

УДК 535.329

УШИРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТУРА ИЗЛУЧЕНИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ГЕНЕРАЦИИ

© 2020 г. С. В. Алексеев¹, *, Н. Г. Иванов¹, В. Ф. Лосев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

*E-mail: sergey100@sibmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Исследовано уширение спектра излучения второй гармоники в процессе ее генерации в нелинейном кристалле. Уширение спектра обеспечивалось в одном или двух нелинейных кристаллах КДП, расстроенных по углу синхронизма, или при использовании chirпированных импульсов излучения накачки. Показано, что возможно двукратное увеличение ширины спектра второй гармоники.

DOI: 10.31857/S0367676520070042

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все мультитераваттные и петаваттные лазерные системы имеют фемтосекундную длительность импульса и работают на кристаллах Ti:Sa (усиление chirпированных импульсов) или (Д)КДП (оптическое параметрическое усиление chirпированных импульсов). Длина волны излучения таких лазеров находится в инфракрасной (ИК) области спектра (0.8–1 мкм). Однако для многих приложений требуются мощные лазерные пучки в видимой или ультрафиолетовой (УФ) области спектра, которые позволяют существенно повысить эффективность взаимодействия лазерного излучения с веществом и обеспечить получение совершенно новых физических явлений [1, 2]. Продвижение в видимую область спектра возможно за счет генерации второй гармоники (ВГ) в процессе преобразования ИК излучения. Однако такое преобразование для сверхмощных пучков ограничено технологическими трудностями изготовления тонких (менее 1 мм толщиной) нелинейных кристаллов достаточно большого диаметра (20 см и более). Кроме того, при этом преобразованное излучение ВГ с фемтосекундной длительностью импульса имеет очень низкое качество излучения из-за фазовой самомодуляции, кроссмодуляции, керровской самофокусировки и глубокой модуляции спектра второй гармоники в нелинейном кристалле [3–5]. Существует другой метод получения лазерного излучения с более короткой длиной волны, который не требует преобразования спектра излучения при высокой мощности излучения. В этом методе генерация ВГ происходит при низкой интенсивности основной частоты, а наращивание энергии происходит в мощном выходном усилите-

ле. Данный метод был предложен в работе [6] и реализован в гибридной лазерной системе THL-100, состоящей из Ti:Sa фемтосекундного комплекса и газового усилителя на молекулах XeF(C-A) [7–10]. К настоящему времени на этой системе получена мощность 14 ТВт ($\lambda = 475$ нм, длительность импульса 50 фс) и существует перспектива ее повышения вплоть до 100 ТВт.

Один из путей повышения мощности лазерной системы THL-100 заключается в сокращении длительности выходного импульса излучения газового усилителя на молекулах XeF(C-A) при сохранении его энергии. Для этого, требуется увеличить спектральную ширину импульса излучения ВГ, а активная среда на молекулах XeF(C-A) имеет широкий контур усиления и теоретически позволяет усиливать импульс излучения с длительностью до 10 фс [11]. Поскольку Ti:Sa фемтосекундный комплекс работает на краю контура усиления (950 нм), то он не позволяет сформировать импульс ВГ короче 50 фс (ширина спектра 5–6 нм). Для сокращения спектрально ограниченной длительности импульса излучения ВГ требуется увеличить ширину ее спектрального контура другим методом.

Известен метод уширения спектра фемтосекундного импульса излучения ВГ непосредственно в самом нелинейном кристалле. Так в работе [4] при высоких интенсивностях на КДП ($2\text{--}3$ ТВт · см⁻²) теоретически показана возможность уширения спектра и уменьшения длительности импульса второй гармоники с 70 до 20 фс. В работе [12] демонстрируется уширение спектра ВГ почти в два раза непосредственно при ее генерации в двух нелинейных кристаллах ВВО для более низких интенсивностей накачки (50 ГВт · см⁻²). При этом

импульсу излучения основной гармоники (800 нм) с спектрально ограниченной длительностью 49 фс придавался положительный чирп в выходном компрессоре лазерной системы, так что в кристаллах ВВО преобразовывался импульс с длительностью 600 фс. После сжатия уширенного импульса излучения второй гармоники (400 нм) в компрессоре с отрицательной дисперсией групповых скоростей его длительность уменьшилась до 29 фс (коэффициент сжатия ~ 1.7).

