

Особенности настройки компрессора chirпированных импульсов

И.В.Яковлев

Представлена оригинальная методика настройки решеточных компрессоров chirпированных импульсов для сверхмощных лазерных CPA-систем. Применение методики для настройки решеточного компрессора субпетаваттного лазерного комплекса PEARL позволило с секундной точностью съюстировать дифракционные решетки по всем трем угловым степеням свободы, включая юстировку направления штрихов, а также настроить с высокой точностью углы падения излучения на решетки. Предложен и протестирован простой метод, позволяющий измерять разность плотностей штрихов решеток с точностью лучше, чем 0.005 штрих./мм.

Ключевые слова: усиление chirпированных импульсов, петаваттные лазеры, стретчер, компрессор, угловая дисперсия, составные решетки.

1. Введение

При усилении chirпированных импульсов (chirped pulse amplification, CPA) [1] стретчер и компрессор – устройства для растяжения и сжатия импульсов – являются одними из основных элементов. Наибольшее распространение получили стретчеры и компрессоры, основанные на дифракционных решетках [2, 3], поскольку решетки обладают рекордно большой дисперсией и способны обеспечить максимальные коэффициенты растяжения (сжатия). Характеристики рекомпрессированного импульса на выходе CPA-системы (длительность, контраст, наличие сателлитов) зависят от согласования стретчера и компрессора в различных порядках дисперсии фазового набегка. Для каждого из этих устройств необходимо с высокой степенью точности обеспечить параллельное расположение дифракционных решеток, обращенных друг к другу рабочими поверхностями и разнесенных в пространстве на большое расстояние, а также обеспечить параллельность штрихов этих решеток. Кроме того, входное излучение должно падать на решетки перпендикулярно штрихам под определенным углом к их нормали. Неточная юстировка взаимного положения решеток приводит к пространственно-временным искажениям фемтосекундных импульсов [4–10]. Остаточная нескомпенсированная угловая дисперсия сопровождается наклоном амплитудного фронта импульса, что, в свою очередь, приводит к уменьшению интенсивности излучения в фокусе.

Требования к точности юстировки решеточных компрессоров повышаются для пучков больших размеров и для импульсов с меньшей длительностью. В работе [11] отмечалось, что отклонение на доли градуса от расчетного угла падения пучка на решетку компрессора петаваттной лазерной CPA-системы Vulcan (Великобритания) или не-

параллельность решеток порядка десятка угловых секунд приводит к удлинению импульса с $\tau = 500$ фс в полтора раза. В [7] продемонстрировано увеличение длительности при фокусировке импульса с наклоненным амплитудным фронтом: 20'' непараллельности решеток компрессора для пучка диаметром 25 см приводило к увеличению длительности импульса с $\tau = 30$ фс в фокусе в пять раз.

Для настройки и точной юстировки решеток компрессора применяются различные методы контроля параметров схемы, а также параметров выходного излучения. Геометрические методы настройки основаны на измерении направления распространения пучков основного или вспомогательного юстировочного излучения, отраженных решетками компрессора [12–14]. В качестве юстировочного обычно используют широкополосное или двухчастотное излучение [4, 13, 15]. Его фокусировка после прохождения через компрессор позволяет измерять величину остаточной угловой дисперсии. Для точной настройки компрессоров CPA-систем также применяют интерферометры, автокорреляторы, спектрографы [7, 8, 16–18]. В [19] оптимизация системы стретчер–компрессор осуществлялась с помощью измерения мощности второй гармоники сигнального излучения на выходе компрессора. Таким образом, не существует универсального метода настройки компрессоров сверхмощных CPA-систем, тем более что у каждой системы есть своя специфика.

В настоящей работе представлена оригинальная методика настройки компрессора субпетаваттного лазерного комплекса PEARL, созданного в ИПФ РАН [20, 21]. Она основана на юстировке рабочей поверхности и направления штрихов решетки параллельно вертикальной оси ее вращения с секундной точностью. С помощью этой методики настраивались также с высокой точностью углы падения излучения на решетки компрессора. Различная плотность штрихов дифракционных решеток, используемых в компрессоре, является источником нескомпенсированной остаточной угловой дисперсии [6, 22, 23]. Нами предложен и протестирован простой в реализации метод, позволяющий измерять разность плотностей штрихов решеток с точностью лучше, чем 0.005 штрих./мм. Особенно

И.В.Яковлев. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: ivan@ufp.appl.sci-nnov.ru

полезным и перспективным представляется использование предложенных методов для настройки компрессоров с составными решетками [24, 25].

