

ФОРМИРОВАНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯМУЮ ИЗ ИЗЛУЧЕНИЯ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА НАКАЧКИ ПУТЕМ ГЕНЕРАЦИИ СУПЕРКОНТИНУУМА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

К. А. Глушков, И. Б. Мухин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Аннотация

В работе представлены результаты исследований по созданию лазерной системы, генерирующей фемтоимпульсы длительностью в несколько осцилляций поля с центральной длиной волны 910 нм их последующим параметрическим усилением. Разработка нового дизайна фемтосекундного лазера, основанного на генерации белого света и параметрическом преобразовании суб-пс импульсов иттербиевого лазера, позволяет получать оптически синхронизованные фемтосекундные импульсы с излучением лазера накачки. Оригинальный подход позволяет использовать разработанную конструкцию в качестве стартовой части параметрической лазерной системы с высокой пиковой мощностью.

Введение

Генерация более коротких импульсов света, предельная концентрация световой энергии во времени, а также применение сверхкоротких лазерных импульсов для воздействия на вещество – одно из магистральных направлений развития лазерной физики и техники. В течение многих лет титан-сапфир (Ti:sapphire) был уникальной лазерной средой для сверхбыстрых систем. В последнее время кристаллы, легированные иттербием (Yb), и особенно волокна, используются в фемтосекундных усилителях с совершенно разными эксплуатационными характеристиками с точки зрения энергии импульса и средней мощности. Применение иттербиевого лазера позволяет достичь прогресса в выходных спецификациях, таких как средняя мощность излучения, к тому же он обладает компактными размерами, низкой стоимостью, надежностью и хорошим качеством луча [1]. Таким образом, иттербиевый лазер открывает альтернативный путь для развития сверхбыстрых процессов.

При усилении фс импульсов одним из самых эффективных подходов является оптическое параметрическое усиление чирпированных импульсов (ОРСПА) [2]. Высокая устойчивость к оптическим повреждениям, отсутствие накопления энергии в усилительном материале и низкое паразитное поглощение в нелинейных кристаллах позволили масштабировать малоцикловые ОРСПА до пиковой мощности в десятки ТВт в компактных установках [3]. Одним из важных подходов стабильной работы фемтосекундного усилителя на основе ОРСПА является оптическая синхронизация [4] усиливаемого импульса и импульса накачки, поскольку параметрическое усиление происходит без накопления энергии и импульсы должны быть совмещены во времени.

Как правило, в качестве источника излучения подавляющего большинства лазерных систем на основе ОРСПА используется титан-сапфировый фемтосекундный задающий генератор, сигнал которого далее параметрически усиливается. Для накачки используют 2-ю гармонику лазерных импульсов иттербиевых или неодимовых лазеров. Для организации оптической синхронизации необходимо либо значительно сдвигать спектр генерации титан-сапфирового в длинноволновую область, либо прибегать к нелинейным методам уширения спектра, что негативно сказывается на основных характеристиках всей лазерной системы.

В данной работе исследуется подход генерации фемтосекундных импульсов напрямую из излучения суб-пс лазера накачки, что автоматически обеспечивает хорошую оптическую синхрониза-

