

УДК 535.329

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В УСЛОВИЯХ СЛАБОЧИРПИРОВАННОГО ИМПУЛЬСА

© 2019 г. С. В. Алексеев¹, *, М. В. Иванов¹, 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 03.09.2018 г.

После доработки 10.09.2018 г.

Принята к публикации 22.10.2018 г.

Приведены результаты исследования параметров излучения второй гармоники в условиях преобразования положительно и отрицательно chirпированного импульса основной частоты. Показано, что при увеличении длительности спектрально ограниченного импульса (50 фс) до 630 фс и более распределение интенсивности излучения второй гармоники становится близким к гауссовому. Эффективность генерации второй гармоники с ростом длительности до 2.5 пс снижается с 38.69 до 4%, при этом качество второй гармоники улучшается и становится $M^2 = 1.3$. При отрицательном chirпировании основной частоты наблюдается существенная амплитудная модуляция и сужение спектра второй гармоники.

DOI: 10.1134/S0367676519030037

ВВЕДЕНИЕ

Генерация второй гармоники является практически единственным методом получения мощных импульсов излучения в видимой области спектра. Для этого обычно используют хорошо отработанные мощные лазерные системы инфракрасного диапазона спектра с короткой длительностью импульса (10^{-13} – 10^{-8}) с. При этом, если для наносекундных импульсов можно достаточно легко получить вторую гармонику с гауссовым распределением интенсивности, то при более коротких импульсах (~100 фс) однородность интенсивности нарушается за счет керровской нелинейности, возникающей в нелинейном кристалле, и пучок второй гармоники становится существенно неоднородным [1–4]. Такой пучок уже нельзя транспортировать в воздухе на большие расстояния и тем более использовать для дальнейшего усиления. Как раз для этого и требуется пучок второй гармоники в фемтосекундной лазерной системе THL-100, работающей в видимой области спектра (475 нм) [5–16]. В ней спектрально ограниченный лазерный импульс излучения основной частоты Ti:sapphire стартового комплекса преобразуется во вторую гармонику, затем растягивается в призмной паре с отрицательной дисперсией групповых скоростей (отрицательный chirп) до 1–2 пс и усиливается в газовом усилителе на молекулах XeF(C-A).

Цель настоящей работы – поиск условий генерации второй гармоники на центральной длине волны 475 нм с гауссовым распределением интенсивности. Для этого планируется снизить интенсивность на нелинейном кристалле до той величины, при которой существенно снижается керровская нелинейность. При этом желательно, чтобы энергия преобразованного импульса излучения оставалась достаточной для дальнейшего усиления в газовом усилителе (1–3 мДж). Поэтому уменьшение интенсивности на кристалле планируется осуществлять небольшим увеличением длительности импульса основной частоты за счет положительного или отрицательного chirпа.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили на фемтосекундном Ti:sapphire лазерном комплексе, который состоит из задающего генератора, стретчера, регенеративного и двух многопроходных усилителей, компрессора на дифракционных решетках и генератора второй гармоники (КДП). Комплекс формирует спектрально ограниченные импульсы излучения на основной (950 нм) и второй (475 нм) гармониках с длительностью порядка 50 фс. Энергия этих импульсов может достигать 50 и 20 мДж соответственно.

В экспериментах использовали гауссов пучок основной гармоники диаметром 1.2 см по спаду

интенсивности в e^2 раз и энергией 5–22 мДж. Это соответствует интенсивности излучения на нелинейном кристалле 91–389 ГВт · см $^{-2}$. Толщина кристаллов КДП была 1.2 или 1.8 мм.

Для получения chirпированного импульса излучения основной гармоники использовали выходной компрессор на дифракционных решетках. Путем изменения расстояния между решетками можно было получать импульсы излучения длительностью от 50 до 2500 фс. Оценку длительности осуществляли по формуле (1):

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 + \left(4 \ln 2 \frac{\text{GDD}}{\tau_0^2}\right)^2}, \quad (1)$$

где τ – длительность выходного импульса, τ_0 – длительность исходного импульса, GDD – дисперсия групповой скорости.

С уменьшением расстояния между решетками относительно положения спектрально ограниченного импульса выходной импульс приобретал положительный chirп, а с увеличением – отрицательный.

