

Преобразование во вторую гармонику фемтосекундного импульса с центральной длиной волны 950 нм

С.В. Алексеев¹, Н.Г. Иванов¹, В.Ф. Лосев^{1,3}, С.Ю. Миронов^{2*}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

²Институт прикладной физики РАН

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 19.12.2015 г.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований условий генерации второй гармоники на Ti:Sapphire фемтосекундном комплексе, который включает генератор фемтосекундных импульсов, стретчер, регенеративный усилитель, два многопроходных усилителя, компрессор и генератор второй гармоники. Кроме того, изучено влияние интенсивности излучения, пространственного профиля и уровня шумовой компоненты первой гармоники на длину волны 950 нм на однородность интенсивности второй гармоники. Теоретически показано, что при отсутствии шумовой компоненты в пучке основной гармоники наблюдается хорошая однородность интенсивности во второй гармонике. Внесение амплитудных неоднородностей интенсивности в первую гармонику приводит к еще большим неоднородностям во второй гармонике. Экспериментально продемонстрировано, что уменьшение шумовой компоненты в пучке накачки за счет использования пространственного фильтра позволяет существенно подавить мелкомасштабные неоднородности во второй гармонике.

Ключевые слова: фемтосекундный лазерный импульс, генерация второй гармоники, гауссов пучок, нелинейный кристалл, однородность, интенсивность, неоднородность; femtosecond laser pulse, second harmonic generation, Gaussian beam, nonlinear crystal, homogeneity, intensity, inhomogeneity.

Введение

В настоящее время для формирования сверхмощных фемтосекундных пучков используются твердотельные лазерные установки с оптической или лазерной накачкой. В качестве активной среды в них чаще всего используются легированные неодимом среды или кристаллы Ti:Sapphire. Все эти мощные твердотельные лазерные системы работают в ближней ИК-области спектра. Однако для многих приложений необходимы мощные пучки в видимой области спектра. Лазерные пучки видимого диапазона получают методом генерации второй гармоники (ГВГ) с помощью инфракрасных пучков, и этот процесс хорошо освоен для импульсов наносекундной длительности [1]. Эти пучки широко применяются для накачки твердотельных усилителей в мощных лазерных системах [2, 3]. Однако процесс получения лазерных пучков видимого диапазона с фемтосекундной длительностью импульса достаточно мало изучен. При этом максимальная мощность в настоящее время реализована на длине волны 400 нм и составляет

4 ТВт [4]. Дальнейшее увеличение мощности ограничивается размерами нелинейных кристаллов, используемых для ГВГ. Характерной особенностью всех работ по ГВГ фемтосекундных импульсов является большая неоднородность лазерного пучка на второй гармонике.

В работе [5] показано, что в кубической нелинейной среде мелкомасштабные амплитудные и фазовые пространственные неоднородности (шум), всегда имеющиеся в пучке, могут усиливаться в присутствии мощной волны. Этот шум при ГВГ не должен превышать определенного значения от пиковой мощности входного излучения [6], иначе это приведет к распаду пучка на отдельные части, т.е. к мелкомасштабной самофокусировке. Так же была получена высокоэффективная ГВГ фемтосекундного излучения в нелинейном кристалле КДП (дигидрофосфат калия) толщиной 1 мм при центральной длине волны излучения первой гармоники 910 нм [7]. Кроме того, актуальность получения лазерного пучка в видимой области обусловлена тем, что он позволяет увеличить пиковую мощность сфокусированного лазерного излучения за счет уменьшения диаметра пучка в перетяжке примерно в два раза.

В ИСЭ СО РАН запущена лазерная система ТНЛ-100. Она работает в видимой области спектра (475 нм) и не имеет традиционных ограничений

* Сергей Владимирович Алексеев (sergey100@sibmail.com); Николай Георгиевич Иванов (ivanov.ng@sibmail.com); Валерий Федорович Лосев (losev@ogl.hcei.tsc.ru); Сергей Юрьевич Миронов (Sergey.Mironov@mail.ru).

