

Компенсация дисперсии третьего порядка излучения петаваттных лазеров с компрессорами на основе самосопряженных систем зеркало – решетка*

Жаоянг Ли, Дасинг Рао, Юйсинь Ленг, Лей Чен, Джапинг Дай

Предложен метод компенсации дисперсии третьего порядка в компрессорах фемтосекундных петаваттных лазерных систем, использующих самосопряженную схему зеркало–решетка (OIGST) с предотвращением возврата пучка в усилительные каскады. Проведено моделирование для функционирующих или разрабатываемых петаваттных лазеров на стекле с неодимом и титан-сапфировом кристалле.

Ключевые слова: усиление chirпированного импульса, компрессор фемтосекундных импульсов с самосопряженной системой зеркало–решетка, дисперсия третьего порядка.

1. Введение

Для быстрого развития лазеров сверхвысокой мощности, использующих методику усиления chirпированных импульсов (CPA), необходимы стретчеры и компрессоры с элементами больших размеров [1–3]. Метод самосопряжения системы зеркало–решетка (OIGST) позволяет применять решетки метрового размера для компрессии импульсов в существующих петаваттных лазерах [4, 5]. Как показано на рис.1, добавление решетки и расположенного перпендикулярно к ней зеркала удваивает эффективную апертуру решетки при сохранении оптической эффективности. Метод OIGST особенно подходит для фемтосекундных лазеров, поскольку он позволяет получить идеальное сопряжение решеток (в отличие от стандартного сопряжения с компенсацией [6]) и в нем отсутствуют плунжерные ошибки полной системы, приводящие к увеличению длительности выходных импульсов [7]. Для применения метода OIGST в создаваемой Китайской мультипетаваттной лазерной установке нами было обосновано, что требования к точности юстировки и поддержанию стабильности для этого метода снижаются по сравнению с традиционным методом сборки решеток [8]. На нашей установке с оптическим параметрическим усиле-

нием chirпированных импульсов (ОПСА) был проведен первый демонстрационный эксперимент по компрессии лазерных импульсов методом OIGST и получены очень близкие к спектрально-ограниченным импульсы при расходимости пучка, близкой к дифракционному пределу [9]. Однако в этом эксперименте было обнаружено, что при использовании метода OIGST в лазерной CPA-системе может происходить повреждение цепочки усилителей за счет возвращаемого, обратно отраженного импульса (RRP) [8].

Оптический ход лучей в OIGST-компрессоре был описан в [4, 9]. Из рис.1 видно, что входной пучок дифрагирует на первой дифракционной решетке, затем на составной OIGST-решетке и направляется к выходу. При дифракции на первой дифракционной решетке пучок расширяется в горизонтальной плоскости, поскольку имеет широкий спектр. Поэтому при дифракции на составной OIGST-решетке разные компоненты спектра следуют по разным оптическим путям: компоненты с более короткими длинами волн дифрагируют в направлении выхода из компрессора, а компоненты с большими длинами волн сначала отражаются от зеркала и только затем дифрагируют на решетке и отражаются вторым зеркалом в направлении выхода. Ход лучей для двух спектральных составляющих показан на рис.1: нужный нам, продифраги-

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

Zhaoyang Li. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China
e-mail: zzyylee@siom.ac.cn

Daxing Rao. Shanghai Institute of Laser and Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Yuxin Leng. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Lei Chen. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Yaping Dai. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Поступила в редакцию 23 октября 2014 г., после доработки – 13 ноября 2014 г.

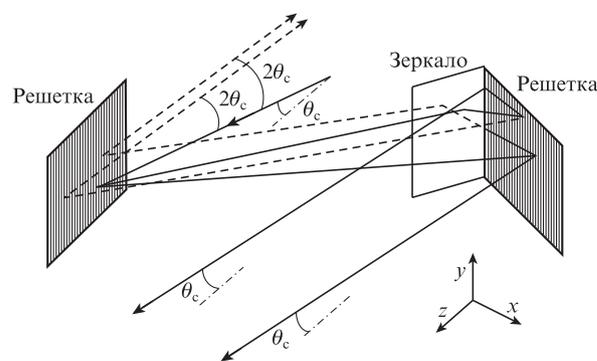


Рис.1. Оптический путь пучка в решеточном OIGST-компрессоре. Сплошные и штриховые линии показывают траектории продифрагировавших и отраженных пучков в самосопряженной OIGST-системе соответственно.

