

Временное профилирование сверхкоротких лазерных импульсов с использованием объемных брэгговских решеток

Н.С.Воробьев, А.А.Маненков, А.А.Муравьев, А.В.Смирнов, Е.В.Шашков

Предложен новый метод формирования временного профиля пикосекундных лазерных импульсов, в котором используется интерференция chirпированных пучков при отражении от объемных chirпированных брэгговских решеток. Проведены компьютерное моделирование и эксперименты по реализации этого метода. Экспериментально получены квазипрямоугольные пикосекундные импульсы.

Ключевые слова: пикосекундный лазерный импульс, объемные брэгговские решетки, временное профилирование, электронно-оптическая камера.

1. Введение

Использование лазерных импульсов с различной временной формой представляет большой интерес для многих применений, в частности при исследовании нелинейных процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом. Характер такого взаимодействия существенно определяется как пиковой интенсивностью лазерных импульсов, так и их временной формой. К этим процессам относятся, например, самофокусировка лазерных пучков и фазовая самомодуляция излучения при распространении мощных лазерных импульсов в нелинейных оптических средах. Применение лазерных импульсов с варьируемой временной формой позволяет реализовать стационарный и нестационарный режимы взаимодействия и выявить их особенности.

Так, использование наносекундных лазерных импульсов прямоугольной, колоколообразной и пилообразной форм при исследовании самофокусировки лазерных пучков в стекле позволило однозначно интерпретировать результаты наблюдений и подтвердить соответствующие теоретические модели явления самофокусировки (модели многофокусной структуры и движущихся нелинейных фокусов [1]). В этих экспериментах временное профилирование лазерных импульсов осуществлялось с помощью активных методов, основанных на использовании электрооптических затворов (ячейка Погкельса), и было ограничено характерным временем их переключения (~ 1 нс). Распространение такого подхода, т. е. применение профилированных во времени лазерных импульсов, на случай сверхкоротких импульсов представляет несомненный интерес. В частности, могут быть развиты новые методы исследований механизмов филаментации

и спектральных изменений фемтосекундного излучения при его распространении в газовых и конденсированных средах [2]. Однако получение мощных лазерных импульсов заданной временной формы со сверхкороткой длительностью (пико- и фемтосекундные импульсы) является более сложной задачей, чем получение наносекундных импульсов.

В настоящее время управление временной формой сверхкоротких лазерных импульсов осуществляется на основе различных принципов и подходов [3–7]. Так, в [3] сообщалось о получении пикосекундных лазерных импульсов прямоугольной формы с плоской вершиной длительностью 10 пс и с длительностью фронтов ~ 1 пс. Для этой цели использовался акустооптический программируемый дисперсионный фильтр. Формирование «прямоугольных» фемтосекундных импульсов с помощью программируемых пространственных модуляторов света (амплитудных или фазовых) было продемонстрировано в [4–6]. В работе [7] экспериментально исследовано формирование спектрально ограниченных «прямоугольных» фемтосекундных лазерных импульсов в спектральном компрессоре, включающем в себя дисперсионную линию задержки и одномодовый волоконный световод.

В работах [3–7] использовались специальные устройства для формирования таких «прямоугольных» импульсов. Эти устройства, с одной стороны, были достаточно сложными, а с другой – не содержали приемников для прямого измерения длительности и формы полученных импульсов, хотя сейчас для подобных измерений широко применяются электронно-оптические камеры с пико- и субпикосекундными разрешениями [8, 9].

В настоящей работе предложен новый метод временного профилирования сверхкоротких лазерных импульсов, в котором используется интерференция chirпированных пучков (ИЧП) при отражении от объемных chirпированных брэгговских решеток (ОЧБР) [10]. Описан принцип предлагаемого метода, приведены результаты компьютерного моделирования, оптическая схема установки, полученные экспериментальные результаты и выполнено их сравнение с расчетными данными.

Н.С.Воробьев, А.А.Маненков, А.В.Смирнов, Е.В.Шашков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: manenkov@kapella.gpi.ru
А.А.Муравьев. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail:sashamur@gmail.com

Поступила в редакцию 20 января 2011 г., после доработки – 24 февраля 2011 г.