Целью настоящей работы являлось изучение возможности уширения спектра излучения ВГ на центральной длине волны 475 нм в нелинейном кристалле КДП для последующего сокращения длительности спектрально ограниченного импульса излучения.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментального исследования уширения спектра при генерации ВГ использовался фемтосекундный Ti:sapphire стартовый комплекс, который является задающим генератором для мультитераваттной лазерной системы THL-100. Стартовый комплекс состоит из задающего генератора, стретчера, регенеративного и двух многопроходных усилителей, компрессора на дифракционных решетках и генератора ВГ на основе нелинейного кристалла КДП.

Для уширения спектра излучения ВГ использовались различные оптические схемы. В первом случае для накачки нелинейного кристалла использовалось излучение первой гармоники (950 нм) после компрессора. При этом преобразовывался либо спектрально ограниченный импульс излучения с длительностью 70 фс в одном или двух нелинейных кристаллах КДП толщиной 1.8 и 2 мм, расстроенных по углу синхронизма, либо преобразовывался положительно или отрицательно чирпированный импульс излучения накачки. Чирпирование импульса осуществлялось в компрессоре путем изменения расстояния между решетками. При уменьшении расстояния между решетками относительно положения для спектрально ограниченного импульса выходной импульс приобретал положительный чирп, а при увеличении – отрицательный. При этом импульс мог удлиняться с 70 до 700 фс. В этих экспериментах после компрессора Гауссов пучок основной частоты имел диаметр 16 мм по уровню $1/e^2$. Перед КДП пучок сжимался зеркальным телескопом в два раза.

Во втором случае излучение основной частоты преобразовывалось во вторую гармонику после второго усилителя до компрессора. При этом излучение накачки имело положительный чирп, длительность импульса была 100 пс на полувысоте амплитуды и энергия 30 мДж, диаметр пучка был 4 мм (по уровню $1/e^2$) [13]. Уширение спектра

Таблица 1. Эффективность преобразования ИК излучения длительностью импульса 700 фс во вторую гармонику

$E_{ИК}$, мДж	10	13	17	21	26	30
$E_{ВГ}$, мДж	0.93	1.9	3	4.7	6.1	8.3
η , %	9.3	14.6	17.6	22.4	23.5	27.7

осуществлялось в двух нелинейных кристаллах КДП толщиной 1.8 и 2 мм, расстроенных по углу синхронизма.

Для первой оптической схемы получение спектрально ограниченной длительности импульса излучения ВГ осуществлялось либо в призменной паре, при положительно чирпированном импульсе излучения, либо в блоке стекла К8, при отрицательно чирпированном импульсе.

Для измерения энергии лазерного излучения использовались измерители Gentec и OPHIR. Спектры излучения измерялись с помощью спектрометров ASP150C (Авеста-проект) и Ocean Optics HR4000 (200–1100, 0.7 нм). Длительность импульса излучения ВГ измерялась с помощью одноимпульсного автокоррелятора ASF-20 (Авеста-проект) в приближении sech^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные исследования проводились по первой оптической схеме, когда использовалось излучение первой гармоники после компрессора. При этом были подробно исследованы условия преобразования чирпированного импульса излучения первой гармоники для различных длительностей импульсов с положительным и отрицательным чирпом. При чирпировании импульса излучения происходит увеличение его длительности, а с ростом длительности импульса уменьшается эффективность преобразования излучения накачки во вторую гармонику. В таблице 1 приведены значения энергии ВГ ($E_{ВГ}$) и эффективности (η) для различной энергии накачки ($E_{ИК}$) при длительности импульса излучения 700 фс (отрицательная дисперсия групповых скоростей -40000 фс²). Видно, что эффективность может изменяться от 10 до 27.7%.