ровавший на составной OIGST-решетке, луч (сплошная линия) сопровождается отраженным лучом (штриховая линия). Для последнего составная OIGST-решетка является стандартным ретроотражателем. Из-за конфигурации с прямым углом отраженный пучок будет следовать точно по своему входному пути и инжектироваться обратно в цепочку усилителей. В петаваттной лазерной системе оптический путь в компрессоре обычно превышает 1.5 м, и время задержки между основным импульсом и обратно отраженным больше 10 нс. В оптическом параметрическом усилителе длительность импульса накачки, как правило, меньше 10 нс. При этом условия обратно отраженный импульс не будет усиливаться и может быть подавлен оптическим изолятором. К сожалению, в оптических усилителях других типов (например, усилители на стекле с неодимом и Ti:сапфировом кристалле) усиления обратно отраженного импульса избежать невозможно.

Как показано на рис.1, в работе [8] нами был предложен простой способ пространственного отклонения обратно отраженного пучка от выходного окна цепочки усилителей за счет небольшого наклона входного пучка к штрихам решетки (последние направлены вдоль оси y) на плоский угол θ_c . Однако введение этого угла наклона будет изменять оптический путь пучка дифракции в компрессоре на паре параллельных решеток, что приведет к дисперсионным и, следовательно, временным искажениям сжатого импульса [10].

В настоящей статье проведен расчет этих искажений для лазера на стекле с неодимом и Ti:сапфирового лазера и предложен простой способ компенсации дисперсии третьего порядка. Кроме того, представлен метод расчета дисперсии для CPA-лазера с OIGST, который может быть использован при конструировании лазерных систем сверхкоротких импульсов сверхвысокой мощности с решетками ограниченных размеров, например будущей фемтосекундной мультипетаваттной лазерной установки в Китае.

2. Дисперсионное искажение

Фазовая задержка ϕ , вносимая дисперсионным оптическим элементом, может быть разложена в ряд Тейлора вблизи центральной частоты ω_0 :

$$\begin{aligned} \phi(\omega) = & \phi_0 + \phi'(\omega - \omega_0) + \frac{\phi''}{2}(\omega - \omega_0)^2 \\ & + \frac{\phi'''}{6}(\omega - \omega_0)^3 + \frac{\phi''''}{24}(\omega - \omega_0)^4 + \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

где ϕ_0 – фазовая постоянная; ϕ' – групповая задержка; ϕ'' – дисперсия групповой скорости (GVD); ϕ''' – дисперсия третьего порядка (TOD); ϕ'''' – дисперсия четвертого порядка (FOD). Дисперсионные оптические элементы в стандартной лазерной CPA-системе обычно включают в себя стретчер импульсов, усиливающие кристаллы, линзы пространственных фильтров в цепочке усилителей и компрессор импульсов. Таким образом, условие компенсации дисперсии лазерной CPA-системы есть

$$\begin{cases} \text{GVD}_s + \text{GVD}_m + \text{GVD}_c = 0, \\ \text{TOD}_s + \text{TOD}_m + \text{TOD}_c = 0, \\ \text{FOD}_s + \text{FOD}_m + \text{FOD}_c = 0, \\ \dots \end{cases} \quad (2)$$

Для GVD, TOD и FOD нижние индексы s , c и m соответствуют стретчеру, компрессору и остальным элементам, работающим «на пропускание».

Основная дисперсия в CPA-системе вносится стретчером и компрессором, которые имеют одинаковую оптическую структуру в виде пары параллельных решеток [11, 12]. Отличием стретчера является телескоп, установленный внутри пары решеток, что обеспечивает изменение знака дисперсии по отношению к компрессору. Фазовая задержка в компрессоре на параллельной паре решеток

$$\phi(\omega) = \frac{\omega}{c} \frac{1 + \cos(\alpha - \beta)}{\cos \theta} \frac{G}{\cos \beta} - \frac{2\pi}{d} G \tan \beta, \quad (3)$$

где α – угол падения; β – угол дифракции; G – расстояние между парой решеток; c – скорость света; d – период решетки. Как правило, стретчер и компрессор конструируются с одинаковыми параметрами G и d , поэтому абсолютные величины GVD_s , TOD_s и FOD_s равны абсолютным величинам GVD_c , TOD_c и FOD_c соответственно. В настоящей статье рассматривается только безабберационная конфигурация стретчера [13].

