

Двухкаскадная акустооптическая дисперсионная линия задержки для сверхкоротких лазерных импульсов

В.Я.Молчанов, С.И.Чижиков, К.Б.Юшков

Описана оптическая дисперсионная линия задержки для управления спектральным составом и фазой сверхкоротких лазерных импульсов. Для независимого управления спектральной амплитудой и спектральной фазой импульсов предложено использовать каскадное расположение двух акустооптических ячеек с различными управляющими сигналами.

Ключевые слова: фемтосекундные лазерные системы, дисперсионная линия задержки, акустооптическая дифракция.

1. Введение

Адаптивные дисперсионные линии задержки на основе акустооптического (АО) эффекта являются универсальным и эффективным средством управления фемтосекундными лазерными импульсами. АО линии задержки позволяют осуществить компрессию сверхкоротких лазерных импульсов и амплитудную коррекцию их спектра [1–3]. Как правило, дисперсионная линия задержки выполняется на основе коллинеарной или квазиколлинеарной АО дифракции [3]. В отличие от перестраиваемых АО фильтров, ультразвуковая (УЗ) волна в кристалле АО линии задержки является и частотно-, и амплитудно-модулированной. Диапазон частотной модуляции соответствует ширине спектра лазерного импульса. При этом различные спектральные компоненты электромагнитной волны испытывают дифракцию в различных точках кристалла, что приводит к появлению фазовых сдвигов между спектральными компонентами. В приближении слабого поля функция пропускания АО устройства определяется преобразованием Фурье от пространственного распределения УЗ поля в среде взаимодействия и имеет комплексный характер [1, 4]. Это приводит к взаимосвязи между амплитудой функции пропускания и ее фазой, обусловленной соотношениями Крамерса–Кронига [5], вследствие чего амплитудная модуляция УЗ волны порождает дисперсии высших порядков, приводящие к нарушению формы импульсов.

В простейшем случае линейной частотной модуляции управляющего сигнала с постоянной амплитудой введенная дисперсия является квадратичной. Можно показать, что если огибающая УЗ сигнала имеет гауссову форму с шириной T_0 , а частота меняется в диапазоне ΔF , то дисперсия групповой скорости дифрагированного пучка B_2 описывается выражением

$$B_2 = \frac{\pi^3 \Delta F T_0^3}{\kappa^2 (1 + \pi^2 \Delta F^2 T_0^2)} \approx \frac{\pi T_0}{\kappa^2 \Delta F}. \quad (1)$$

В.Я.Молчанов, С.И.Чижиков, К.Б.Юшков. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049 Москва, Ленинский просп., 4; e-mail: aocenter@mail.ru

Поступило в редакцию 15 июня 2011 г.

Здесь κ – отношение циклической частоты света к частоте УЗ волны, определяемое в одночастотном режиме геометрией акустооптического взаимодействия. Приближенное равенство в (1) выполняется при $\Delta F T_0 \gg 1$, что справедливо практически для всех режимов работы дисперсионной линии задержки.

Управление дисперсией в линии задержки основано на изменении закона частотной модуляции. Если помимо частотной модуляции УЗ волны задается также амплитудная модуляция, то линия задержки осуществляет управление спектральной амплитудой электромагнитного излучения. Коррекция спектральной амплитуды, как правило, необходима в системах усиления оптических импульсов. Например, для регенеративных оптических усилителей [6] оптимальным решением является формирование амплитудного провала в спектре оптического излучения.

Одновременное наличие частотной и амплитудной модуляции УЗ волны накладывает существенные ограничения на функциональные возможности обычной линии задержки. Присутствие дисперсии второго порядка B_2 приводит к увеличению длительности оптических импульсов и делает практически невозможным размещение АО ячейки внутри многопроходного тракта оптических усилителей.

Для улучшения функциональных возможностей линии задержки в настоящей работе предложено разделить функции управления спектральной фазой и спектральной амплитудой света между двумя независимыми АО каскадами. В отличие от схемы двойного АО монохроматора [7, 8], позволяющей повысить контраст и улучшить форму передаточной функции, в данной системе два АО каскада выполняют различные функции и управляются сигналами различной формы.

Схема двухкаскадной АО линии задержки с независимым управлением приведена на рис.1. Первый каскад предназначен для управления спектральной фазой излучения и конструктивно устроен аналогично обычной АО линии задержки, т.е. выходным является излучение в первом дифракционном порядке. Второй каскад, предназначенный для управления спектральной амплитудой излучения, имеет принципиальное отличие: выходным является излучение в нулевом дифракционном порядке. В такой конфигурации второй каскад АО линии задержки

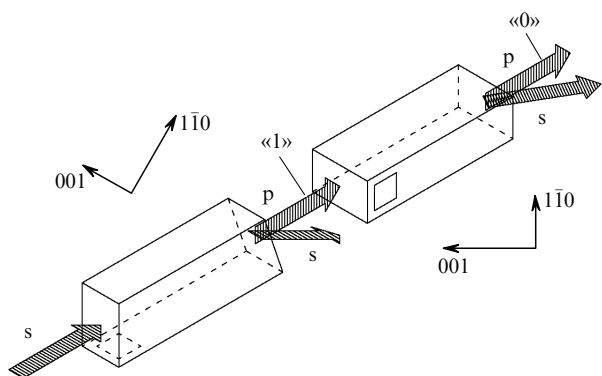


Рис.1. Схема хода лучей в двухкаскадной АО линии задержки: s и p – горизонтальная и вертикальная поляризации; «1» и «0» – первый и нулевой порядки дифракции. Плоскости дифракции в каскадах ортогональны.

