

# Новая схема стретчера для параметрического усилителя чирпированных импульсов с преобразованием частоты

Г.И.Фрейдман, И.В.Яковлев

*Исследованы свойства гибридных призмочно-решеточных дисперсионных систем. Для лазерного комплекса петаваттного уровня мощности, основанного на параметрическом усилении чирпированных импульсов с преобразованием частоты, разработана схема призмочно-решеточного стретчера, согласованного со стандартным компрессором по дисперсии фазы до 4-го порядка включительно. С использованием созданного стретчера получена пиковая мощность лазерного излучения  $\sim 200$  ТВт.*

**Ключевые слова:** стретчер, компрессор, усиление чирпированных импульсов, обращение чирпа, петаваттный лазер.

В настоящее время практически во всех лазерных системах, генерирующих импульсы сверхмощного излучения, используется метод усиления растянутых до  $\sim 1$  нс ультракоротких импульсов (chirped-pulse amplification (CPA) [1]). В традиционных CPA-системах с лазерным усилением, а также в системах, основанных на параметрическом усилении чирпированных импульсов (optical parametric CPA (OPCPA)) [2], применяются стандартные компрессоры на параллельных дифракционных решетках [3], обеспечивающие отрицательную дисперсию групповых скоростей, а также стретчеры на антипараллельных решетках с переворачивающим изображением телескопом [4], обеспечивающие положительную групповую дисперсию.

В работе [5] была предложена и исследована оригинальная OPCPA-схема построения петаваттного лазерного комплекса. В первом каскаде параметрического усилителя этой системы осуществляется широкополосное преобразование инжектируемого излучения с частотой  $\omega_2$  в сопряженное излучение с частотой  $\omega_1$ , которое усиливается в последующих каскадах, а затем компрессируется. При трехволновом взаимодействии сопряженные сигнальная и холостая волны имеют взаимно обращенный чирп [6]. Таким образом, в OPCPA-схеме с обращением чирпа (optical parametric reversed-chirp pulse amplification (OPRCPA)) соотношение между фазами спектральных составляющих инжектируемого ( $\Phi_2$ ) и сопряженного сигнального ( $\Phi_1$ ) излучений имеет вид [5]

$$\Phi_1(\omega_{10} + \Omega) = -\Phi_2(\omega_{20} - \Omega), \quad (1)$$

где  $\Omega = \omega - \omega_0$  – отклонение текущей частоты от центральной.

Учитывая, что инжектируемое в первый каскад параметрического усилителя излучение перед этим чирпируется в стретчере,  $\Phi_2(\omega_2) = \Phi_{\text{str}}(\omega_2)$ , и представляя нелинейную фазу (линейные слагаемые не влияют на длитель-

ность и профиль импульса), вносимую стретчером, в виде разложения в ряд Тейлора, легко получить выражение для нелинейной спектральной фазы возбуждаемой сигнальной волны:

$$\begin{aligned} \Phi_1(\omega_{10} + \Omega) = & -\frac{\Phi_{\text{str}}^{(2)}\Omega^2}{2} + \frac{\Phi_{\text{str}}^{(3)}\Omega^3}{6} \\ & -\frac{\Phi_{\text{str}}^{(4)}\Omega^4}{24} + \frac{\Phi_{\text{str}}^{(5)}\Omega^5}{120} + \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Phi^{(i)} = d^i\Phi/d\omega^i|_{\omega_0}$ .

Пренебрегая материальной дисперсией в нелинейных кристаллах, будем считать, что при параметрическом усилении в последующих каскадах фаза сигнальной волны не меняется. На выходе из компрессора, где к фазе (2) сигнального излучения добавляется фазовый сдвиг  $\Phi_{\text{com}}(\omega_{10} + \Omega)$ , имеем

$$\Phi_{\text{sig}}(\Omega) = -\Phi_{\text{str}}(-\Omega) + \Phi_{\text{com}}(\Omega). \quad (3)$$

Импульс будет скомпрессирован до первоначальной длительности, если  $\Phi_{\text{sig}}(\Omega) = 0$ . Таким образом, условия фазового согласования стретчера и компрессора в схеме OPRCPA таковы:

$$\Phi_{\text{str}}^{(i)} = (-1)^i \Phi_{\text{com}}^{(i)}. \quad (4)$$

Соотношения (4) принципиально отличаются от известных условий согласования фаз в традиционных CPA- и OPCPA-системах:  $\Phi_{\text{str}}^{(i)} = -\Phi_{\text{com}}^{(i)}$ .

