

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕМНЫХ ЧИРПИРУЮЩИХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

А. И. Горохов, И. Б. Мухин, Е. А. Перевезенцев

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук, Нижний Новгород

Введение

Если рассмотреть основные вектора развития высокоинтенсивных фемтосекундных лазеров, то кроме прямого увеличения энергетики в импульсе, можно выделить такое направление, как уменьшение длительности импульса. Так как одним из основных ограничений при создании систем, направленных на усилении высокоэнергетических пс и фс импульсов, является оптический пробой активных элементов лазера из-за ультравысокой пиковой мощности излучения, то для преодоления этого ограничения применяется подход усиления чирпированных импульсов (CPA) (рис. 1).

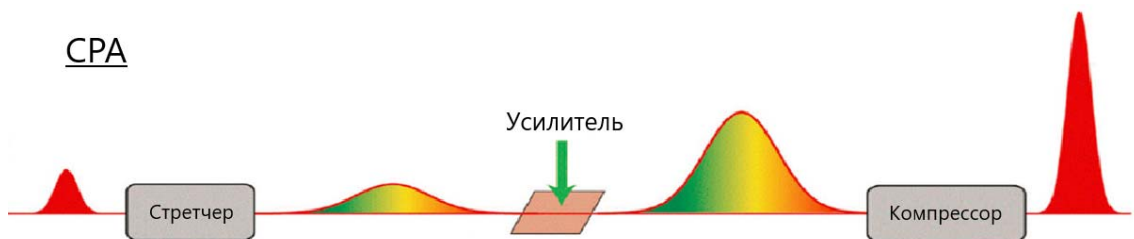


Рис. 1. Принципиальная схема CPA подхода

Первым этапом в данном подходе является стретчирование исходного импульса с помощью диспергирующей среды. Соответственно вместе с растяжением импульса снижается и его пиковая мощность. Такой чирпированный импульс уже можно усиливать в тысячи раз, избегая оптического пробоя элементов. После усиления импульс еще раз пропускается через такую же среду, но установленную обратным знаком, в которой происходит компрессия. В результате чирп компенсируется до нуля и импульс приобретает первоначальную ультракороткую длительность, но имеет уже куда большую энергию, чем в начале. Для реализации подхода уменьшения длительности до нескольких периодов поля нужно удовлетворить несколько условий: необходимо обеспечить сверхширокополосное усиление, которое доступно только при параметрическом усилении, для импульсов в несколько осцилляций поля необходимо контролировать фазу между заполнением электромагнитного поля и огибающей. Для достижения столь коротких импульсов в несколько осцилляций поля используется пикосекундная накачка, который также строиться с использованием принципа CPA.

Стретчирование и компрессия импульсов выполняется в дисперсионных устройствах, в которых импульс изменяется двояко. Во-первых, центр импульса, прошедшего через нее, смещается относительно прошедшего через вакуум. Так проявляется разница между фазовой и групповой скоростью сверхкороткого импульса. Во-вторых, при прохождении импульса через нормально диспергирующую среду более высокочастотные компоненты смещаются относительно длинноволновых, это смещение частоты называют «чирп». Таким образом, при начальной длительности импульса на входе среды меньше ДГС (дисперсия групповых скоростей) создаваемой этой средой, длительность выходящего из среды импульса значительно увеличивается (вплоть до 10^4 раз).

Величину ДГС и вносимого ею чирпа можно регулировать парой призм, но такой регулятор имеет весьма ограниченную область использования, так как при разумных размерах не позволяет получать ДГС, необходимые для сильного растягивания и последующего сжатия ультракоротких

импульсов. С этой точки зрения наиболее эффективными являются регуляторы, состоящие из пары отражательных решеток. Дифракционные решетки обладают куда большей угловой дисперсией, чем призмы, и поэтому обеспечивают гораздо большую ДГС, имея при этом разумные размеры. Хотя у таких регуляторов присутствуют потери (5–10 %) и они обладают меньшей лучевой прочностью, эти недостатки вполне преодолимы в усилительных системах [1].