работает как оптический адаптивный режекторный фильтр, а частотно-модулированный управляющий сигнал синтезирует в нулевом порядке заданную функцию пропускания. В этом каскаде электромагнитная волна не испытывает дополнительных фазовых искажений. Естественная дисперсия кристалла может быть скомпенсирована при помощи первого каскада или внешних пассивных устройств.

При использовании двух каскадов комплексная функция пропускания АО линии задержки $T(\omega)$ может быть представлена как произведение функций пропускания каждого из каскадов: $T(\omega) = T_1(\omega)T_2(\omega)$. При этом функция пропускания первого каскада может быть записана в виде $T_1(\omega) = \arg T(\omega) = \exp[i\Psi(\omega)]$, где действительная функция $\Psi(\omega)$ представляет собой спектральную фазу. Функция пропускания второго каскада имеет вид $T_2(\omega) = |T(\omega)|$. Таким образом, управляющий сигнал для первого каскада должен обеспечивать постоянную спектральную амплитуду функции пропускания $T_1(\omega)$ во всей спектральной полосе излучения $\Delta\omega$ и заданный в этом диапазоне закон изменения фазы $\Psi(\omega)$, а управляющий сигнал второго каскада – формирование действительной функции пропускания нулевого порядка $T_2(\omega)$. Поскольку второй каскад АО линии задержки не вносит дополнительной дисперсии при управлении амплитудой, он может быть использован как эффективный инструмент для выравнивания амплитудной характеристики в многопроходных регенеративных усилителях (в отличие от традиционной однокаскадной линии задержки [2]).

В соответствии с работой [9] была рассчитана и изготовлена экспериментальная двухкаскадная АО линия задержки на основе парателлуриата. Длина каждого из кристаллов составляла 60 мм, экспериментальное значение спектрального разрешения в одночастотном режиме было не хуже 6 см^{-1} , управляющая мощность – менее 60 мВт, центральная частота – 76 МГц. Источником излучения в эксперименте служил фемтосекундный лазер с центральной длиной волны 790 нм и спектральной шириной 80 нм. В качестве примера на рис.2 приведен спектр излучения на выходе одного из каскадов АО линии задержки в режиме формирования узкого спектрального провала посредством соответствующей амплитудной модуляции УЗ импульса. При этом диапазон изменения частоты ультразвука ΔF за время $T_0 = 50 \text{ мкс}$ составил

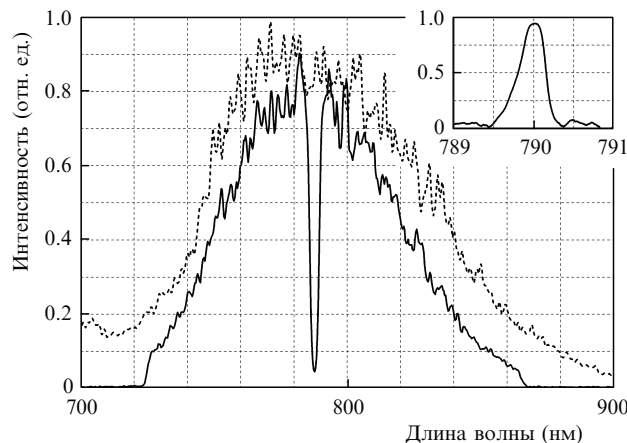


Рис.2. Спектр излучения на выходе АО дисперсионной линии задержки (сплошная линия) и спектр входного излучения (пунктирная линия). На вставке приведена аппаратная функция линии задержки в одночастотном режиме; ширина по уровню -3 дБ составляет 0.35 нм.

15.9 МГц. Расчет по формуле (1) показывает, что при данных параметрах кристалла парателлуриата максимальное значение дисперсии второго порядка, вносимой в результате АО взаимодействия, составляет по абсолютной величине 43000 фс^2 , а материальная дисперсия второго порядка кристалла – 30000 фс^2 . Пассивная дисперсия второго порядка в обоих каскадах может быть скомпенсирована настройкой стретчера и компрессора, в то время как первый каскад АО линии задержки позволяет осуществлять тонкую настройку дисперсии, в том числе и высших порядков.

Проведенный анализ показал, что предложенный метод раздельного независимого АО управления и спектральной фазой, и спектральной амплитудой сверхкоротких импульсов отличается большой гибкостью и более высокой точностью обработки оптического спектра по сравнению с известным методом [1–3]. Прибор может применяться в фемтосекундных лазерных системах различной архитектуры, в частности в качестве корректирующего элемента, включаемого на несколько проходов в оптический тракт регенеративного усилителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы создания и развития НИТУ «МИСиС», а также РФФИ (грант № 09-07-00365-а).

1. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. *Квантовая электроника*, **14**, 811 (1987).
2. Tournois P. *Opt. Commun.*, **140**, 245 (1997).
3. Molchanov V.Ya., Chizhikov S.I., Makarov O.Yu., et al. *Appl. Opt.*, **48**, C118 (2009).
4. Магдич Л.Н. *Оптика и спектроскопия*, **49**, 387 (1980).
5. Fermann M.E., da Silva V., Smith D.A., et al. *Opt. Lett.*, **18**, 1505 (1993).
6. Fermann M.E., Galvanauskas A., Sucha G. *Ultrafast Lasers. Technology and Applications* (New York: Marcel Dekker, 2003).
7. Мазур М.М., Шорин В.Н., Чижиков С.И., Леонов С.А. *Оптика и спектроскопия*, **67**, 736 (1989).
8. Pustovoi V.I. Pozhar, V.E., Mazur M.M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5953**, 59530P (2005).
9. Молчанов В.Я., Волошинов В.Б., Макаров О.Ю. *Квантовая электроника*, **39**, 353 (2009).