Как отмечалось во Введении, для исключения повреждений, вызываемых RRP, угол наклона в компрессоре отличен от нуля. Из рис.1 видно, что, если входной пучок немного наклонен к оси y , оптический путь (и фазовая задержка) протифрагировавшего лазерного импульса, проходящего через компрессор, не будет совпадать с его первоначальным путем, что приводит к дисперсионным искажениям и нарушает дисперсионный баланс всей CPA-системы. Введение такого же угла наклона в стретчер могло бы быть эффективным решением, но это противоречит его многопроходной конфигурации.

3. Компенсационное решение

3.1. Система на основе неодимового стекла

Из-за ограниченной ширины полосы усиления и с учетом большой апертуры активной среды, эта система могла бы формировать субпикосекундные лазерные импульсы с энергией в единицы – десятки килоджоулей. Мо-

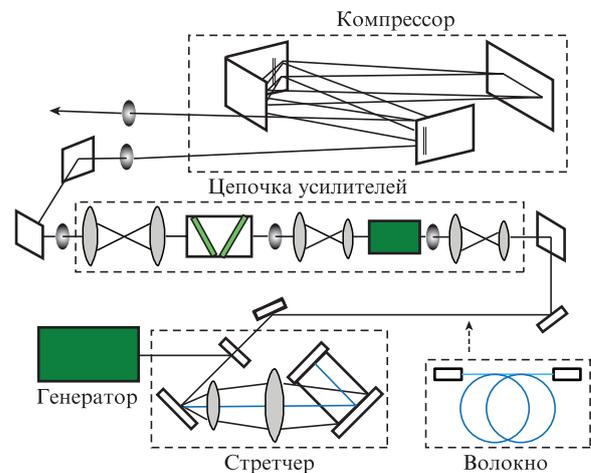


Рис.2. Схема петаваттной установки на неодимовом стекле. Падающий пучок в компрессоре наклонен во избежание попадания RRP в цепочку усилителей. Волотно вставляется для компенсации TOD.

Табл.1. GVD, TOD и FOD для системы на Nd-стекле.

Элемент	Длина (м)	GVD (фс ²)	TOD (фс ³)	FOD (фс ⁴)
Стретчер	0.4980×8	2.7150×10^8	-4.11320×10^9	1.0371×10^{11}
Nd-стекло	3.35	8.0239×10^4	1.3643×10^5	-1.4924×10^5
Линзы	0.36	8.3628×10^3	1.7126×10^4	-2.0547×10^4
Компрессор ($\theta_c = 0$)	1.9926×2	-2.7158×10^8	4.1146×10^9	-1.0375×10^{11}
Полная система ($\theta_c = 0$)		0	1.5536×10^6	-4.0170×10^7
Компрессор ($\theta_c = 1^\circ$)	2.0003×2	-2.7158×10^8	4.1039×10^9	-1.0321×10^{11}
Полная система ($\theta_c = 1^\circ$)		0	-9.1464×10^6	4.9983×10^8
Компрессор ($\theta_c = 2^\circ$)	2.0236×2	-2.7158×10^8	4.0712×10^9	-1.0156×10^{11}
Полная система ($\theta_c = 2^\circ$)		0	-4.1846×10^7	2.1498×10^9
Компрессор ($\theta_c = 3^\circ$)	2.0638×2	-2.7158×10^8	4.0151×10^9	-9.8726×10^{10}
Полная система ($\theta_c = 3^\circ$)		0	-9.7946×10^7	4.9838×10^9
Кварцевое волокно	0.001	17.263	43.202	-56.899

делирование проведено для петаваттной установки [14] со структурой, представленной на рис.2. Затравочный импульс (центральная длина волны 1053 нм, длительность 230 фс, энергия 0.5 нДж) растягивается до 3 нс восьмипроходным однорешеточным стретчером, усиливается до 400 Дж с помощью цепочки усилителей на Nd-стекле и сжимается до ~ 400 фс в однопроходном четырехрешеточном компрессоре (энергия на выходе компрессора 350 Дж). Увеличение длительности импульса по сравнению с исходной связано с ограниченной шириной полосы усиления (20 нм) и нелинейными фазовыми искажениями в цепочке усилителей (B -интеграл равен ~ 1.7). Общие длина активной среды и толщина линз из стекла BK7 в рассматриваемой системе составляют 3.35 и 0.36 м соответственно. В стретчере и компрессоре используются решетки с одним и тем же периодом $d = 1740$ пар лин./мм при одинаковых углах падения 70° . Для компенсации полной GVD системы расстояние между решетками составляет 0.4980 и 1.9926 м соответственно. Нескомпенсированная TOD относительно невелика и не искажает временную форму выходного субпикосекундного импульса.