Исследование влияния величины и знака чирпа излучения накачки на спектральный состав ВГ показало, что наиболее стабильный ее спектральный контур реализуется при небольшом положительном чирпировании. При величине положительной избыточной дисперсии 4000 фс² полуширина спектрального контура ВГ увеличилась, по сравнению с исходной, более чем в два раза – с 5.2 (рис. 1, кривая 1) до 11 нм. При дальнейшем увеличении избыточной положительной дисперсии в компрессоре начинала возникать модуляция интенсивности на спектральном контуре ВГ. В

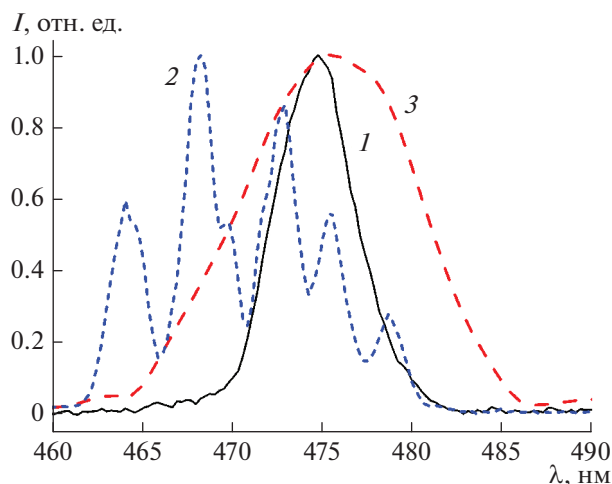


Рис. 1. Спектры импульсов излучения ВГ: 1 – спектрально-ограниченный импульс, 2 – отрицательно-чирпированный импульс, 3 – импульс, полученный при изменении угла синхронизма.

эксперименте длительность исходного импульса излучения ВГ была 66 фс, а чирпированного импульса – 102 фс. Для компрессии этого импульса использовалась призмная пара с расстоянием между призмами 0.9 метра. Длительность импульса при этом уменьшилась до 35 фс.

При создании избыточной отрицательной дисперсии в компрессоре наблюдалась модуляция интенсивности на спектральном контуре ВГ практически во всем диапазоне ее изменения от 0 до 40000 фс². Характерно, что в большинстве случаев уширение спектра происходит в коротковолновую область спектра, а состав спектра сильно изменяется в зависимости от величины чирпа. Модуляция интенсивности на спектральном контуре ВГ приводила и к фазовой модуляции (рис. 1, кривая 2). В связи с этим и длительность импульса является нестабильной и часто наблюдается несколько пиков с короткой длительностью. На рис. 2 приведены примеры полученных импульсов с длительностью в области 25–30 фс.

Уширение спектрального контура излучения ВГ при накачке нелинейного кристалла чирпированным импульсом излучения основной гармоники и последующее сокращение длительности импульса при его компрессии можно объяснить, если воспользоваться выражением (1), приведенным в работе [12]:

$$\frac{\Delta\nu_{2\omega}}{\Delta\nu_{\omega}} = \sqrt{4 - 3\left(\frac{\tau}{\tau_{ch}}\right)^2}, \quad (1)$$

где $\Delta\nu_{\omega}$ – ширина спектра основной частоты, $\Delta\nu_{2\omega}$ – ширина спектра второй гармоники, τ – длительность спектрально ограниченного импульса основной частоты, τ_{ch} – длительность чирпированного импульса на основной частоте. При этом извест-