Разумным решением вышеперечисленных проблем могут стать объемные чирпирующие брэгговские решетки (ОЧБР). Они в состоянии обеспечить минимальные габариты и малые потери излучения, но ограничены доступной на сегодняшний день апертурой. Наибольшая апертура составляет 20 мм, что позволяет компрессировать лазерные импульсы с энергией до 200 мДж. Этот диапазон энергий хорошо соответствует современным дисковым лазерам.

1. Использование ОЧБР в системе стретчер – компрессор

На основе анализа свойств различных решеток было принято решение в данной работе в системе стретчер-компрессор для дискового лазера применить объемные брэгговские решетки (рис. 2) [2] вместо дифракционных решеток с большой угловой дисперсией.

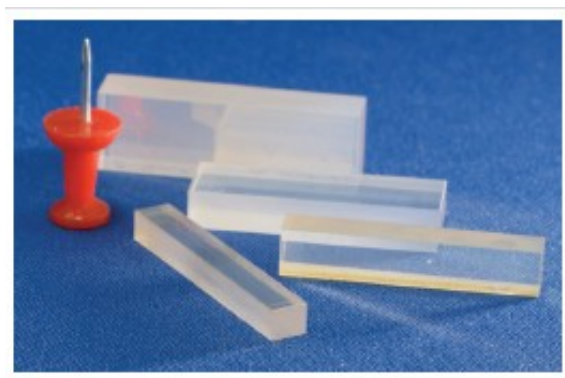


Рис. 2. Объемные брэгговские решетки из фото-термо-рефрактивного стекла

Они представляют собой участок фото-термо-рефрактивного стекла, в котором ультрафиолетовым излучением сформирована периодическая структура, модулирующая показатель преломления материала в продольном направлении. Важно, что главная особенность объемной чирпирующей брэгговской решетки (ОЧБР) заключается в том, что для разных длин волн условие Брэгга выполняется на разной глубине внутри решетки (рис. 3.).

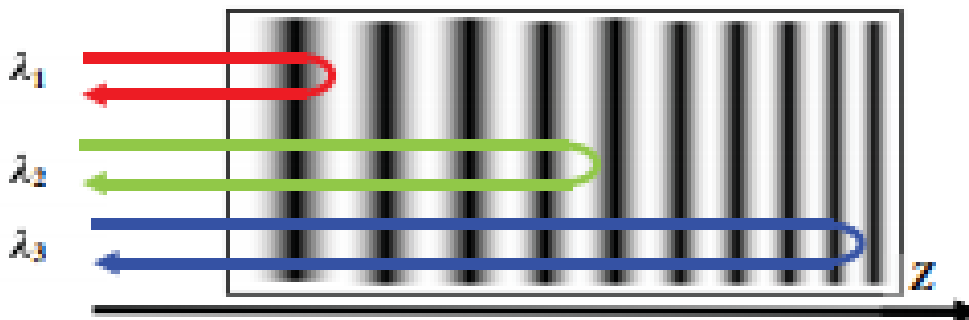


Рис. 3. Распространение излучения различных длин волн внутри решетки

В первой решетке длинноволновая часть излучения отражается от передней части решетки, а коротковолновая – от задней. Это обеспечивает формирование временной задержки между различными спектральными компонентами излучения – то есть, формирование чирпированного им-

пульса. Суммарное время задержки τ_s между спектральными компонентами, отраженными от задней и передней границ решетки, определяется уравнением:

$$\tau_s = 2nT/c \quad (1)$$

где n – средний показатель преломления СВГ, c – скорость света.

Задержка между спектральными компонентами лазерного импульса определяется коэффициентом растяжения (SF):

$$SF = \tau_s / \Delta\lambda \quad (2)$$

Исходя из этого, зная ширину спектра сигнала и коэффициент растяжения, можно теоретически рассчитать длительность стретчируемого импульса [3].

Лазер на основе CPA подхода будет использован как один из компонентов разрабатываемой в ИПФ РАН мульти-ТВт лазерной системы среднего инфракрасного диапазона (рис. 4) [4].

1.1. Практическое применение ОЧБР в системе стретчер – компрессор

Параметрическое усиление фемтосекундных импульсов с помощью пикосекундных лазера накачки является одним из компонентов разрабатываемой в ИПФ РАН мульти-ТВт лазерной системы среднего инфракрасного диапазона (рис. 1.) [4].