2. Принцип ИЧП-метода и результаты компьютерного моделирования

На рис.1 приведена схема, поясняющая принцип ИЧП-метода. Исходный лазерный импульс падает на ОЧБР-стретчер, при отражении от которого он преобразуется в уширенный во времени chirпированный импульс. Затем этот импульс падает на ОЧБР-компрессор, состоящий из двух частей («красной» и «синей»), разделенных зазором шириной ΔL . Эти части получены путем разреза решетки по плоскости, соответствующей отражению части исходного лазерного импульса, отвечающей центральной спектральной компоненте. «Красная» часть компрессора отражает излучение с длинами волн $\lambda > \lambda_0$, «синяя» – с $\lambda < \lambda_0$. ОЧБР-компрессор при $\Delta L = 0$ является точной копией ОЧБР-стретчера, развернутого на 180° по отношению к падающему пучку. Такая схема аналогична традиционной оптической схеме chirпирования, усиления и компрессии сверхкоротких лазерных импульсов. При $\Delta L > 0$ два пучка, отраженные от обеих частей компрессора, интерферируют между собой, образуя выходное излучение, форма импульса которого зависит от относительной временной задержки Δt интерферирующих пучков. Величина Δt определяется как постоянной составляющей $\Delta t_0 = 2\Delta L/c$, где c – скорость света в среде, заполняющей зазор между двумя частями, так и задержкой $\Delta t(\omega_i)$ интерферирующих спектральных компонент при распространении в объемной дифракционной решетке. Последняя зависит от частот ω_i интерферирующих спектральных компонент и показателя преломления материала, из которого изготавливается решетка, и в нашем случае является постоянной величиной.

Компьютерное моделирование ИЧП-метода в рассматриваемой схеме показывает, что временная форма выходного (отраженного от ОЧБР-компрессора) импульса зависит от Δt_0 , т.е. от ΔL . При $\Delta t_0 = 0$, что достигается при $\Delta L = 0$, форма выходного импульса идентична форме входного импульса. Результаты компьютерных расчетов приведены на рис.2. Для моделирования использовались исходные данные, соответствующие параметрам экспериментальной установки. Временные профили лазерного импульса относятся к различным значениям фазового сдвига при изменении ΔL с шагом $\lambda/8$. Зависимость на рис.2,а соответствует случаю, когда сложение двух импульсов, отраженных от «красной» и «синей» частей компрессора, приводит к образованию временного профиля выходного лазерного импульса с пло-

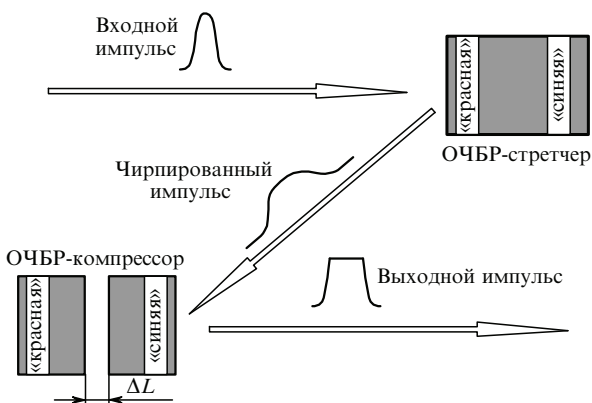


Рис.1. Принципиальная схема, поясняющая метод временного профилирования лазерных импульсов с помощью ИЧП.

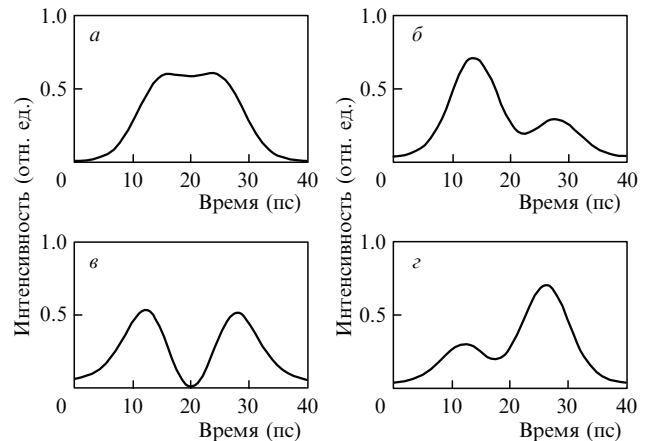


Рис.2. Результаты компьютерного моделирования: временные профили лазерного импульса для различных фазовых сдвигов при изменении ΔL с шагом $\lambda/8$.