Рассчитанные GVD, TOD и FOD дисперсионных элементов рассматриваемой системы приведены в табл.1. Из нее видно, что с ростом угла наклона θ_c длина компрессора должна быть увеличена для компенсации остаточной GVD системы, однако остаточные TOD и FOD одновременно скомпенсированы быть не могут. Влиянием FOD на временную форму субпикосекундного импульса можно пренебречь, и далее рассматривается только компенсация TOD.

На рис.3,а показаны зависимости GVD и отношения TOD/GVD от угла наклона. Абсолютные величины GVD и TOD уменьшаются с ростом угла наклона, причем TOD уменьшается быстрее, чем |GVD|. Уменьшение |GVD| компрессора приводит к остаточной GVD системы в целом, что увеличивает длительность выходного импульса. В нашей системе углы наклона в 1° и 2° приводят к растяжению импульса до 7 и 29 пс соответственно. Эта остаточная GVD может быть легко устранена путем небольшого увеличения длины компрессора G_c . Вместе с тем это не приводит к компенсации TOD, что уменьшает пиковую интенсивность и ухудшает временной контраст излучения. Как правило, в этих условиях необходима дополнительная подстройка угла падения α_c в компрессоре. Одновременная компенсация GVD и TOD может быть полу-

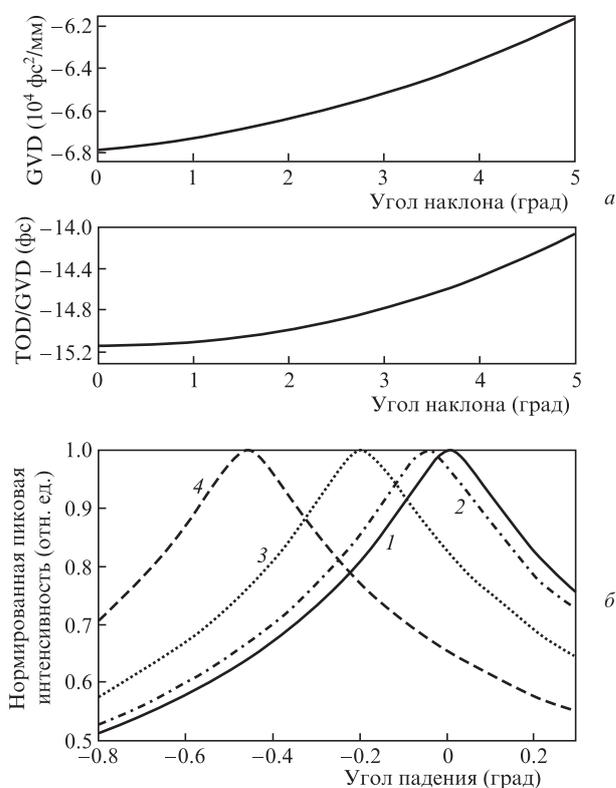


Рис.3. Зависимости GVD и TOD/GVD от угла наклона θ_c (а) и относительной пиковой интенсивности импульса при полной компенсации GVD от угла падения в компрессоре при $\theta_c = 0$ (1), 1° (2), 2° (3) и 3° (4) (б).

чена подстройкой как длины G_c , так и угла падения α_c [15]: длина определяет GVD, TOD и FOD, а угол падения влияет на соотношение между GVD, TOD и FOD.