С целью создания для схемы OPRCPA стретчера, согласованного со стандартным компрессором, были исследованы возможности комбинированных призмочно-решеточных дисперсионных систем. Известно [7], что пара призм, находясь между дифракционными решетками в расходящемся пучке, может вносить в дисперсию 3-го порядка системы более существенный вклад, чем в случае падения на призмы коллимированного пучка. Результаты анализа показали, что увеличение расстояния между призмами, а также увеличение угла между их рабочими гранями позволяет обратить знак дисперсии 3-го порядка такой системы. В частности, в случае применения брюстеровских призм расстояние, при котором дисперсия 3-го порядка обращается в нуль, составляет всего

Г.И.Фрейдман, И.В.Яковлев. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: gif@appl.sci-nnov.ru, ivan@ufr.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 19 сентября 2006 г.

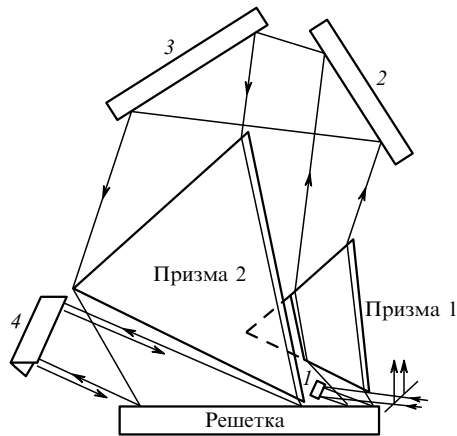


Рис.1. Схема гибридного призмочно-решеточного стретчера для OPRCPA-системы [5] и ход лучей в нем (1–4 – зеркала).

несколько десятков сантиметров. Кроме того, в призмочно-решеточной системе можно в конечных пределах независимо управлять дисперсиями 2-го, 3-го и 4-го порядков, что позволяет в процессе настройки учесть фазовый набег сигнального излучения в усилителе и, таким образом, точно скомпенсировать дисперсию OPRCPA-системы до 4-го порядка включительно. Аналогичная ситуация имеет место и в гибридной призмочно-решеточной системе с антипараллельными решетками.

На основании проведенного анализа был разработан призмочно-решеточный стретчер для OPRCPA-системы (рис.1) [5]. Расчет добавочной фазы, вносимой стретчером, выполнялся численно на основе законов геометрической оптики и закона отражения лучей с разными длинами волн от дифракционных решеток. Стретчер был сконструирован на базе одной дифракционной решетки, имеющей 1200 штр./мм. Зеркало 1 посылает входной пучок на решетку под углом  $68.5^\circ$ . Роль второй решетки выполняет та ее часть, на которую попадают лучи, отраженные ортогональными зеркалами 2 и 3. Призмы изготовлены из оптического стекла марки К 8 и имеют одинаковый угол  $68.3^\circ$  при вершине. Рабочие грани призм расположены параллельно друг другу. Пучок параллельных лучей, отразившись второй раз от решетки, с помощью зеркала-крыши 4 направляется назад в новом ярусе, параллельном плоскости рисунка и отстоящем от первого яруса на 2 см. Эффективное расстояние между решетками стретчера равно 69.7 см.

Созданный стретчер обеспечивает растяжение исходных (длительностью 40 фс) импульсов лазера на Sr:Forsterite примерно до 0.6 нс. Центральная длина волны излучения составляет 1250 нм. Полоса пропускания стретчера  $2\Omega_m$  равна  $\sim 1000 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует ширине спектра импульса длительностью 40 фс, измеренного на уровне  $e^{-4}$ . Диаметр входного пучка достигает 2 см. В согласованном компрессоре центральная длина волны излучения равна 911 нм, угол падения пучка на решетку составляет  $43.1^\circ$ , расстояние по нормали между решетками – 133.8 см.