ской вершиной. На рис.2,в результирующий импульс имеет симметричную двугорбую форму с провалом в центре, а рис.2,б и г соответствуют промежуточным случаям.

3. Экспериментальные результаты

На рис.3 представлена оптическая схема экспериментальной установки, предназначенной для исследования описанного выше ИЧП-метода временного профилирования лазерных импульсов. В качестве источника импульсов использовался Nd:YAP-лазер, работающий в режиме самосинхронизации мод и генерирующий цуг пикосекундных импульсов [11]. С помощью электрооптической ячейки Поккельса выделялся одиночный импульс длительностью ~ 8 пс с энергией ~ 5 мкДж. Его спектральная ширина составляла ~ 0.3 нм при центральной длине волны излучения $\lambda_0 = 1079.5$ нм. Для оптических развязок падающего на решетки и отраженного от них лазерного излучения использовались призмы Глана и пластинки $\lambda/4$. Передняя («синяя») часть ОЧБР-компрессора была установлена на подвижный столик, перемещаемый с помощью шагового электродвигателя с точностью ~ 16 нм (Newport, Model 850A). ОЧБР для стретчера и компрессора были разработаны и изготовлены компанией Optigrate (США) [12]. Для регистрации временного профиля выходного лазерного импульса использовалась электронно-оптическая камера (ЭОК), работающая в режиме линейной развертки с максимальной скоростью 6.5 пс/мм и предельным временным разрешением 0.7 пс [8]. Анализ полученных на выходном экране ЭОК изображений осуществлялся системой считывания С8484-05G (Hamamatsu, Япония). На рис.4 приведено изображение исходного лазерного импульса и его микрофотограмма.

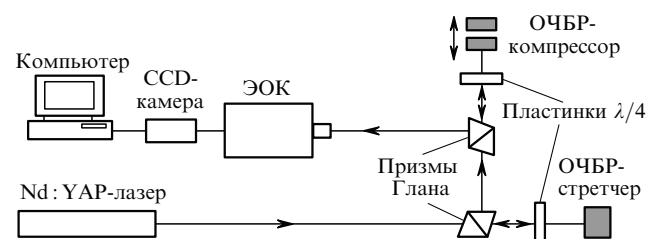


Рис.3. Оптическая схема экспериментальной установки.

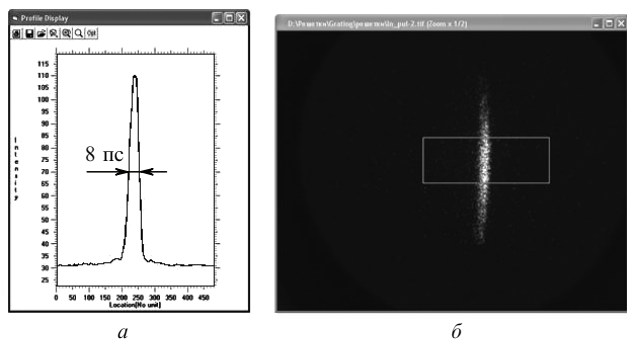


Рис.4. Изображение исходного одиночного лазерного импульса (а) и его микрофотограмма (б).

Микрофотограммы зарегистрированных ЭОК временных профилей лазерных импульсов, отраженных от ОЧБР-компрессора при различных ΔL , показаны на рис.5. Временные формы этих импульсов (квазипрямоугольная с плоской вершиной (рис.5,а), двугорбая (рис.5,б) и промежуточные формы (рис.5,б, в)) качественно согласуются с результатами компьютерного моделирования (рис.2). Отметим, что высокочастотные флуктуации сигналов обусловлены шумами ЭОК, а не собственной модуляцией лазерных импульсов.