2. Компрессор субпетаваттного лазерного комплекса PEARL

Схема и основные принципы работы субпетаваттного комплекса PEARL, основанного на параметрическом усилении chirпированных импульсов в нелинейных кристаллах DKDP, подробно описаны в публикациях [20, 21, 26–29]. Особенностью комплекса является преобразование частоты в первом усилительном каскаде, благодаря чему в стретчере и компрессоре растягивается и сжимается излучение с различными центральными длинами волн. Оригинальный гибридный призменно-решеточный стретчер [30] и компрессор, собранный по классической схеме Трейси [2], были согласованы до четвертого порядка дисперсии фазы включительно.

Двухрешеточный компрессор, собранный по двухпроходной схеме (рис.1), был рассчитан для сжатия усиленных до 35 Дж chirпированных импульсов сигнального излучения с центральной длиной волны 910 нм при диаметре пучка 11 см. В компрессоре использовались голографические покрытия золотом дифракционные решетки с плотностью 1200 штрих./мм. Размеры рабочей поверхности первой (малой) и второй (большой) решеток были 200 × 240 мм и 350 × 240 мм соответственно, штрихи располагались вдоль ребра длиной 240 мм. Решетки обладали эффективностью отражения сигнального излучения р-поляризации (ортогональной штрихам) ~90% при падении пучка под углом Литтрова для первого порядка дифракции.

Для предотвращения нежелательных нелинейных эффектов самовоздействия и сохранения качества излучения компрессор был размещен в вакуумной камере, рассчитанной на остаточное давление 10^{-5} – 10^{-6} Тор. Оптический стол, на котором размещался компрессор, опирался на демпферы из вакуумной резины и таким образом был изолирован от стенок камеры.

Размеры решеток позволяли расположить пучки в двух ярусах. Входное chirпированное излучение через окно вакуумной камеры направлялось на дихроичное зеркало 4 (коэффициент отражения сигнального излучения 99.9%, излучения He–Ne-лазера – более 70%), которое, в свою очередь, направляло это излучение на малую дифракционную решетку 1. Затем диспергированный по углу пучок попадал на большую решетку 2, отражался от нее вновь

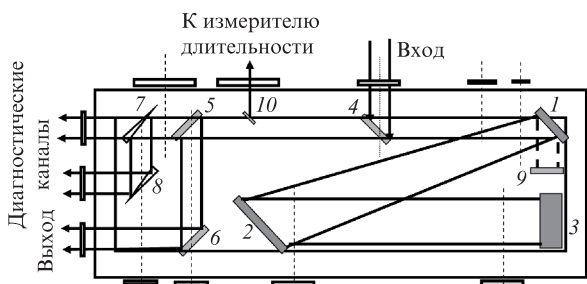


Рис.1. Схема двухрешеточного компрессора в вакуумной камере: 1 и 2 – малая и большая дифракционные решетки; 3 – вертикальный уголкового отражатель; 4 – заводящее дихроичное зеркало; 5–8 – система выводящих зеркал; 9 – зеркало на нулевой порядок дифракции малой решетки; 10 – «вбрасываемое» зеркало.

коллимированным пучком и падал на двухзеркальный уголкового отражатель (зеркало-крышу) 3, который отражал пучок излучения назад параллельно падающему, но смещал его в нижний ярус. Далее пучок распространялся по компрессору в обратном направлении, вновь отражаясь от решеток 2 и 1, проходил под зеркалом 4 и попадал на систему выводящих зеркал 5–8.

Зеркало 5 с коэффициентом отражения 99% и однородным спектром пропускания во всем диапазоне 860–960 нм сигнального излучения служило для вывода излучения из компрессора с целью диагностики энергетических, пространственных и спектральных характеристик скомпрессированного импульса. «Вбрасываемое» зеркало 10 с апертурой 12 × 12 мм направляло часть пучка на одноимпульсный автокоррелятор для измерения длительности импульса. Около 7% излучения, падающего на первую решетку, отражалось в нулевой (зеркальный) порядок дифракции (см. рис.1). Это излучение, отраженное назад зеркалом 9, использовалось в качестве репера положения малой решетки в системе настройки и диагностики компрессора.

Расчетный угол падения излучения на первую решетку компрессора составлял 43.1° (угол Литтрова плюс 10°). Согласно расчетам, при расстоянии по нормали между решетками 133.75 см компрессор обеспечивал сжатие chirпированного импульса с $\tau = 0.5$ нс до длительности 37 фс. Все оптические элементы компрессора, включая вспомогательную оптику, управлялись дистанционно с помощью компьютера. Шаговые двигатели с редукторами обеспечивали точность поворотов и перемещений в единицы угловых секунд и микрометров.