На рис.3,б приведена зависимость пиковой интенсивности импульса с компенсированной GVD от угла падения α_c при различных углах наклона θ_c . Наибольшая интенсивность (что соответствует наилучшей компенсации TOD) достигается при углах падения 0, -0.04° , -0.20° и -0.46° для $\theta_c = 0$, 1° , 2° и 3° соответственно. Также видно, что в отсутствие подстройки α_c пиковая интенсивность при условии компенсации GVD и при $\alpha_c = 0$ уменьшается с ростом θ_c . В принципе, уменьшение угла падения в компрессоре могло бы скомпенсировать TOD, но это приво-

дит к перекрытию части падающего пучка второй решеткой. Кроме того, подстройка угла падения для однопроходного четырехрешеточного компрессора является сложной технической проблемой, требующей прецизионного позиционирования решеток метровых размеров.

Альтернативным путем решения задачи компенсации TOD является использование гибридной конфигурации с парой призм и парой решеток [16]. Однако этот подход увеличивает сложность юстировки и снижает ее инженерную надежность, особенно в случае крупномасштабной петаваттной лазерной системы.

Рассмотрим значительно более простой альтернативный вариант компенсации TOD: отрицательная TOD стретчера может быть скомпенсирована с помощью элемента с положительной TOD. Таковым может быть кварцевое волокно, имеющее положительные GVD и TOD (см. табл.1). Если в лазерную систему вводится короткий отрезок волокна, условие компенсации полной дисперсии системы может быть переписано в виде

$$\begin{cases} \text{GVD}_s + \text{GVD}_f + \text{GVD}_m + \text{GVD}_c = 0, \\ \text{TOD}_c + \text{TOD}_f + \text{TOD}_m + \text{TOD}_c = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где нижний индекс f идентифицирует волокно. В соответствии с формулой (4) компенсация TOD выходного излучения может быть получена оптимизацией длины кварцевого волокна, а длина компрессора G_c должна быть немного изменена. При этом угол падения α_c не меняется. В табл.2 приведены оптимизированная длина волокна L_f и соответствующая длина G_c компрессора.

Табл.2. Длины волокна (L_f) и компрессора (G_c) при различных углах наклона θ_c .

θ_c (град)	L_f (м)	G_c (м)
0	0	1.9926
1	30.29	2.0041
2	138.57	2.0415
3	328.47	2.1069

Использование кварцевого волокна приводит к компенсации полных GVD и TOD системы, но создает новую проблему: фазовую самомодуляцию (SPM). Действительно, кварцевое волокно может рассматриваться как дополнительный стретчер, и тогда имеются две возможные конфигурации двухступенчатого стретчера: волоконно-решеточная (FG) и решеточно-волоконная (GF). В FG конфигурации короткий импульс с высокой энергией напрямую поступает в волоконный стретчер, а уже затем в решеточный стретчер, поэтому SPM в волокне является серьезной проблемой. В GF конфигурации интенсивность лазерного излучения в волокне уменьшается примерно в 13000 раз за счет решеточного стретчера, и, таким образом, влияние SPM может быть незначительным.

Профили интенсивности сжатых импульсов при использовании одномодовых волокон с диаметром сердцевины 6 мкм приведены на рис.4. При угле наклона $\theta_c = 1^\circ$ для компенсации дисперсии используется кварцевое волокно длиной 30.29 м, при $\theta_c = 2^\circ$ – длиной 138.57 м. В FG конфигурации спектр импульсов уширяется за счет SPM, и часть интенсивности перетекает в спектральные компоненты, расположенные вне полосы усиления Nd-стекла (рис.4,а), что снижает пиковую интенсивность. Кроме того, как показано на рис.4,б, вследствие SPM ухудшает-