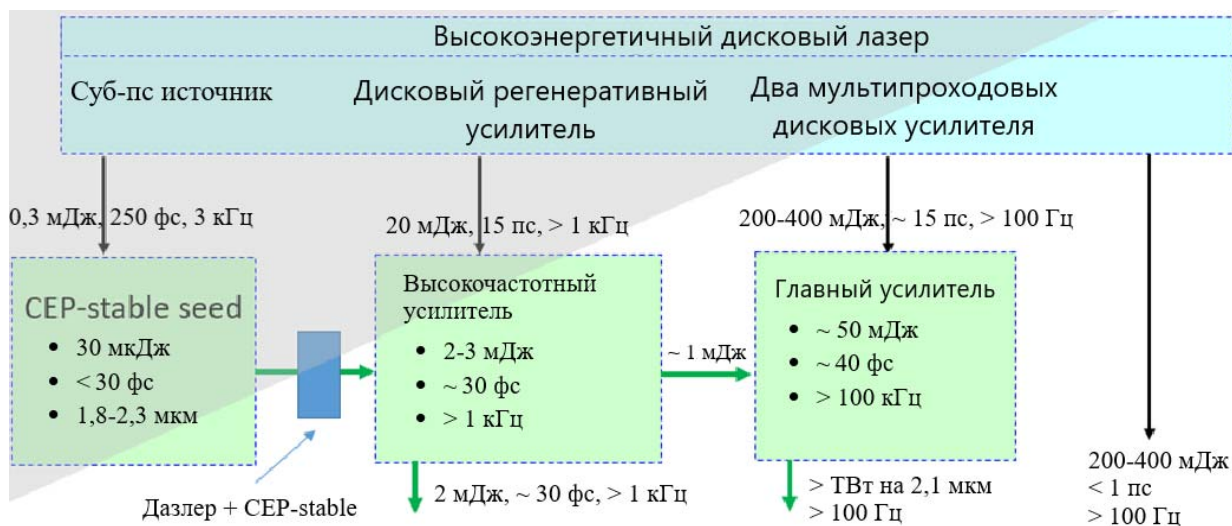


Рис. 4. Схема мульти-ТВт лазерной системы среднего инфракрасного диапазона

Согласно расчетам [4], оптимальная длительность импульса накачки для узла пс параметрического усиления должна составлять ~ 20 пс. Например, в недавно разработанной лазерной системе «Sylos» [5] достигались длительности импульса накачки порядка 50 пс, что сравнимо с результатами, которые планируется получить в данной работе.

Источником исследуемой лазерной установки является коммерческий иттербиевый субпикосекундный лазер, излучение которого делится на 2 канала. Одна его часть преобразуется в параметрическом узле в широкополосное излучение в диапазоне 1,8–2,3 мкм. Другая часть исходного лазера используется для создания с применением CPA подхода высокоэнергетичного пикосекундного импульса с частотой около 3 кГц, который будет использоваться в качестве параметрической накачки для широкополосного фемтосекундного импульса. В качестве стретчера и компрессора в данной системе будут использоваться объемные чирпирующие брэгговские решетки.

Первым этапом работы стало исследование спектральных и временных характеристик высокоэнергетичного пикосекундного лазерного импульса при его усилении с применением CPA подхода. Для нахождения длительности исходного сигнала была снята его автокорреляционная функция. Ее ширина составила = 128 пс. Отсюда можно найти длительность импульса на входе равную 85 пс. Ширина спектра излучения составляет при этом 8 нм. Далее, этот сигнал направляется в чирпи-

рующую объемную брэгговскую решетку. Функция пропускания решетки ограничивает выходной спектр до 2,82 нм (рис. 5).