на мощность выходного пучка [8, 9]. Для ее создания был использован опыт, накопленный при разработке мощных газовых лазеров [10–12]. Уже к настоящему времени на ней реализована мощность 14 ТВт [13–15] и планируется ее увеличение до 50–100 ТВт. В этой лазерной системе вторая гармоника Ti:Sapphire стартового комплекса усиливается в газовом усилителе на молекулах XeF(C–A). Понятно, что требования к качеству пучка стартового комплекса, который имеет фемтосекундную длительность, достаточно высокие. Однако эксперименты показали, что при преобразовании ИК-излучения во вторую гармонику в пучке появляются многочисленные локальные неоднородности, которые приводят к филаментации пучка и затрудняют его дальнейшую транспортировку и усиление. В связи с вышесказанным актуальным является более детальное изучение ГВГ фемтосекундной длительности с целью поиска условий получения пучка с хорошей однородностью.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса ГВГ фемтосекундного лазерного импульса излучения на центральной длине волны 950 нм. Целями исследований являются определение причин появления неоднородностей излучения во второй гармонике и поиск условий для их минимизации.

Оборудование и методика эксперимента

Для экспериментального исследования процесса ГВГ использовался фемтосекундный Ti:Sapphire стартовый комплекс, который является задающим генератором для мультитераваттной лазерной системы. Его излучение усиливается в активной газовой среде на молекулах XeF(C–A) [16]. Стартовый комплекс состоит из задающего генератора, стретчера, регенеративного и двух многопроходных усилителей, решетчатого компрессора и генератора второй гармоники (2 мм КДП). Комплекс обеспечивает лазер-

ный импульс длительностью 50 фс на длине волны 475 нм с энергией до 20 мДж. В экспериментах использовался гауссов пучок основной гармоники с энергией 2–10 мДж и диаметром 0,94 см по спаду интенсивности в e^{-2} раз. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1. Излучение после преобразования в КДП испытывает два отражения на спектрально-селективных зеркалах. Затем с помощью телескопа пучок направляется либо на профилометр SP620U (Spiricon), либо на измеритель энергии OPHIR.

Для численного моделирования процесса генерации второй гармоники фемтосекундных импульсов использовался алгоритм с разделенным шагом split-step predict correct, в котором решаются связанные квазиоптические уравнения, описывающие процесс ГВГ [6, 7].

Результаты и их обсуждение

В экспериментах по ГВГ было использовано два режима работы стартового комплекса. В первом режиме лазерный пучок длительностью 250 пс на длине волны 950 нм после первого многопроходного усилителя сжимался в решетчатом компрессоре и преобразовывался во вторую гармонику в кристалле КДП. Во втором – пучок усиливался в двух многопроходных усилителях, пропускался через пространственный фильтр, а затем проходил компрессор и преобразовывался во вторую гармонику. Энергия лазерного пучка во второй гармонике составляла приблизительно 1 мДж. В ходе экспериментов была исследована однородность интенсивности исходного и преобразованного пучков. В первом случае гауссов пучок на основной гармонике имел мелкомасштабную неоднородность (рис. 2, а). После прохождения КДП эта неоднородность существенно возросла (рис. 2, б). При этом с ростом энергии пучка основной гармоники неоднородность на второй гармонике также возросла значительно.