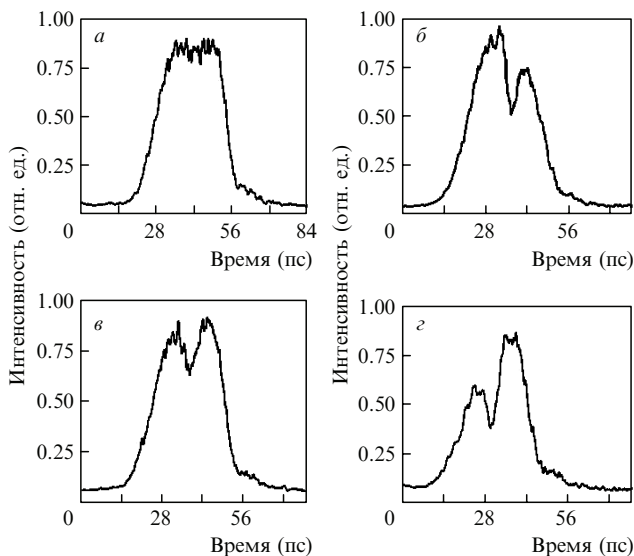


Рис.5. Микрофотограммы зарегистрированных ЭОК временных профилей лазерных импульсов, отраженных от ОЧБР-компрессора при различных ΔL .

4. Заключение

В результате проведенного компьютерного моделирования и выполненных экспериментов был реализован ИЧП-метод для преобразования пикосекундных лазерных импульсов на ОЧБР. Экспериментально получен лазерный импульс квазипрямоугольной формы с плоской вершиной. Компьютерное моделирование и экспериментальные результаты показали, что повторяемость регистрируемых временных профилей лазерных импульсов существенно зависит от случайных (неконтролируемых) изменений величины ΔL . Эти изменения могут быть вызваны механическими вибрациями, флуктуациями температуры и т. п., которые, в принципе, могут быть исключены традиционными способами.

Таким образом, результаты предварительных экспериментов подтверждают концепцию предложенного в данной работе ИЧП-метода временного профилирования сверхкоротких лазерных импульсов и указывают на перспективность его использования для получения импульсов с различными временными формами. Хотя этот метод был реализован для пикосекундных импульсов, принципиальные ограничения на его применение для фемтосекундных импульсов отсутствуют.

Авторы выражают признательность М.Я.Щелеву за проявленный интерес к работе и обсуждение результатов, а также В.И.Лозовому за помощь в проведении эксперимента.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-02-00793).

1. Липатов Н.И., Маненков А.А., Прохоров А.М. *Письма в ЖЭТФ*, **11**, 444 (1970).
2. Маненков А.А. В сб.: *Лазерная физика и оптические технологии* (Минск, 2008, т. 3, с. 197).
3. Vicaro C., Chigo A., Petrarca M., et al. *Proc. EPAC* (Lucerne, 2004, p. 1300).
4. Weiner A.M. *Rev. Sci. Instrum.*, **71**, 1929 (2000).
5. Schlup P., Wilson J., Bartels R. *Proc. CLEO'2007* (Baltimore, 2007, paper CPDB9).
6. Poudel M., Kolomenskii A., Schuessler H. *Appl. Opt.*, **49**, 3075 (2010).
7. Калашян М.А., Паланджян К.А., Есаян Г.Л., Мурадян Л.Х. *Квантовая электроника*, **40**, 868 (2010).
8. Lozovoi V.I., Vorobiev N.S., Malov M.N., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2869**, 179 (1997).
9. *Femtosecond Streak Camera C6138 (FESCA-200)* (Hamamatsu Photonics K.K. Catalogue № SHSS00003E03(2010)).
10. Chang G., Rever M., Smirnov V., et al. *Opt. Lett.*, **34**, 2952 (2009).
11. Бабушкин А.В., Воробьев Н.С., Прохоров А.М., Щелев М.Я. *Квантовая электроника*, **16**, 2036 (1989).
12. Efimov O., Glebov L., Glebova L., et al. *Appl. Opt.*, **38**, 621 (1999).