3. Система настройки компрессора

Точность, с которой необходимо настраивать угловые положения оптических элементов компрессора, можно оценить, сравнивая расходимость выходного пучка, обусловленную отстройкой углов от расчетных значений, с дифракционной. Для лазерного излучения с центральной длиной волны 0.91 мкм в пучке диаметром 11 см дифракционная расходимость составляет ~2". Для создания такой же расходимости широкополосного излучения с длинами волн в диапазоне 0.86–0.96 мкм в двухпроходном двухрешеточном компрессоре на решетках с плотностью 1200 штрих./мм необходимо повернуть вторую решетку вокруг вертикальной оси на угол ~14". Требования к точности повышаются с увеличением диаметра пучка и ширины спектра сигнального излучения.

Оптическая схема системы настройки двухрешеточного компрессора представлена на рис.2. Излучение юстировочного лазера с длиной волны 0.91 мкм просвечивало трассу сигнального излучения и совпадало с ним по направлению и поперечному размеру. С помощью зеркала 1 это излучение направлялось в компрессор. По пути оно проходило через стеклянный оптический клин 6 с углом 10'. Около 1% мощности отражалось в направлении трипель-зеркала (ТЗ) – уголкового отражателя, изготовленного из трех покрытых алюминием зеркал, имеющих угловые регулировки для настройки углов 90° между зеркалами с секундной точностью. Отраженное от ТЗ излучение юстировочного лазера проходило через клин, фокусировалось системой линз на CCD-камеру и служило репером направления сигнального излучения, посылаемого в компрессор. Излучение He–Ne-лазера с длиной

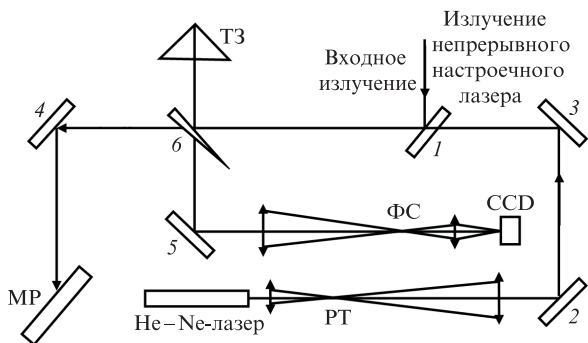


Рис.2. Система настройки компрессора (вид сверху): 1–5 – поворотные зеркала; 6 – стеклянная клиновидная пластина; MP – малая решетка компрессора; PT – расширяющий телескоп; ФС – фокусирующая система; ТЗ – трипель-зеркало.

волны 0.63 мкм проходило через расширяющий телескоп (PT), где диаметр пучка излучения увеличивался до 5 см, и с помощью поворотных зеркал 2 и 3 совмещалось с направлением сигнального излучения. Для совпадения плоскостей фокусировки излучений с длинами волн 0.63 и 0.91 мкм на CCD-камере пучок излучения He–Ne-лазера делался сходящимся с помощью небольшой расстройки базы расширяющего телескопа. При этом положения реперов, соответствующих этим длинам волн, не совпадали. Были сделаны необходимые расчеты, учитывающие также дисперсию клиновидной пластины, и найдены поправки, которые учитывались при юстировке компрессора.

4. Конструкция блока решетки субпетаваттного компрессора

Решающую роль для точной настройки компрессора играла специально разработанная конструкция механических узлов, в которых были закреплены дифракционные решетки. Конструкция позволяла вручную и дистанционно юстировать решетки по трем вращательным степеням свободы с секундной точностью.

Принципиальная схема блока малой решетки представлена на рис.3,а. В нижней части блока было размещено поворотное устройство, благодаря которому решетка

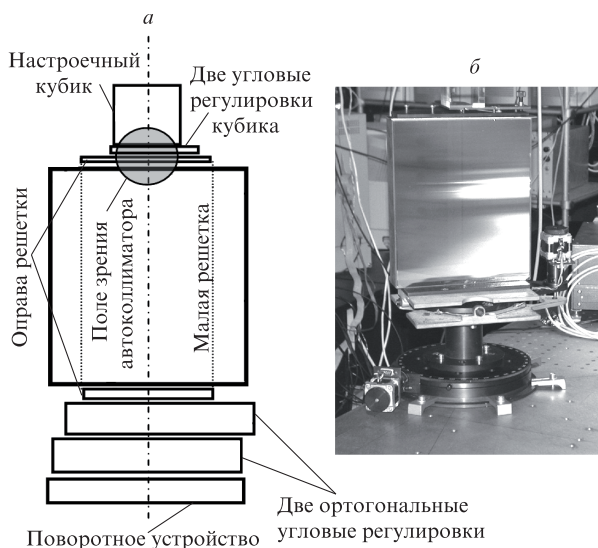


Рис.3. Принципиальная схема блока решетки компрессора (а) и фотография блока малой решетки в сборке (б).