Энергия излучения основной и второй гармоник измерялась с помощью измерителя энергии Gentec-e maestro. Из полученных данных рассчитывали эффективность преобразования энергии основной гармоники во вторую. Распределение интенсивности излучения регистрировалось с помощью профилометра Spiricon SP620U, при этом пучок ослаблялся двумя стеклянными клиньями и поджимался сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 3 м.

В экспериментах по измерению расходимости (определению параметра M^2) использовали метод, основанный на фокусировке и измерении диаметра пучка в перетяжке с помощью профилометра с последующим определением параметра M^2 , равного отношению измеренной расходимости к дифракционной. Диаметр пучка в перетяжке определялся с использованием профилометра Spiricon SP620U. Спектр лазерного излучения измерялся с помощью спектрометра ASP150C фирмы Avesta.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования эффективности преобразования 50 фс импульса излучения во вторую гармонику для различных интенсивностей основной гармоники и разной толщины кристалла КДП представлены на рис. 1а. Эксперименты показали, что наибольшая энергия наблюдается для кристалла толщиной 1.8 мм при интенсивности излучения первой гармоники 355 ГВт · см $^{-2}$. При этом наблюдается насыщение эффективности в области интенсивностей 250–

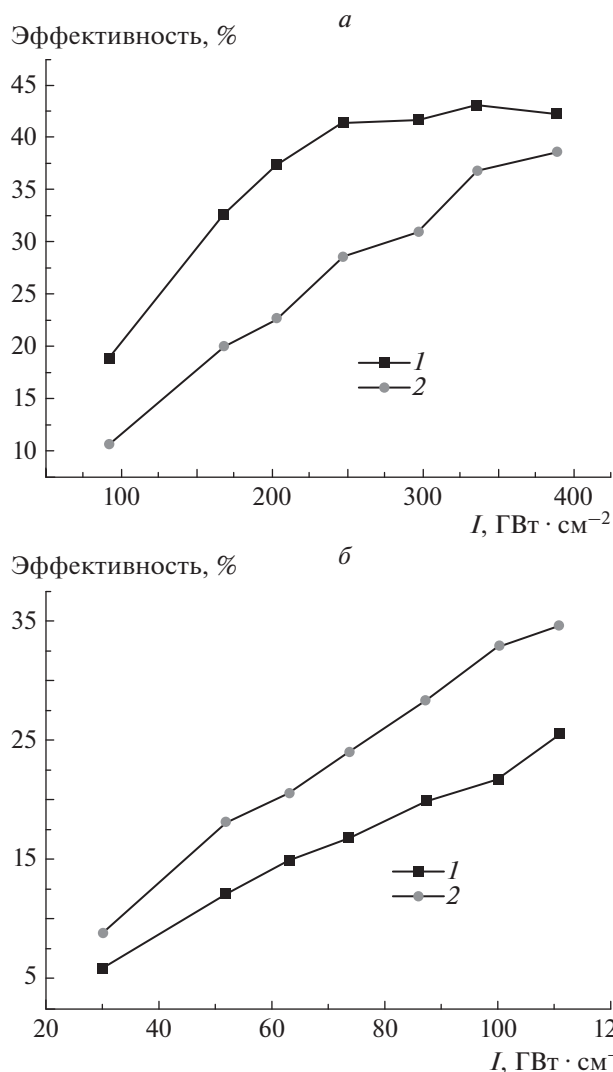


Рис. 1. Экспериментальная эффективность ГВГ: а – в КДП толщиной 1.8 (1) и 1.2 мм (2) при длительности импульса основной гармоники 50 фс; б – в КДП толщиной 1.8 при длительности импульса основной гармоники 150 фс с положительным (1) и отрицательным chirпом (2).

389 ГВт · см $^{-2}$. Для более тонкого кристалла (1.2 мм) эффективность все время возрастала с ростом интенсивности накачки от 91 до 389 ГВт · см $^{-2}$. Максимальная эффективность преобразования при этом достигала ~43%.