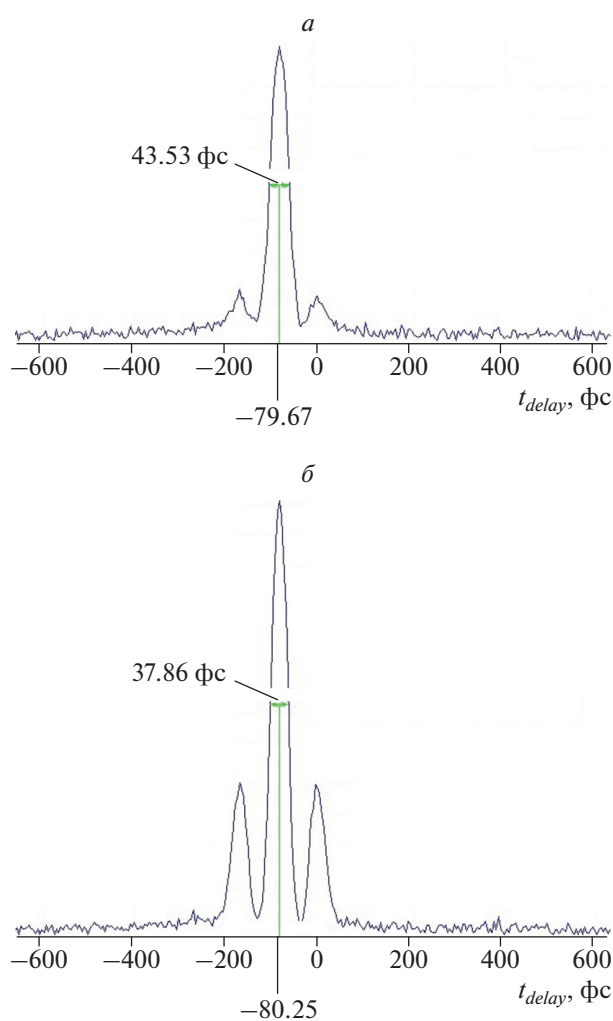


Рис. 2. Автокорреляционная функция импульсов излучения ВГ в экспериментах при отрицательном чирпировании основной частоты: 30.8 ± 182.3 фс (а), 26.8 ± 173.8 фс (б).

но, что длительность спектрально ограниченного импульса ВГ является обратно пропорциональной ширине ее спектра.

Исследование уширения спектра спектрально ограниченного импульса излучения в зависимости от расстройки угла синхронизма кристалла (толщина КДП 1.8 мм) показало, что ширина спектра может быть увеличена практически в два раза (рис. 1, кривая 3), с 5.2 до 11.5 нм. При этом простым наклоном кристалла можно регулировать спектральный состав, добавляя коротковолновые или длинноволновые компоненты спектра. Использование двух кристаллов еще больше облегчает управление спектральным контуром ВГ, и позволяет так же увеличивать его ширину в два раза.

И наконец, исследование возможности уширения спектра ВГ при накачке положительно чирпированным импульсом излучения первой гармоники большой длительности (100 пс) пока-

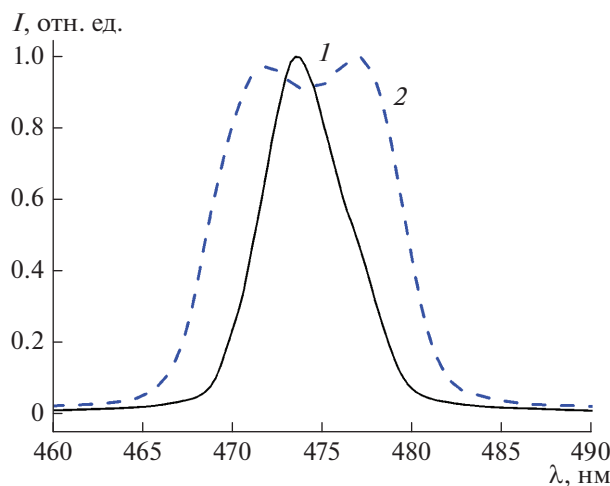


Рис. 3. Спектры исходного (1) и уширенного (2) импульсов излучения ВГ, полученных в двух кристаллах КДП при длительности импульса основной частоты 100 пс.

зало, что использование двух кристаллов КДП, расстроенных по углу синхронизма, также позволяет увеличить ширину спектрального контура ВГ практически в 2 раза (рис. 3), с 5.7 до 11.2 нм. При этом один кристалл настраивается на коротковолновую часть спектра, а другой – на длинноволновую. При уширении спектра энергия ВГ снижается примерно в 2 раза. Максимальная полученная энергия ВГ равнялась 2 мДж. Отметим, что в этом случае при максимальной энергии ВГ спектральный состав ($\Delta\nu_{2\omega}$) не уширяется и практически повторяет спектр пучка накачки ($\Delta\nu_{\omega}$).