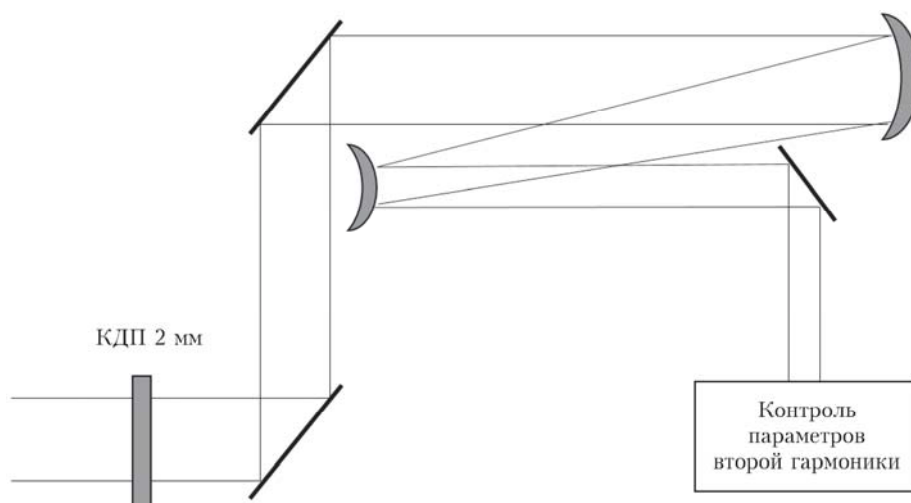
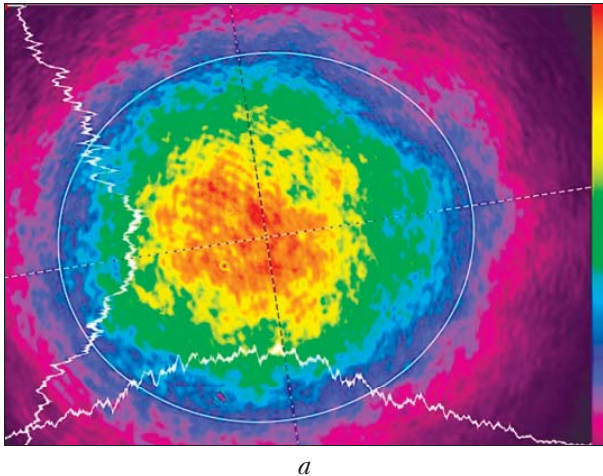
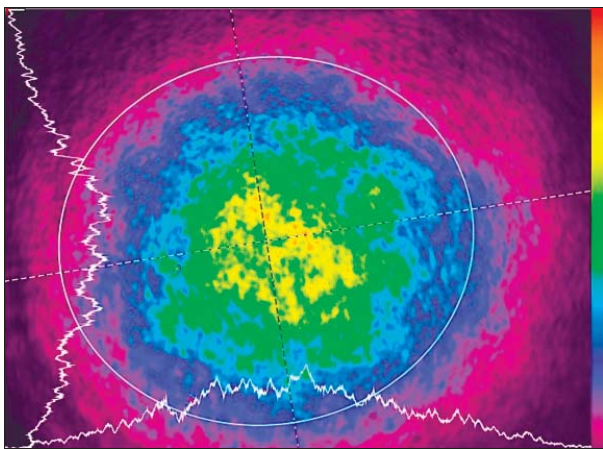