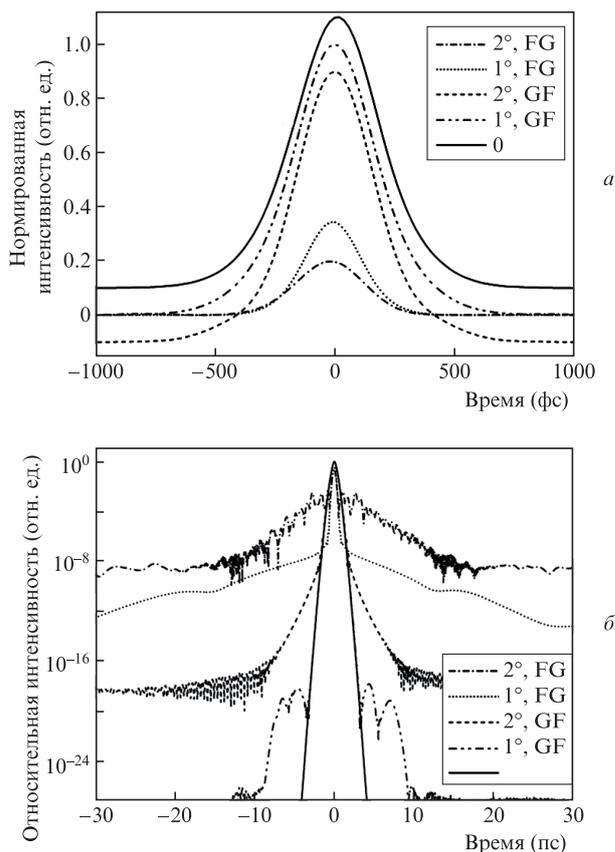


Рис.4. Зависимости абсолютной нормированной интенсивности (а) и относительной интенсивности (б) от времени при углах наклона $\theta_c = 0, 1^\circ$ и 2° для конфигураций, в которых волокно расположено после стретчера (GF) и до него (FG). Сплошные кривые соответствуют полной компенсации дисперсии при нулевом угле наклона.

ся временной контраст. Поэтому единственно возможным решением является GF конфигурация. При $\theta_c = 2^\circ$ искажения профиля интенсивности малы, при этом деградация временного контраста также мала, и за 10 пс до максимума интенсивности временной контраст составляет 10^{-16} . В нашей установке апертура пучка равна 320 мм, а путь пучка от оконечного усилителя до компрессора равен 15 м, поэтому оптимально использовать угол наклона $\theta_c = 1.5^\circ$ и кварцевое волокно длиной 75 м.

3.2. Система на Ti:сапфировом кристалле

Выходная энергия лазерной системы на Ti:сапфировом кристалле ограничена малыми доступными размерами кристаллов, зато система может формировать очень короткие фемтосекундные импульсы за счет широкой полосы усиления. Моделирование проводилось для планируемой мультипетаваттной установки, для которой размер дифракционных решеток с золотым покрытием составляет 2 м. В этой системе импульс затравки длительностью 20 фс с центральной длиной волны излучения 800 нм будет растянут до 2 нс, усилен до энергии ~ 100 Дж и повторно сжат до ~ 40 фс. Стретчер будет иметь четырехпроходную однорешеточную конфигурацию. Число штрихов решетки, угол падения и расстояние G_s решеточной пары выбираются равными 1740 пар лин./мм, 55° и 0.4263 м соответственно. Оценка B -интеграла полной системы составляет ~ 0.8 . Полная длина активных кристал-

Табл.3. GVD, TOD и FOD для системы на Ti:сапфировом кристалле.

Элемент	Длина (м)	GVD (фс ²)	TOD (фс ³)	FOD (фс ⁴)
Стретчер	0.4263 × 4	8.4883 × 10 ⁶	-2.3635 × 10 ⁷	1.0744 × 10 ⁸
Ti:сапфировые кристаллы	1.86	1.1042 × 10 ⁵	7.7610 × 10 ⁴	-2.6624 × 10 ⁴
Кристалл DKDP	0.86	3.0327 × 10 ⁴	3.2025 × 10 ⁴	-1.8302 × 10 ⁴
Линзы BK7	0.19	8.4721 × 10 ³	6.0867 × 10 ³	-2.0083 × 10 ³
Компрессор ($\alpha_c = 56.07^\circ$)	0.8909 × 2	-8.6375 × 10 ⁶	2.3585 × 10 ⁷	-1.0521 × 10 ⁸
Полная система ($\alpha_c = 56.07^\circ$)		0	6.5652 × 10 ⁴	2.1846 × 10 ⁶
Компрессор ($\theta_c = 6.26^\circ$)	0.8920 × 2	-8.6375 × 10 ⁶	2.3583 × 10 ⁷	-1.0502 × 10 ⁸
Полная система ($\theta_c = 6.26^\circ$)		0	6.3722 × 10 ⁴	2.3731 × 10 ⁶

лов, кристалла DKDP и линз из стекла BK7 равна 1.86, 0.86 и 0.19 м соответственно. Отвечающие проекту GVD, TOD и FOD дисперсионных элементов системы приведены в табл.3.