имела возможность при открученных стопорных винтах вращаться вручную вокруг вертикальной оси на 360°, а при фиксированных винтах – поворачиваться с помощью шагового двигателя в пределах 12° с точностью 6" без редуктора и доли угловой секунды с редуктором.

На поворотной платформе крепился оптический столик, на котором располагалась малая решетка в оправе (рис.3,б). Для юстировки наклона решетки и настройки направления штрихов столик был оснащен двумя регулировками, позволявшими ему с секундной точностью в пределах единиц градусов поворачиваться относительно горизонтальных осей: параллельной и перпендикулярной рабочей поверхности решетки.

На дополнительном столике, размещенном сверху на оправе решетки, устанавливался настроечный кубик, изготовленный из оптического стекла марки К-8. Противоположные полированные грани кубика были попарно параллельными (с секундной точностью). Две независимые угловые регулировки столика позволяли настраивать кубик относительно двух ортогональных горизонтальных осей. Конструкция предусматривала установку кубика максимально близко к решетке, чтобы их можно было одновременно наблюдать в автоколлиматор (диаметр пучка используемого автоколлиматора АКТ-15 составлял ~50 мм). Поле зрения автоколлиматора условно обозначено на рис.3,а кружком.

Конструкция блока большой решетки субпетаваттного компрессора была аналогична описанной выше. Отличия состояли в отсутствии настроечного кубика и в наличии дополнительного продольного транслятора для управления базой компрессора. В последующих модификациях блок решетки был дополнен специальной платформой, позволявшей регулировать и настраивать вертикальные оси вращения всех решеток компрессора параллельно друг другу.

Вертикальный уголкового отражателя (см. рис.1) также крепился на поворотном устройстве и вдобавок имел одну угловую регулировку, позволявшую поворачивать его как целое относительно горизонтальной оси, перпендикулярной линии пересечения рабочих плоскостей зеркал.

5. Методика юстировки блока решетки

Настройка блока решетки заключалась в точном позиционировании рабочей плоскости и направления штрихов решетки параллельно вертикальной оси вращения. Процедура настройки осуществлялась последовательно в несколько этапов с помощью автоколлиматора и настроечного кубика. Для удобства последующей настройки кубик устанавливался таким образом, чтобы изображение автоколлимационной сетки от одной из его граней почти совпадало с изображением сетки от рабочей плоскости решетки.

Настройка оси автоколлиматора перпендикулярно оси вращения поворотного устройства блока решетки осуществлялась аналогично процедуре определения непараллельности осей вращения алидады и столика с лимбом гониометра [31]. Вначале автоколлиматор настраивался перпендикулярно одной из граней кубика в положение I (рис.4), после чего кубик вместе с решеткой поворачивался на 180° в положение II. При этом изображение автоколлимационной сетки в автоколлиматоре смещалось по вертикали. Затем автоколлиматор устанавливался

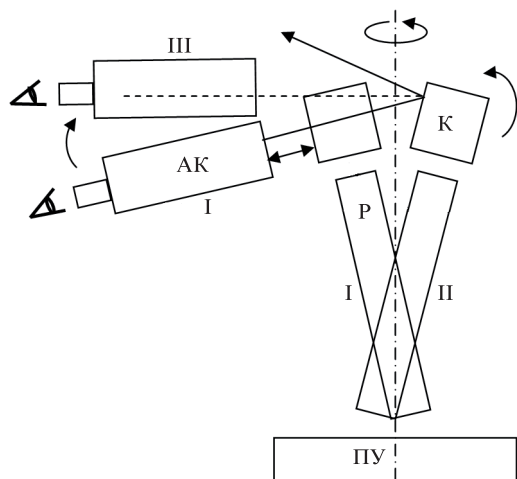


Рис.4. Схема настройки оси автоколлиматора перпендикулярно оси вращения блока решетки:
 АК – автоколлиматор; К – кубик; Р – решетка; ПУ – поворотное устройство.