Рис. 1. Блок-схема эксперимента



a

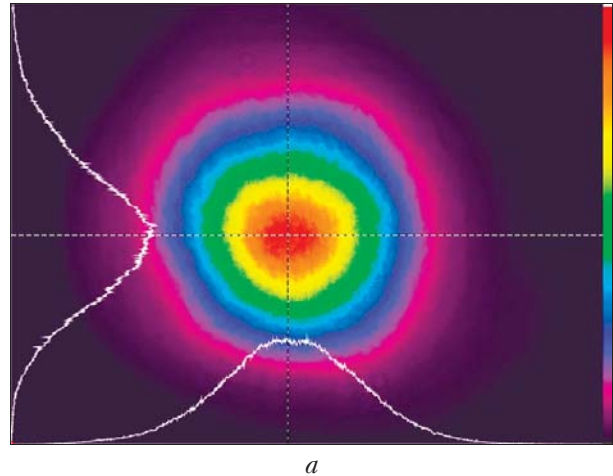


б

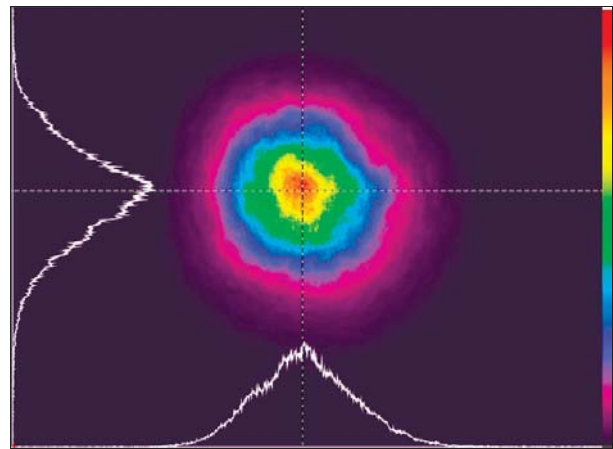
Рис. 2. Распределение интенсивности излучения основного пучка (*a*) и пучка, преобразованного во вторую гармонику (*б*), в первом режиме. На шкале справа показана относительная интенсивность излучения

Другая картина наблюдалась во втором режиме. С помощью пространственного фильтра удалось существенно улучшить однородность пучка основной гармоники. Был сформирован гауссов пучок диаметром 0,94 см с достаточно хорошей однородностью (рис. 3, *a*). При этом энергия пучка накачки была 4,8 мДж. Это существенно изменило ситуацию для преобразованного во вторую гармонику пучка (рис. 3, *б*). Энергия преобразованного пучка составила 0,9 мДж, что соответствует кпд = 18,75%. Существенно уменьшились мелкомасштабные неоднородности, но стало проявляться поджатие пучка за счет кервовой нелинейности.

Также был выполнен теоретический анализ условий генерации второй гармоники. Расчет проводился для КДП толщиной 2 мм, длительность импульса накачки бралась 50 фс, центральная длина волны — 950 нм. Пучок имел гауссову форму с диаметром 0,94 см по e^{-2} интенсивности. Интенсивность излучения I варьировалась от 54 до 2700 ГВт/см². На выходе расчетов отслеживались такие параметры, как поперечное распределение интенсивности второй гармоники и энергетическая эффективность преобразования излучения η .



a



б

Рис. 3. Распределение интенсивности излучения основного пучка (*a*) и пучка, преобразованного во вторую гармонику (*б*), во втором режиме. На шкале справа показана относительная интенсивность излучения

Расчеты показали, что при преобразовании излучения основной гармоники (рис. 4, *a*) во вторую (рис. 4, *б*) при интенсивности 54 ГВт/см², что соответствует 2 мДж энергии, профиль пучка на второй гармонике практически повторял исходный. Каких-либо мелкомасштабных неоднородностей не наблюдалось. При этом с ростом интенсивности вплоть до 270 ГВт/см² принципиально картина не менялась (рис. 4, *в*). Модельные расчеты были проведены и для больших значений интенсивностей. Существенного влияния интенсивности излучения на структуру пучка выявлено не было.

Относительно энергетической эффективности преобразования фемтосекундного лазерного пучка в КДП толщиной $L = 2$ мм с помощью численного моделирования было показано, что она растет с ростом интенсивности пучка основной гармоники (рис. 5) и достигает порядка 50% в рабочем режиме (270 ГВт/см²). При дальнейшем увеличении интенсивности падающего на кристалл излучения кпд преобразования имеет тенденцию к незначительному снижению, переходящему в режим насыщения. Уменьшение кпд обусловлено появлением кубической нелинейности в КДП. Если же рассчитать оптимальную толщину