В отсутствие материальной дисперсии свободный от дисперсии импульс может быть получен при согласовании компрессора со стретчером. Однако влияние материальной дисперсии, особенно TOD и FOD, на сжатый импульс для фемтосекундной системы является гораздо более существенным, чем для пикосекундной. Как было показано выше, для системы на неодимовом стекле GVD и TOD могут быть скомпенсированы одновременно изменением длины G_c и угла падения α_c . Компрессор имеет двухпроходную двухрешеточную конфигурацию. Число штрихов решетки, угол падения и расстояние G_c решеточной пары выбираются равными 1740 пар лин./мм, 55° и 0.8909 м соответственно. Как следует из данных, приведенных в табл.3, компрессор может компенсировать GVD, введенную остальными элементами, при этом небольшая часть TOD сохраняется для достижения наивысшей пиковой интенсивности при компенсации остаточной FOD.

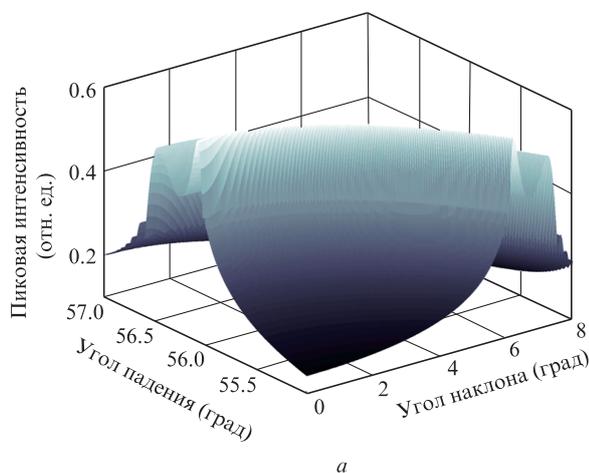
На рис.5,а представлена зависимость пиковой интенсивности импульса при компенсации GVD от угла падения α_c и угла наклона θ_c . Видно, что максимальная пиковая интенсивность может быть достигнута изменением либо угла падения, либо угла наклона. Импульс с тем же качеством компрессии может быть получен при угле наклона в компрессоре 6.26° и угле падения 55° (рис.5,б). В этом случае наличие ненулевого угла наклона в компрес-

соре помогает избежать повреждения усилителя, вызванного RRP, и компенсирует дисперсию системы. В большинстве случаев углы наклона для подавления RRP и компенсации дисперсии различны. В рассматриваемой мультипетаваттной установке апертура пучка составляет 250 мм, а путь пучка от оконечного усилителя к компрессору – около 10 м. Это означает, что для компенсации дисперсии и подавления RRP требуются углы наклона 1.5° и 6.26° соответственно, но при $\theta_c = 6.26^\circ$ удовлетворяются оба эти требования. Если угол наклона 6.26° является слишком большим (рис.5,а), соответствующая ему высокая пиковая интенсивность может быть достигнута увеличением угла падения и уменьшением угла наклона.

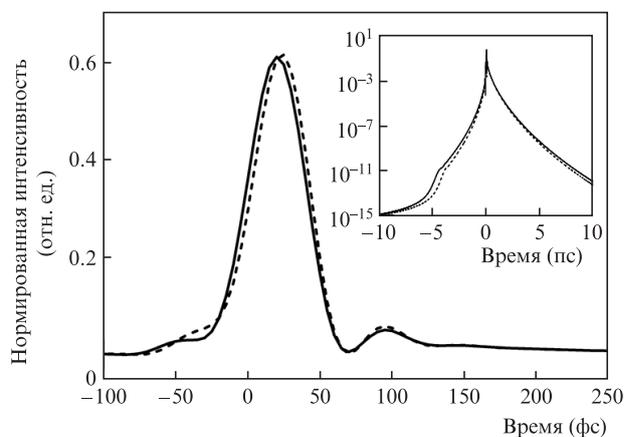
Следует отметить, что в рассматриваемой конфигурации увеличение угла падения не приводит к перекрытию падающего пучка второй решеткой. В случае, когда подавление RRP возможно только при очень большом угле наклона (например, как в предыдущем разделе), проблема компенсации дисперсии может быть решена путем введения отрезка волокна оптимизированной длины между решеткой стретчера и усилителем.