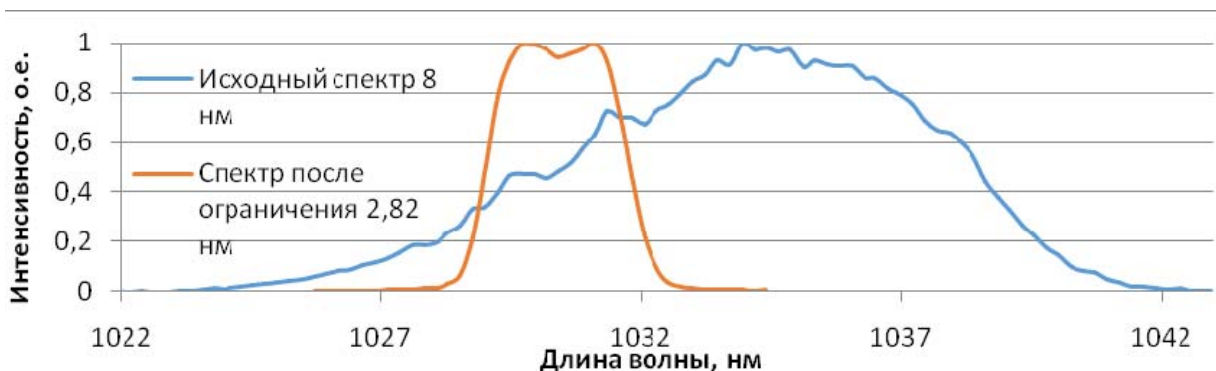


Рис. 5. Ограничение спектра сигнала функцией пропускания решетки

На основе данных о ширине спектра и длительности исходного сигнала, а также о функции пропускания решетки, можно произвести теоретический расчет длительности импульса на выходе из стретчирующей решетки:

$$\tau = \Delta\lambda \cdot SF - \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{\text{имп}}} \cdot \tau_{\text{имп}} = 2,82 \cdot 190 - \frac{2,82}{8} \cdot 85 = 506 \text{ пс} \quad (3)$$

где SF – стретчинг-фактор ОЧБР, $\Delta\lambda$ – функция пропускания решетки, $\Delta\lambda_{\text{имп}}$ – спектр исходного сигнала, $\tau_{\text{имп}}$ – длительность исходного сигнала.

Результаты измерений длительности быстрым (время отклика 50 пс) фотодиодом и осциллографом показали, что после решетки длительность импульсов составляет ~550 пс, что близко к значению теоретических оценок.

После компрессии данного сигнала аналогичной брэгговской решеткой, установленной обратной стороной сигнал был снова направлен в автокоррелятор для измерения длительности, значение которой получилось равным 64 пс. Так как на выходе компрессора импульс не спектрально ограниченный, изменение ширины спектра сигнала может позволить линейно регулировать длительность импульса после компрессора. Это обусловлено тем, что импульс стретчирован во времени, соответственно при урезании крайних длин волн, уменьшается длительность импульса.

Поскольку для параметрического усиления длительность импульса после регенеративного усилителя должна составлять менее 30 пс, в систему стретчер-компрессор добавлено еще одно спектральное устройство – фильтр Вуда [6]. Фильтр Вуда – это поляризационный фильтр, основанный на эффекте двулучепреломления. Он вносит сильно различный фазовый набег в ортогональные поляризации излучения. При этом разница фазового набега сильно зависит от длины волны излучения за счет дисперсии материала. После прохождения через поляризатор спектр излучения становится модулированным, что в итоге позволяет получать очень узкие полосы пропускания. Использование пластины исландского шпата толщиной ~ 1 мм позволяет обеспечить разность набега фаз порядка $\lambda/2$ в спектральном диапазоне около 1 нм. Причем, эта величина может регулироваться путем подстройки двулучепреломляющей пластины относительно поляризации излучения. Фильтр Вуда был установлен перед первой брэгговской решеткой, и ширина спектра излучения была уменьшена с 2,82 до 1,88 нм. В результате, после компрессора измеренная длительность импульса действительно уменьшилась и составила 37 пс.

Далее были выполнены аналогичные измерения с включенным дисковым регенеративным усилителем, полоса усиления которого ~1,5 нм. Энергия компрессируемых импульсов после второй брэгговской решетки составила 4 мДж при частоте повторения 3 кГц. Длительность импульсов составила 34 пс. После перенастройки фильтра Вуда, ширина спектра была уменьшена до 1 нм, а длительность импульса составила 25 пс.

Именно такая длительность лазерных импульсов требуется для использования в качестве пикосекундной параметрической накачки при усилении фемтосекундных импульсов в разрабатываемой мультитерагерцовой лазерной системе среднего инфракрасного диапазона [4].