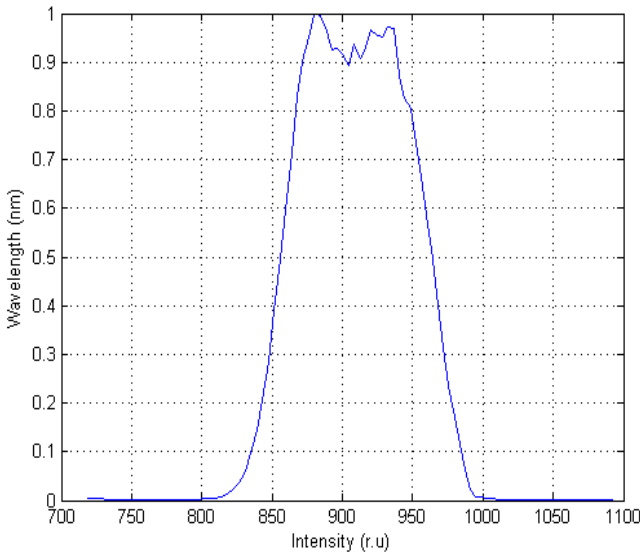


Рис. 2. Спектр излучения

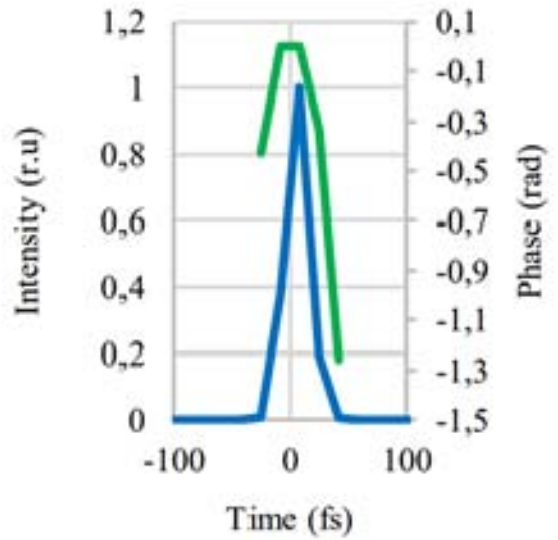


Рис. 3. Временные зависимости интенсивности и фазы

Для компрессии этого фс сигнала до спектрально ограниченной длительности использовались chirпирующих зеркал. Длительность импульса на выходе измерена методами FROG и SPIDER и составила 21 фс (рис. 3). Стоит отметить что в узле генерации излучения разностной частоты используется коллинеарное взаимодействие в двух тонких кристаллах ВВО. Такой подход позволяет сформировать широкополосное излучение, благодаря небольшой расстройке синхронизма, и избежать возникновения углового chirпа.

Моделирование (N) ОРА и расчет мДж каскада усиления

Для генерации перестраиваемых по длине волны ИК-импульсов высокой интенсивности основным подходом является оптическое параметрическое усиление (ОРА) [6]. Для эффективного процесса усиления необходимо обеспечить хорошее фазовое согласование,

$$\vec{\Delta k} = \vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_i \quad (1)$$

$$\vec{\Delta k} = \vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_i \quad (2)$$

где

$$k(\omega) = \frac{n(\omega) \cdot \omega}{c} \quad (3)$$

соответствует линейному импульсу фотона в нелинейной среде; n – показатель преломления, ω – угловая частота фотона, c – скорость света и где p , s и i относятся к накачке, сигналу и лучу холостого хода соответственно. Эта схема усиления открыла путь к источникам ИК-лазеров высокой пиковой мощности. Несмотря на это, при рассмотрении широкополосных спектров, поддерживающих импульсы с несколькими циклами, схема страдает от проблем сужения усиления, поскольку трудно соответствовать условию согласования фаз на широкой спектральной полосе пропускания. Групповое несоответствие скоростей (GVM) также должно быть принято во внимание, так как скорости различных импульсов (p , s , i), распространяющихся через нелинейную среду, зависят от показателя преломления, что приводит к потере временного перекрытия. Импульсы должны быть растянуты по времени, а затем усилены с помощью излучения накачки аналогичной продолжительности. Таким образом, планируется построить следующий каскад усиления, изначально растянув сигнал до нужной длительности.

На этом этапе работы была численно оценена производительность нелинейных кристаллов DKDP и BBO в качестве сред усиления в неколлинеарной пучковой конфигурации ОРСПА (рис. 4).

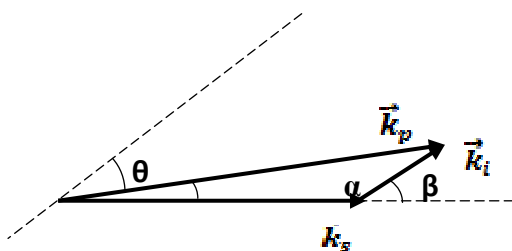


Рис. 4. Конфигурация волновых векторов NOPA

В предположении несоответствия волнового вектора второго порядка ($\Delta k^{\uparrow}((2)) \neq 0$) (были рассчитаны углы для двух сред.

Характеристики NOPA при I типе синхронизма в нелинейных кристаллах

Nonlinear crystal	θ , deg	α , deg	β , deg
DKDP	36,61	0,85	2,03
BBO	23,9	2,26	5,32

Процесс параметрического усиления описывается системой уравнений для трех связанных амплитуд

$$\begin{cases} \frac{dA_s}{dz} = -i\sigma_s \cdot A_i^* \cdot A_p \cdot e^{-i\Delta k \cdot z} \\ \frac{dA_i}{dz} = -i\sigma_i \cdot A_s^* \cdot A_p \cdot e^{-i\Delta k \cdot z} \\ \frac{dA_p}{dz} = -i\sigma_p \cdot A_s \cdot A_i \cdot e^{i\Delta k \cdot z} \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\sigma_j = \frac{4 \cdot \pi \cdot \omega_j \cdot d_{eff}}{n_j \cdot c} \quad (5)$$

d_{eff} – эффективная нелинейная восприимчивость. Согласно [7] для кристалла DKDP при первом типе синхронизма $d_{eff} = \frac{0,22 \text{ пм}}{B}$; для BBO – $d_{eff} = \frac{0,22 \text{ пм}}{B}$. В приближении гауссового импульса смоделировали процесс усиления при энергии накачки 140 мДж и энергии сигнала 4 мк Дж. На выходе получили зависимость энергии в импульсе сигнала для двух нелинейных сред (рис. 5).