4. Заключение

Наличие RRP является ключевой проблемой, определяющей возможность применения OIGST в лазерных CPA-системах сверхкоротких импульсов при сверхвысокой, вплоть до нескольких петаватт, мощности. Внесение слабого наклона падающего пучка в компрессоре к штри-



а



б

Рис.5. Нормированная пиковая интенсивность импульса при компенсации GVD в зависимости от угла падения и угла наклона (а) и зависимость нормированной интенсивности импульса от времени при $\theta_c = 6.26^\circ$, $\alpha_c = 55^\circ$ (сплошная кривая) и $\theta_c = 0$, $\alpha_c = 56.07^\circ$ (штриховая кривая) (б). На вставке те же зависимости в более широком временном окне.

хам решетки позволяет исключить попадание RRP в усилитель, однако это приводит к появлению дисперсии и искажает временной профиль сжатого импульса. Нами описан простой способ компенсации TOD для работающей в нашем институте пикосекундной петаваттной лазерной установки на неодимовом стекле. А именно, компенсация достигается введением между стретчером и цепочкой усилителей кварцевого волокна с оптимизированной длиной при незначительном увеличении расстояния между парой решеток компрессора. Результаты моделирования показывают, что пиковая интенсивность, длительность импульса и временной контраст могут быть сохранены по сравнению со случаем, когда угол наклона равен нулю.

Для компенсации материальной дисперсии в создаваемой фемтосекундной мультипетаваттной лазерной установке на Ti:сапфировом кристалле могут быть одновременно изменены угол наклона и угол падения излучения на решетки компрессора. При этом не только решается проблема RRP, но и увеличивается пиковая интенсивность и уменьшается длительность выходного импульса.

Отметим, что наше моделирование учитывает FOD, но в настоящей статье компенсация этого порядка дисперсии не рассматривается. Такое рассмотрение необходимо для лазеров с длительностью импульса менее 30 фс, в которых необходимо обеспечить компенсацию и FOD.

Настоящая работа была поддержана Национальным фондом естественных наук Китая в рамках проекта 11304296.

1. Яковлев И.В. *Квантовая электроника*, **44**, 393 (2014).
2. Chu Y.-X., Liang X.-Y., Yu L.-H., Xu Y., Xu L., Ma L., Lu X.-M., Liu Y.-Q., Leng Y.-X., et al. *Opt. Express*, **21**, 29231 (2013).
3. Poole P., Trendafilov S., Shvets G., Smith D., Chowdhury E. *Opt. Express*, **21**, 26341 (2013).
4. Li Z.-Y., Xu G., Wang T., Dai Y.-P. *Opt. Lett.*, **35**, 2206 (2010).
5. Hein J. Patent DE 10 2008 057 593 A1 (2010).
6. Kessler T.J., Bunkenburg J., Huang H., Kozlov A., Meyerhofer D.D. *Opt. Lett.*, **29**, 635 (2004).
7. Cotel A., Castaing M., Pichon P., Le Blanc C. *Opt. Express*, **15**, 2742 (2007).
8. Li Z.-Y., Wang T., Xu G., Li D.-W., Yu J.-W., Ma W.-X., Zhu J., Chen L., Dai Y.-P. *Appl. Opt.*, **52**, 718 (2013).
9. Li Z.-Y., Wang T., Xu G., Ouyang X.-P., Li D.-W., Wei H., Yu J.-W., Chen L., Dai Y.-P. *J. Mod. Opt.*, **61**, 495 (2014).
10. González Inchauspe C.M., Martínez O.E. *Opt. Lett.*, **22**, 1186 (1997).
11. Treacy E.B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **5**, 454 (1969).
12. Martinez O.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 59 (1987).
13. Cheriaux G., Rousseau P., Salin F., Chambaret J.P., Walker B., Dimauro L.F. *Opt. Lett.*, **21**, 414 (1996).
14. Xu G., Wang T., Li Z.-Y., Dai Y.-P., Lin Z.-Q., Gu Y., Zhu J.-Q. *Rev. Laser Eng.*, **2008**, 1172 (2008).
15. Kane S., Squier J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **14**, 1237 (1997).
16. Zaouter Y., Papadopoulos D.N., Hanna M., Druon F., Cormier E., Georges P. *Opt. Express*, **15**, 9372 (2007).