ливался в положение III, соответствующее половинному углу сдвига изображения автоколлимационной сетки, а кубик также поворачивался навстречу на такой же половинный угол. Итерационная процедура – поворот блока решетки на 180°, подстройка автоколлиматора и кубика на половинные углы – является сходящейся. В результате ось автоколлиматора оказывается настроенной строго перпендикулярно оси вращения блока решетки, а также к использованному для юстировки граням кубика.

На следующем шаге настройки автоколлиматор оставался в этом настроенном положении. Блок решетки поворачивался на 90°. Третья грань кубика подстраивалась нормально к пучку коллиматора с помощью соответствующей угловой регулировки. Поскольку грани настроенного кубика попарно параллельны, то четвертая грань кубика при повороте навстречу коллиматору также должна быть точно перпендикулярна его оси. Однако для используемого нами блока решетки это оказалось не так. Мы объяснили это техническими причинами: неодинаковостью размеров шариков подшипников поворотного устройства, неоднородностью затяжки крепежных болтов, неоднородностью нагрузки на подшипник (решетка с оправой имела массу несколько килограммов).

Благодаря тому, что кубик был изготовлен из прозрачного стекла, в промежуточных относительно оси автоколлиматора положениях кубика (рис.5,а) также видны изображения сетки. Таким образом, вращая кубик, можно построить график зависимости «уходов» оси по-

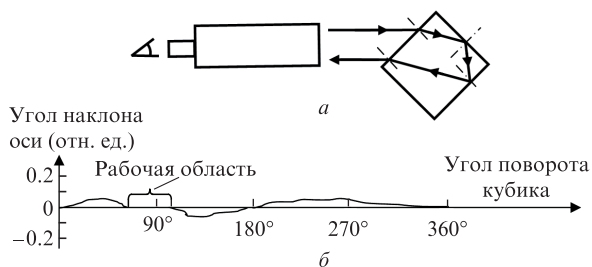


Рис.5. Отражение лучей в промежуточных положениях настроенного кубика (а) и характерная зависимость угла «ухода» оси от угла поворота кубика (б). Ось вращения перпендикулярна плоскости рисунка.

воротного устройства при его вращении. «Слепые зоны», в которых изображение автоколлимационной сетки не наблюдается, можно устранить, наблюдая за вращением кубика с другого ракурса с помощью дополнительного зеркала. На рис.5,б приведен характерный вид такого графика. Обычно «уходы» оси очень малы (единицы угловых секунд), и с ними очень сложно бороться. Однако для дальнейшей настройки решетки важно выбрать диапазон вращения в пределах 12°–15° с минимальной величиной «ухода» оси. Этот диапазон на рис.5,б указан как рабочая область. Поворотное устройство переустанавливалось таким образом, чтобы в найденном рабочем диапазоне можно было дистанционно с помощью шагового двигателя поворачивать решетку от положения, соответствующего углу Литтрова к входному пучку компрессора, до рабочего угла падения излучения на решетку.

Следующий шаг состоял в настройке самой решетки относительно оси вращения. Убедившись, что грань кубика параллельна оси вращения, автоколлиматор устанавливали в положение, при котором одновременно наблюдались изображения сетки от кубика и решетки. Затем изображение сетки от кубика совмещалось с маркером (перекрестием) автоколлиматора, и решетка поворачивалась к этому положению с помощью винтов регулировки наклона и поворота решетки (настройка кубика при этом нарушалась). Заметим, что если заранее расположить одну из граней кубика точно параллельно рабочей плоскости решетки, то для описанной выше настройки можно сразу использовать соответствующие угловые регулировки оправы решетки.

Для настройки штрихов решетки параллельно оси вращения поворотного устройства ось автоколлиматора настраивалась нормально к рабочей поверхности решетки, изображение сетки совмещалась с перекрестием. Затем решетка поворачивалась до угла, при котором наблюдалось первое литтровское отражение назад излучения автоколлиматора (рис.6). С помощью поворота трубы автоколлиматора относительно его оптической оси минимизировалась толщина изображения центральной горизонтальной линии автоколлимационной сетки. При этом ее изображение было четким, хотя и спектрально окрашенным, и позволяло проводить измерения с точностью до 3", соответствующих толщине линии сетки. Сдвиг цветной линии по вертикали относительно перекрестия обусловлен наклоном штрихов решетки. Поворачивая решетку относительно горизонтальной оси, перпендикулярной рабочей поверхности, с помощью соответствующего регулировочного винта совмещали цветное изображение линии сетки и перекрестие, что означало установку штри-

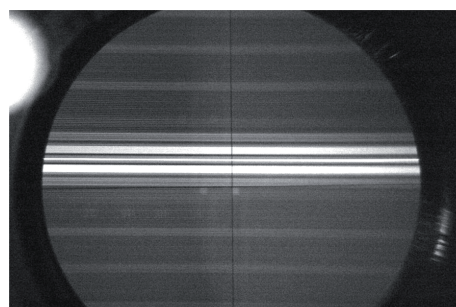


Рис.6. Картина в автоколлиматоре при наблюдении дифракционной решетки под углом Литтрова в процессе настройки направления штрихов.