В дальнейшем планируется продолжить исследования по компрессии импульса излучения ВГ для случаев уширения спектра за счет рассогласования угла синхронизма в одном и двух кристаллах, как для спектрально ограниченного импульса накачки, так и положительно chirпированного при длительности 100 пс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведены исследования возможности уширения спектрального контура излучения второй гармоники на длине волны 475 нм в нелинейном кристалле. Изучалась возможность уширения спектра при накачке кристалла КДП как спектрально ограниченным импульсом излучения (70 фс), так и chirпированным импульсом за счет положительной или отрицательной дисперсии групповых скоростей. Показывается, что обеспечение в компрессоре фемтосекундного комплекса небольшой избыточной дисперсии групповых скоростей (± 3000 – 4000 фс²) для излучения основной частоты ($\lambda = 950$ нм) позволяет увеличи-

вать ширину спектра излучения второй гармоники до двух раз. Использование одного или двух нелинейных кристаллов, расстроенных по углу синхронизма, также позволяет уширить спектральный контур ВГ в два раза. Причем это реализуется как для спектрально ограниченного импульса накачки, так и для положительно chirпированного импульса с большой (100 пс) длительностью. Компрессия импульса излучения ВГ с уширенным спектром позволяет сокращать ее длительность примерно пропорционально величине уширения спектра.

Исследования при накачке нелинейного кристалла излучением, выведенным после компрессора, выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-48-700016 р-сибирь, № 18-08-00383 и № 18-08-00407, а при накачке импульсом с длительностью 100 пс – при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 18-19-00009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ozaki T., Kieffer J.-C., Toth R., Fourmax S. // Laser Part. Beams. 2006. V. 24. № 1. P. 101.
2. Avitzour Y., Suckewer S. // JOSA B. 2017. V. 24. № 4. P. 819.
3. Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Миронов С.Ю. и др. // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 6. С. 503; Ginzburg V.N., Lozhkarev V.V., Mironov S.Yu. et al. // Quant. Electron. 2010. V. 40. № 6. P. 503.
4. Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В. и др. // Квант. электрон. 2011. Т. 41. № 11. С. 963; Mironov S. Yu., Ginzburg V.N., Lozhkarev V.V. et al. // Quant. Electron. 2011. V. 41. № 11. P. 963.
5. Horlein R., Dromey B., Adams D. et al. // New J. Phys. 2008. V. 10. Art. № 083002.
6. Mikheev L.D. // Laser Part. Beams. 1992. V. 10. № 3. P. 473.
7. Alekseev S.V., Aristov A.I., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M. // Laser Part. Beams. 2013. V. 31. № 1. P. 17.
8. Алексеев С.В., Аристов А.И., Грудцын Я.В. и др. // Квант. электрон. 2013. Т. 43. № 3. С. 190; Alekseev S.V., Aristov A.I., Grudtsyn Ya.V. et al. // Quant. Electron. 2013. V. 43. № 3. P. 190.
9. Алексеев С.В., Иванов Н.Г., Иванов М.В. и др. // Квант. электрон. 2017. Т. 47. № 3. С. 184; Alekseev S.V., Ivanov N.G., Ivanov M.V. et al. // Quant. Electron. 2017. V. 47. № 3. P. 184.
10. Ястремский А.Г., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. // Квант. электрон. 2018. Т. 48. № 3. С. 206; Yastremskii A.G., Ivanov N.G., Losev V.F. // Quant. Electron. 2018. V. 48. № 3. P. 206.
11. Михеев Л.Д. // Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 12. С. 1122; Mikheev L.D. // Quant. Electron. 2002. V. 32. № 12. P. 1122.
12. Didenko N.V., Konyashchenko A.V., Losev L.L. et al. // Opt. Commun. 2009. V. 282. № 5. P. 997.
13. Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. // Изв. вузов. Физ. 2018. Т. 61. № 11(731). С. 76; Ivanov N.G., Losev V.F. // Russ. Phys. J. 2019. V. 61. № 11. P. 2028.