Для сравнения зависимости эффективности генерации второй гармоники от знака chirпа была выбрана небольшая длительность импульса. Интенсивность при этом варьировалась от 30 до 110 ГВт · см $^{-2}$. Было показано, что для 150 фс отрицательно chirпированного импульса при интенсивности 110 ГВт · см $^{-2}$ эффективность преобразования во вторую гармонику достигает 34.57% (рис. 1б). Преобразование положительно chirпи-

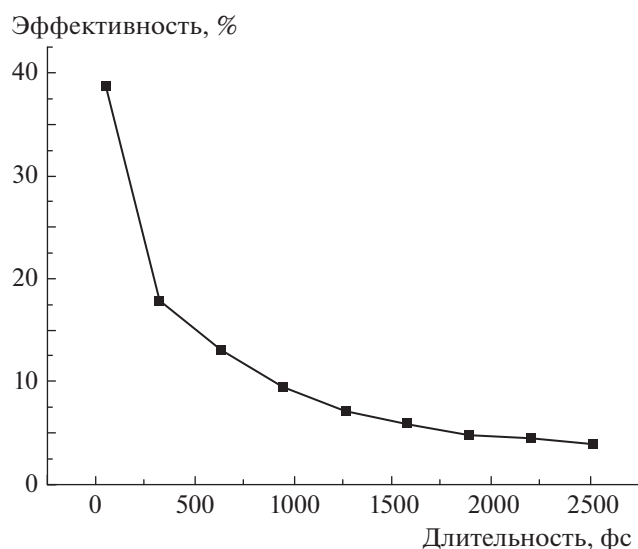


Рис. 2. Эффективность преобразования импульса излучения первой гармоники в КДП толщиной 1.8 мм в зависимости от его длительности.

рованного импульса является менее эффективным (25.53%). Скорее всего, эта разница была связана с тем, что длительность импульса с отрицательным чирпом уменьшается при прохождении по воздуху и по кристаллу КДП за счет их положительной дисперсии групповых скоростей. В итоге импульс с более короткой длительностью имеет более высокую интенсивность и преобразуется более эффективно.

Эксперименты с более длинным импульсом проводили при меньших интенсивностях, но при фиксированной энергии основной гармоники (16.8 мДж). С ростом длительности импульса излучения основной частоты эффективность преобразования уменьшалась от 38.69% до 4% (рис. 2). Однако при этом однородность излучения второй гармоники улучшалась, и при длительностях импульса более 630 фс распределение становилось близким к гауссову (рис. 3а, 3б).

Исследования расходимости лазерного пучка показали, что на основной частоте она всегда была близка к дифракционному пределу ($M^2 = 1.07$). Расходимость излучения второй гармоники улучшалась с ростом длительности импульса вплоть до 630 фс. После этого она практически не менялась и вплоть до 2.5 пс оставалась на уровне $M^2 = 1.3$.

Еще одним важным параметром при генерации второй гармоники является ее спектральный состав. Исследования показали, что спектральный состав излучения основной гармоники практически не меняется при чирпировании вплоть до 2500 фс. Однако для второй гармоники он существенно изменялся. При спектрально ограниченной длительности ее спектральный контур имел

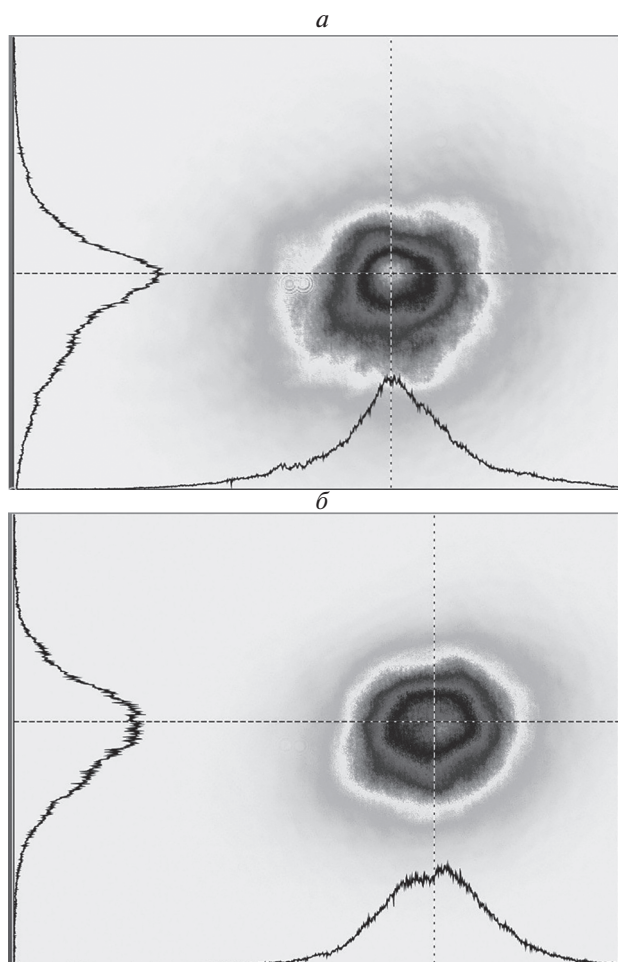


Рис. 3. Пространственное распределение интенсивности излучения второй гармоники при длительности основной гармоники 50 фс (а) и 630 фс (б).