Влияние вариаций положения элементов призмочно-решеточного стретчера на дисперсионные характеристики системы стретчер/компрессор иллюстрирует рис.2. Видно, что существует принципиальная возможность создания алгоритма настройки системы в рабочую точку, при котором можно практически независимо управлять 2-м, 3-м и 4-м порядками дисперсии. Остаточная

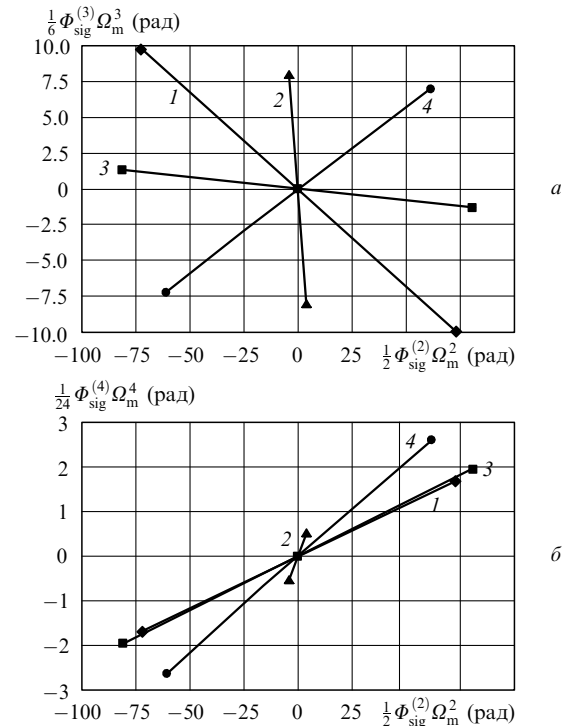


Рис.2. Зависимости фазовых расстройок 3-го (а) и 4-го (б) порядков от квадратичной фазовой расстройки для призмочно-решеточного стретчера; 1–4 – характерные настроечные кривые, соответствующие сдвигу решетки перпендикулярно рабочей поверхности на  $\pm 0.1$  см (1), сдвигу призмы 1 вдоль нормали к решетке на  $\pm 0.1$  см (2) и вдоль плоскости решетки на  $\pm 0.2$  см (3), а также изменению угла падения луча на решетку на  $\pm 10'$  (4).

дисперсия созданного стретчера является дисперсией 5-го порядка фазы  $\Phi^{(5)}$ . Знак  $\Phi^{(5)}$  соответствует появлению предвестника, однако это рассогласование можно скомпенсировать с помощью дополнительных корректоров фазы, например AOPDF [8].

Новый стретчер позволил создать источник световых импульсов длительностью 45 фс с параметрическими усилителями на кристалле DKDP с рекордной пиковой мощностью  $\sim 200 \text{ ТВт}$  [9]. Также был рассчитан стретчер для системы, в которой усиленное в схеме OPRCPA chirпированное излучение складывается с квазимонохроматическим излучением с длиной волны 1054 нм и затем сжимается в компрессоре на решетках, имеющих 1700 штр./мм.

1. Strickland D., Mourou G. *Opt. Commun.*, **56**, 219 (1985).
2. Dubietis A., Butkus R., Piskarskas A.P. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **12**, 163 (2006).
3. Treacy Edmond B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **5**, 454 (1969).
4. Martinez O.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 59 (1987).
5. Freidman G., Andreev N., Ginzburg V., Katin E., Khazanov E., Lozhkarev V., Palashov O., Sergeev A., Yakovlev I. *Proc. SPIE, Int. Soc. Opt. Eng.*, **4630**, 135 (2002).
6. Данелюс Р., Пискарскас А., Сируткайтис В., Стабинис А., Янкаускас А. *Письма в ЖЭТФ*, **42**, 101 (1985).
7. Kane S., Squier J., Rudd J.V., Mourou G. *Opt. Lett.*, **19**, 1876 (1994).
8. Verluise F., Laude V., Cheng Z., Spielmann Ch., Tournois P. *Opt. Lett.*, **25**, 575 (2000).
9. 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., Garanin S.G., Sukharev S.A., Rukavishnikov N.N., Charukhchev A.V., Gerke R.R., Yashin V.E. *Opt. Express*, **14**, 446 (2006).