хов решетки параллельно оси ее вращения. Следует заметить, что цифровая обработка изображения автоколлимационной сетки может легко обеспечить субсекундную точность измерений с помощью автоколлиматора.

6. Настройка рабочих положений элементов компрессора

Следующий этап сборки компрессора – настройка направления распространения пучка входного излучения перпендикулярно оси вращения малой решетки. Для этого решетка поворачивалась рабочей поверхностью нормально к падающему пучку юстировочного излучения (см. рис.1 и 2). Отраженное решеткой излучение выходило из компрессора, попадало на оптический клин, частично отражалось на регистрирующую часть системы настройки компрессора и фокусировалось на матрицу CCD-камеры. Совмещение этого изображения с реперным с помощью транспортного зеркала 4 обеспечивало перпендикулярность пучка сигнального излучения, падающего на решетку, оси вращения и, соответственно, штрихам.

При повороте малой решетки до угла Литтрова для юстировочного излучения на CCD-камере наблюдалось изображение дальней зоны этого излучения, разложенного в спектр: протяженная, модулированная по яркости горизонтальная полоска, которая пересекала реперную точку. Дело в том, что волоконный юстировочный лазер генерировал непрерывное излучение на длине волны 910 нм с шириной полосы в несколько нанометров. Измерения спектра генерации юстировочного лазера показали наличие четырех-пяти характерных максимумов разной интенсивности. Они хорошо идентифицировались, и каждому из них была сопоставлена определенная измеренная длина волны излучения. Таким образом, по известной плотности штрихов решетки и длине волны можно было определить точное значение угла падения излучения на малую решетку.

Для настройки большой решетки компрессора малая решетка устанавливалась к входному пучку излучения с длиной волны 910 нм под углом Литтрова (рис.7). Затем по этому же направлению запускалось излучение He–Ne-лазера с длиной волны 633 нм. Пучок этого излучения от-

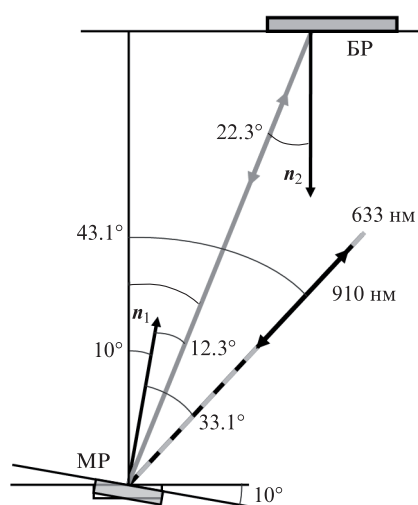


Рис.7. Схема настройки положения большой дифракционной решетки компрессора: MP – малая решетка; БР – большая решетка.

ражался в первый порядок дифракции под углом 12.3° относительно нормали к малой решетке. Известно, что угол Литтрова для излучения с длиной волны 633 нм для решетки с плотностью 1200 штрих./мм составляет 22.3°. Таким образом, настройка большой решетки в положение, когда излучение He–Ne-лазера отражается точно назад, соответствует ее рабочему положению. Настройка большой решетки осуществлялась с помощью двух угловых регулировок до совпадения изображений реперного и прошедшего компрессор пучков He–Ne-лазера в системе диагностики. При этом можно было гарантировать перпендикулярность направления штрихов большой решетки к падающему пучку и, соответственно, расположению плоскости большой решетки перпендикулярно плоскости распространения пучка в компрессоре. Более того, с учетом известных длин волн настроечных излучений можно с секундной точностью рассчитать значения углов поворота решеток. При необходимости можно сделать поправки, учитывающие отличие длины волны зондирующего вспомогательного излучения от центральной длины волны сигнального излучения системы.

С помощью шагового двигателя поворотного устройства, управляемого компьютером, малая решетка поворачивалась на 10° (устанавливалась в рабочее положение). При этом использовались выполненные предварительно калибровки угла поворота решетки от числа шагов шагового двигателя.