1.2. Согласование дисперсий в системе стретчер-компрессор

У такой схемы, основанной на ОЧБР, есть свои недостатки, связанные с высокой вероятностью пробоя компрессора при высокой пиковой мощности лазерного излучения. Если эти решетки отлично подходят в ситуации, когда энергия в импульсе составляет несколько десятков мДж, то, например, для следующего каскада усиления в системе [4], они уже не подходят, так как там уже идет речь о сотнях мДж. Одним из вариантов решения данной проблемы является замена в роли компрессора ОЧБР на систему диэлектрических решеток [7]. Но тогда остро встает вопрос согласования дисперсий между стретчером и компрессором. У чирпирующих брэгговских решеток нет дисперсий выше второго порядка, поэтому, когда и стретчер и компрессор состояли из ОЧБР, такой проблемы не возникало. После замены ОЧБР в компрессоре на систему диэлектрических решеток, у которой присутствуют третьи и выше порядки дисперсии, возникла задача согласования этих дисперсий.

Для решения данной проблемы было предложено попытаться контролировать высшие порядки дисперсии ОЧБР с помощью наложения на нее некоего температурного профиля. Под влияние температуры происходят два процесса. Тепловое расширение материала, которое приводит к изменению периода самой решетки, изменение показателя преломления материала под действием температуры. Оба этих фактора влияют на дисперсию решетки.

Чтобы выяснить какой именно температурный профиль нужно наложить на решетку, чтобы получить нужные значения высших порядков дисперсии был написан код. Данный код моделирует изменение параметров решетки под действием температуры и на выходе выдает значение дисперсий при заданном градиенте температуры. Согласно результатам моделирования для компенсации дисперсии третьего порядка, для заданной конфигурации имеющегося компрессора на базе диэлектрических решеток, нужно наложить на имеющуюся ОЧБР температурный профиль в виде параболы с нагревом по краям относительно центра на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но в таком случае остается некомпенсированной дисперсия четвертого порядка. По нашим предположениям для их одновременной компенсации нужно выявить некий более сложный температурный профиль, над чем в данный момент идет активная работа. Первым способом моделирования различных температурных распределений является подведение элементов нагрева и охлаждения к различным частям решетки. Например, для получения параболического распределения нужно нагревать края решетки, при этом охлаждать ее центр. Вторым способом может стать специальное устройство, которое способно передавать заданный температурный профиль ОЧБР.

После обработки полученных с помощью программного кода данных встал вопрос об их соответствии действительности. Для подтверждения реальности полученных результатов планируется собрать установку на основе интерференционного метода. Данная схема будет предназначена для снятия зависимостей задержки от частоты при наложении на решетку различных температурных профилей.

Выводы

В результате выполненной работы была построена система стретчер-компрессор для дискового лазерного усилителя на базе ОЧБР и достигнута на ней желаемая длительность. После замены в роли компрессора ОЧБР на систему диэлектрических решеток были выявлены проблемы, связанные с согласованием дисперсий высших порядков. Для их решения был разработан программный код, с помощью которого удалось подобрать подходящий параболический температурный профиль и смоделировать распределение высших порядков дисперсии. Используя данное температурное распределение, наложенное на ОЧБР, получилось компенсировать третий порядок дисперсии для заданного компрессора.

Список литературы

1. Крюков П. Г., «Квантовая электроника»
2. <https://www.optigrate.com/>
3. Глебов Л., Смирнов В., Ротари Э., Коханоски И., Глебова Л., Смольски О., Люмо Ж., Лантигуа К., Глебов А., Оптическая инженерия 53 (5), 051514 (май 2014 г.)
4. Мухин И. Б., Волков М. Р., Викулов И. А., Перевезенцев Е. А., Палашов О. В., Квантовая электроника, 50:4 (2020), 321–326 [Quantum Electron., 50:4 (2020), 321–326].
5. Toth S., Stanislauskas T., Balciunas I., Budriunas R., Adamonis J., Danilevicius R., Viskontas K., Lengvinas D., Veitas G., Gadonas D. Published 24 July 2020 • © 2020 TheAuthor(s). Published by IOP Publishing Ltd.
6. Wood R. W., PHYSICAL OPTICS (1911)].
7. Treacy E. B., Treacy E. B. Optical pulse compression with diffraction gratings. IEEE J. Quantum Electron. QE-5, 454–458 (1969), Vol. 5, pp. 454–458.