	S	31
	P	48

Выводы

Были экспериментально установлены величины порога разрушения дифракционных решеток с золотым покрытием при облучении их мощными лазерными импульсами в зависимости от угла дифракционной решетки и поляризации излучения. Для s-поляризованного излучения порог разрушения лежит в диапазоне от 8 до 30 МВт/см^2, для p-поляризованного от 24 до 48 МВт/см^2. Максимальный порог разрушения и для S, и для P поляризаций наблюдается при угле падения на дифракционную решетку в 70°, который максимально приближается к углу блеска для данной решетки.

Список литературы

1. Яшин В. Е. Исследования и разработки в области оптики твердотельных лазеров с высокой пиковой мощностью излучения в ГОИ им. С. И. Вавилова – Оптический журнал. 2009. Т. 76, № 4.
2. Яшунин Д. А., Мальков Ю. А., Бодров С. Б. Фемтосекундная оптика. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014.
3. Малышев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию. – Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
4. Семиков С. А. Методы компрессии лазерных импульсов: учебно-методический материал. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011.
5. Бурдонский И. Н., Гольцов А. Ю., Леонов А. Г., Макаров К. Н., Тимофеев И. С., Юфа В. Н. Генерация ударных волн при взаимодействии мощного лазерного излучения с поликристаллическими мишенями // Вопросы атомной науки и техники. 2013. Т. 36, № 2. С. 8–19.
6. Гитин А. Оптика стретчеров: генерация ультракоротких импульсов – Фотоника, № 3, 2010.