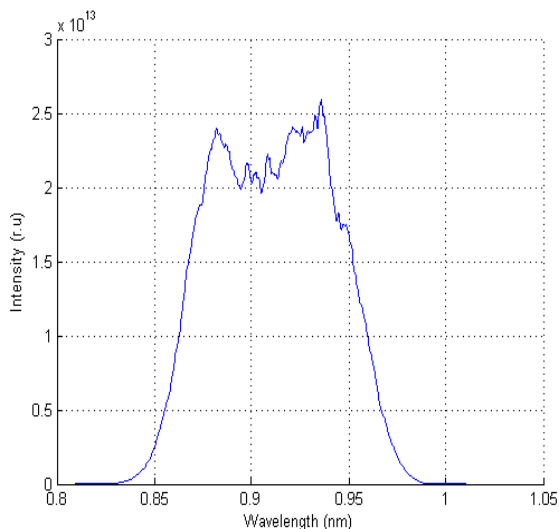
Параметрическое усиление позволяет обеспечить высокий контраст рабочего импульса, поскольку они обладают очень малым собственным уровнем шума.

Заключение

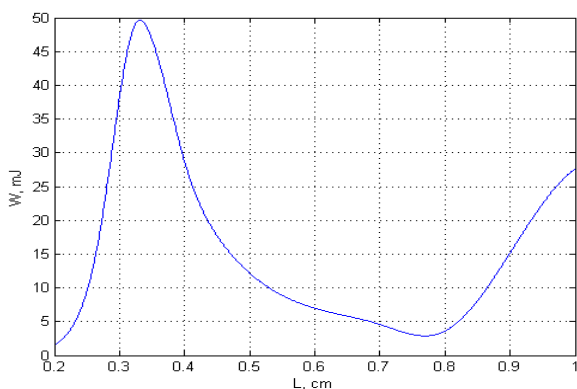
В данной работе представлена разработка нового дизайна фемтосекундного лазера основанного на генерации белого света и параметрическом преобразовании суб-пс импульсов лазера, легированного иттербием.

Суб-пс импульсы суб-м Дж энергии иттербиевого лазера частично преобразуются во 2-ю гармонику и используются для генерации излучения суперконтинуума. Далее, это широкополосное излучение параметрически усиливается, и для усиления используется излучение 2-й гармоники.

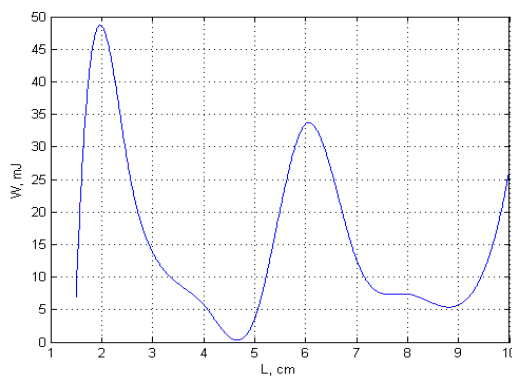
В результате, генерируется «холостое» излучение на разностной длине волны (~1,8 мкм), обладающее свойством стабилизации фазы э/м поля относительно огибающей(СЕР) [8]. Это излучение преобразуется во 2-ю гармонику и усиливается оставшимся излучением



а



б



в

Рис. 5. а – спектр сигнала на выходе из планируемого каскада усиления с кристаллом ВВО; б – зависимость энергии сигнала от длины кристалла ВВО; в – зависимость энергии сигнала от длины кристалла DKDP

2-й гармоники исходного излучения. Это сгенерированное широкополосное излучение может быть компрессировано до спектрально ограниченной длительности.

В лазерной системе удалось получить излучение длительностью 21 фс с энергией более 10 мкДж. Разработанная установка будет использоваться в качестве стартовой для ПВт лазерного комплекса PEARL. На основе полученных результатов планируется реализация следующего каскада усиления.

Работа выполнена при поддержке Государственного научного задания Институт прикладной физики, Российской академии наук (№ проекта 0030-2021-0029).

Список литературы

1. Henrich J., Butcher S., Arrigoni M., in LASERS & SOURCES, Feb. 18, 2020
2. Budriūnas R., Stanislauskas T., Varanavičius A. Passively CEP-stabilized frontend for few cycle terawatt OPCPA system // Journal of Optics vol. 17, 2015. P. 1–6.

3. Fuest H. High repetition rate, phase-stable, infrared OPCPA for strong-field experiments // München 2017. PP 136.
4. Danilevičius R., Zaukevičius A., budriūnas R., Michailovas A., Rusteika N. Femtosecond wavelength-tunable opcpa system based on picosecond fiber laser seed and picosecond DPSS laser pump // Optics Express vol. 24, 2016. P. 21–30.
5. Alismail A., Wang H., Altwaijry N. and Fattahi H., in Applied Optics vol. 56: OSA, 2017, pp. 4990-4994.
6. Ахманов С., Ковригин А., Пискарскас А., Фадеев В., Хохлов Р., «Наблюдение параметрического усиления в оптическом диапазоне», Джетп. Летт. 2, 191 (1965).
7. Dabu R., in Optics Express vol. 18, 2010, pp 11689–11699.
8. Baltuška A., Fuji T. Kobayashi T. Controlling the Carrier-Envelope Phase of Ultrashort Light Pulses with Optical Parametric Amplifiers // Physical Review Letters vol. 88, 2002.