Вертикальный уголкового отражателя устанавливался в рабочее положение по диафрагмированному узкому пучку юстировочного излучения с длиной волны 910 нм, когда отраженный от отражателя пучок возвращался назад в нижнем ярусе компрессора строго под входным пучком.

Критерием выполненной настройки компрессора служили параметры выходного излучения: минимальная длительность импульса, однородность длительности по поперечной координате пучка, коллимированность выходного излучения, отсутствие угловой дисперсии.

Минимизация длительности выходного импульса осуществлялась изменением базы компрессора путем параллельного смещения большой решетки. Транслятор был моторизован шаговым двигателем и имел дистанционное управление. Величина перемещения, соответствующая одному шагу шагового двигателя, равна 2.5 мкм. Для измерения длительности импульса выходного излучения компрессора использовался одноимпульсный автокоррелятор, основанный на неколлинеарной генерации второй гармоники.

Контроль остаточной угловой дисперсии осуществлялся с помощью спектрографа [32, 33], измерявшего угловую зависимость спектра (или спектр-диаграмму) излучения на выходе компрессора. Для измерения угловой дисперсии в двух ортогональных плоскостях спектрограф последовательно разворачивался на 90° относительно нормали к входной щели. Ликвидация остаточной угловой дисперсии при ее наличии осуществлялась юстировкой большой решетки и уголкового отражателя.

7. Метод измерения разности плотностей штрихов решеток

Известно, что даже при идеально настроенных параллельных плоскостях и штрихах решеток компрессора в выходном излучении может наблюдаться нескомпенси-

рованная остаточная угловая дисперсия, обусловленная различной плотностью штрихов используемых решеток [6, 22, 23].

Для измерения разности плотностей штрихов дифракционных решеток две исследуемые решетки устанавливаются рядом так, чтобы можно было одновременно наблюдать их рабочие поверхности в автоколлиматор. Вначале с помощью автоколлиматора, установленного нормально к решеткам, с использованием двух угловых регулировок настраивается параллельность поверхностей. Затем, наблюдая в автоколлиматор решетки под углом Литтрова, с помощью соответствующей регулировки настраивают взаимную параллельность штрихов. При этом одна из решеток поворачивается до совмещения двух наблюдаемых в автоколлиматор цветных горизонтальных полос (см. рис.6) – разложенных в спектр изображений автоколлимационной сетки. В результате настройки рабочие плоскости и штрихи двух исследуемых решеток оказываются настроенными параллельно друг другу с точностью $\sim 3''$.

После этого на решетки посылается излучение He–Ne-лазера под некоторым углом α . В случае различных плотностей штрихов N_1 и N_2 решеток углы отражения Θ_1 и Θ_2 различны. Из формулы решетки

$$\sin \alpha + \sin \Theta_i = m \lambda N_i$$

в случае близких углов Θ_1 и Θ_2 получаем выражение для разности плотностей штрихов

$$\Delta N = \Delta \Theta \cos \Theta / m \lambda,$$

где λ – длина волны излучения; $i = 1, 2$ – номер решетки; m – порядков дифракции.

При точности измерений, обеспечиваемой автоколлиматором при наблюдении в окуляр, $\Delta \Theta_{\min} = 3''$ для угла дифракции $\Theta = 60^\circ$, $\lambda = 633$ нм получим $\Delta N_{\min} = 0.01$ штрих./мм для 1-го порядка и $\Delta N_{\min} = 0.005$ штрих./мм для 2-го порядка дифракции. Точность измерений можно улучшить более чем на порядок, используя скользящие углы отражения и цифровую регистрацию отраженного от решеток излучения.

8. Заключение

В работе подробно описана оригинальная методика настройки компрессора chirпированных импульсов мощных фемтосекундных CPA-лазеров. Методика позволяет с секундной точностью юстировать дифракционные решетки по трем угловым степеням свободы, включая юстировку направления штрихов, а также настраивать углы падения излучения на решетки. В результате выполненной настройки стретчера и компрессора на лазерном комплексе PEARL получены импульсы с пиковой мощностью 0.56 ПВт при длительности импульса 43 фс.

Предложен и протестирован простой метод, позволяющий измерять разность плотностей штрихов решеток с точностью лучше, чем 0.005 штрих./мм. Знание этой величины необходимо для расчета остаточной угловой дисперсии компрессора и ее компенсации. Особенно актуальны измерения разности плотностей штрихов в случае, когда требуется замена одной из решеток, и в компрессор устанавливается решетка из новой партии.

Предложенные в работе методы могут быть применены при настройке действующих и строящихся петаваттных и мультипетаваттных CPA-систем, в том числе использующих в компрессоре составные (мозаичные, черепичные) решетки.