полуширину ~ 6 нм и плавную огибающую. В случае преобразования отрицательно чирпированного импульса на спектре излучения возникали значительные амплитудные модуляции и наблюдалось его сужение по мере увеличения длительности импульса. Последнее было обусловлено деструктивной интерференцией излучения при сближении спектральных компонент чирпированного импульса к центральной частоте. В случае положительно чирпированного импульса также наблюдалась модуляция спектра, возрастающая с ростом длительности импульса, однако при этом ширина спектра практически не изменялась относительно исходной, поскольку частотные компоненты чирпированного импульса при этом разбегаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найдены условия генерации второй гармоники на центральной длине волны 475 нм с гауссо-

вым распределением интенсивности. Показано, что для этого необходимо снижать интенсивность излучения основной частоты на нелинейном кристалле до $23.5 \text{ ГВт} \cdot \text{см}^{-2}$ и менее. Уменьшение интенсивности можно обеспечивать за счет увеличения длительности спектрально ограниченного импульса основной частоты выходным компрессором, придавая ему положительный или отрицательный чирп. Увеличение длительности импульса приводит к снижению эффективности генерации второй гармоники с 38.69 до 13% и менее. Показано, что отрицательно чирпированный импульс основной частоты преобразуется более эффективней положительно чирпированного импульса.

Расходимость второй гармоники становится близкой к дифракционному пределу ($M^2 = 1.3$) после увеличения длительности импульса основной частоты более 600 фс. Спектральный состав излучения второй гармоники зависит как от знака, так и от степени чирпирования основной частоты. С ростом длительности чирпированного импульса основной частоты в спектре второй гармоники возрастает амплитудная модуляция, которая при отрицательном чирпировании приводит к сужению спектрального контура, а при положительном спектр не сужается.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00407, 18-08-00383, 16-08-00204.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Begishev I.A., Kalashnikov M., Karpov V. et al.* // J. Opt. Soc. Amer. B. 2004. V. 21. Iss. 2. P. 318.
2. *Toth R., Kiefer, Ozaki T.* // Rev. Sci. Instrum. 2005. V. 76. Art. no. 083701.
3. *Curtis A., Calvi C., Tinsley J. et al.* // Nature commun. 2018. V. 9. P. 1077.
4. *Wang Y. et al.* // Opt. Lett. 2017. V. 42. Iss. 19. P. 3828.
5. *Losev V., Alekseev S., Ivanov N. et al.* // Proc. SPIE. 2010. Art. no. 775109.
6. *Losev V., Alekseev S., Ivanov N. et al.* // Proc. SPIE. 2011. V. 7993. Art. no. 799317.
7. *Alexeev S.V., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M. et al.* // Atmospheric and Oceanic Opt. 2012. V. 25. P. 221.
8. *Losev V.F., Alekseev S.V., Aristov A.I. et al.* // Proc. SPIE. 2012. V. 8677. P. 86770Y.
9. *Alekseev S.V., Aristov A.I., Ivanov N.G. et al.* // Laser and Particle Beams. 2013. V. 31. № 01. P. 17.
10. *Alekseev S.V., Aristov A.I., Ivanov N.G. et al.* // Quantum Electron. 2012. V. 42. № 5. P. 377.
11. *Alekseev S.V., Aristov A.I., Grudtsyn Ya.V. et al.* // Quantum Electron. 2013. V. 43. № 3. P. 190.
12. *Losev V.* // Proc. of SPIE. 2017. V. 10254. Art. no. 1025412.
13. *Losev V.F., Alekseev S.V., Ivanov M.V. et al.* // Proc. SPIE. 2017. V. 10254. Art. no. 1025415.
14. *Losev V., Ivanov N., Mikheev L.* // Proc. SPIE. 2017. V. 10173. Art. no. 101731D.
15. *Alekseev S.V., Ivanov N.G., Ivanov M.V. et al.* // Quantum Electronics 2017. V. 47. № 3. P. 184.
16. *Ivanov N.G., Ivanov M.V., Losev V.F., Yastremski A.G.* // Russ. Phys. J. 2017. V. 59. Iss. 7. P. 984.