1. Strickland D., Mourou G. *Opt. Commun.*, **56**, 219 (1985).
2. Treacy E.B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-5**, 454 (1969).
3. Martinez O.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23**, 59 (1987).
4. Osvay K., Ross I.N. *Opt. Commun.*, **105**, 271 (1994).
5. Fiorini C., Sauteret C., Rouyer C., Blanchot N., Seznec S., Migus A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 1662 (1994).
6. Zhang T., Yonemura M., Kato Y. *Opt. Commun.*, **145**, 367 (1998).
7. Pretzler G., Kasper A., Witte K.J. *Appl. Phys. B*, **70**, 1 (2000).
8. Osvay K., Kovács A.P., Heiner Z., Kurdi G., Klebniczki J., Csatári M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **10**, 213 (2004).
9. Kovács A.P., Osvay K., Kurdi G., Görbe M., Klebniczki J., Bor Z. *Appl. Phys. B*, **80**, 165 (2005).
10. Osvay K., Kovács A.P., Kurdi G., Heiner Z., Divall M., Klebniczki J., Ferincz I.E. *Opt. Commun.*, **248**, 201 (2005).
11. Ross I.N., Trentelman M., Danson C.N. *Appl. Opt.*, **36**, 9348 (1997).
12. Miesak E., Negres R. *Appl. Opt.*, **37**, 8146 (1998).
13. Collier J.L., Hernandez-Gomez C., Hawkes S.J., Smith J., Winstone T.B., et al. in *Rutherford Appleton Laboratory. Central Laser Facility Annual Report 2002/2003* (2003, p. 168).
14. Liu F., Liu X., Wang Z., Ma J., Zhang L., Wang J., Wang S., Lin X., Li Y., Chen L., Wei Z., Zhang J. *Appl. Phys. B*, **101**, 587 (2010).
15. Guardalben M.J. *Appl. Opt.*, **47**, 4959 (2008).
16. Varjú K., Kovács A.P., Kurdi G.K.O. *Appl. Phys. B*, **74**, S259 (2002).
17. Sacks Z., Mourou G., Danielius R. *Opt. Lett.*, **26**, 462 (2001).
18. Chvykov V., Yanovsky V. *Proc. CLEO/IQEC* (Baltimore, 2009).
19. Ruiz-de-la-Cruz A., Rangel-Rojoand R. *Revista Mexicana de Fisica*, **51**, 488 (2005).
20. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. *Preprint IAP No.720* (N.Novgorod, 2006).
21. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 421 (2007).
22. Rushford M.C., Britten J.A., Barty C.P.J., Jitsuno T., Kondo K., Miyanaga N., Tanaka K.A., Kodama R., Xu G. *Opt. Lett.*, **33**, 1902 (2008).
23. Hornung M., Bödefeld R., Kessler A., Hein J., Kaluza M.C. *Opt. Lett.*, **35**, 2073 (2010).
24. Kessler T.J., Bunkenburg J., Huang H., Kozlov A., Meyerhofer D.D. *Opt. Lett.*, **29**, 635 (2004).
25. Hornung M., Bödefeld R., Siebold M., Schnepf M., Hein J., Sauerbrey R., Kaluza M.C. *Appl. Opt.*, **46**, 7432 (2007).
26. Freidman G., Andreev N., Ginzburg V., Katin E., Khazanov E., Lozhkarev V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4630**, 135 (2002).
27. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Khazanov E.A., Palashov O.V., et al. *Laser Phys.*, **15**, 1319 (2005).
28. Ложкарев В.В., Гаранин С.Г., Герке Р.Р., Гинзбург В.Н., Катин Е.В., Кирсанов А.В. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **82**, 196 (2005).
29. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V., et al. *Opt. Express*, **14**, 446 (2006).
30. Фрейдман Г.И., Яковлев И.В. *Квантовая электроника*, **37**, 147 (2007).
31. Государственный Стандарт Союза ССР. Гониометры. Методы и средства поверки № 8.266-77 (М., 1978).
32. Freidman G., Andreev N., Bespalov V., Bredikhin V., Ginzburg V., Katin E., Korytin A., Khazanov E., Lozhkarev V., Palashov O., Sergeev A., Yakovlev I., et al. *Proc. CLEO* (Long Beach, CA, 2002).
33. Freidman G., Andreev N., Bespalov V., Bredikhin V., Ginzburg V., Katin E., Khazanov E., Korytin A., Lozhkarev V., Palashov O., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4972**, 90 (2003).