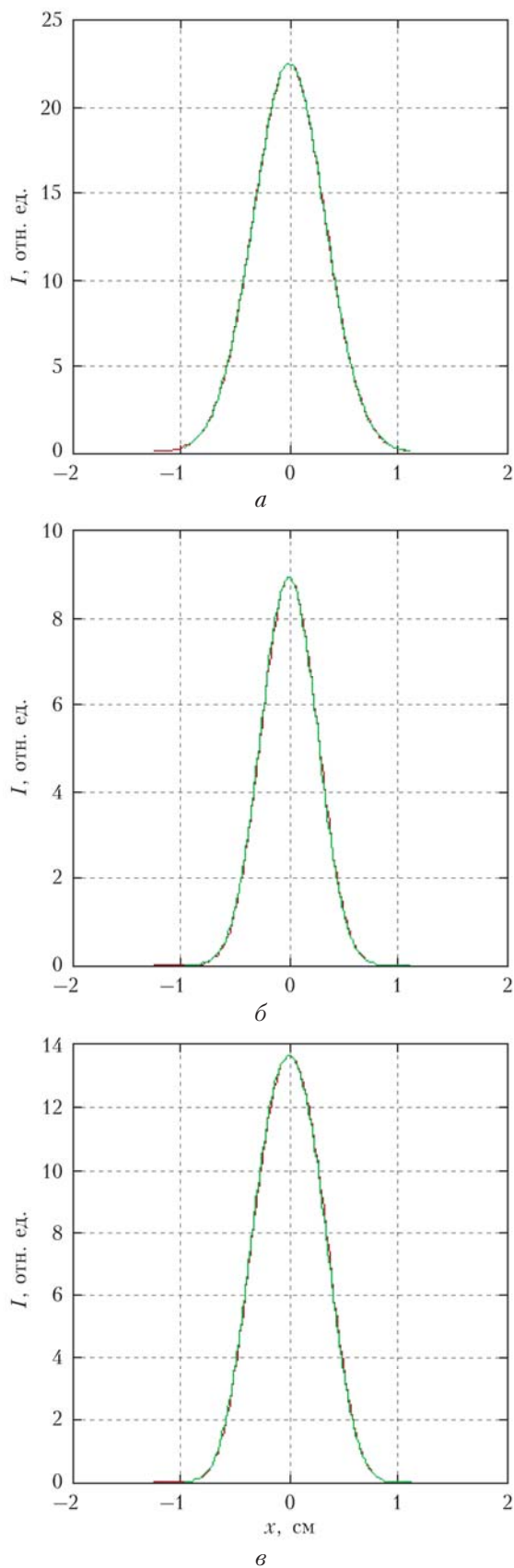


Рис. 4. Поперечное сечение первой гармоники (а) и расчетное сечение второй гармоники при энергии падающего излучения 2 (б) и 10 мДж (в) соответственно

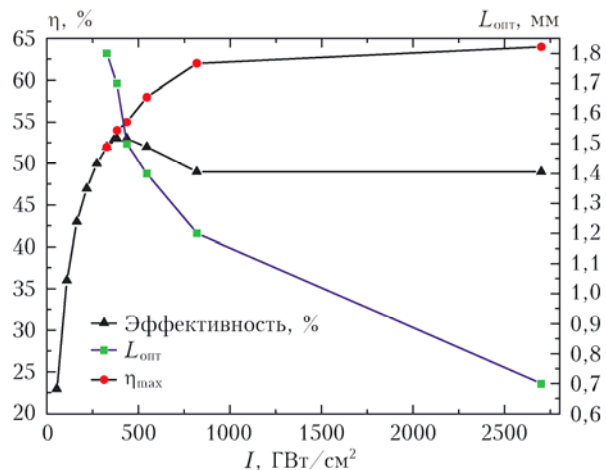


Рис. 5. Теоретическая зависимость энергетической эффективности ГВГ в кристалле КДП толщиной 2 мм от интенсивности импульса первой гармоники на входе в кристалл (треугольники). Оптимальная расчетная толщина кристалла (квадраты), необходимая для получения высокоэффективной ГВГ (круги)

кристалла $L_{\text{опт}}$, при которой происходит максимальное преобразование η_{max} инфракрасного излучения в видимое при больших интенсивностях (порядка $2,7 \text{ ТВт/см}^2$), то она уменьшается и достигает $0,7 \text{ мм}$ при энергетической эффективности в 64% .

Так как полного согласования расчетов и эксперимента с пучком диаметром $0,94 \text{ см}$ добиться не удалось, то во втором режиме был проведен модельный эксперимент с лучшим качеством излучения при меньшем диаметре пучка накачки. Для этого из всего пучка основной гармоники вырезалась центральная часть диаметром 2 мм , и на расстоянии $2,4 \text{ м}$ устанавливался кристалл КДП (2 мм). Энергия вырезанной части пучка составляла $0,35 \text{ мДж}$ при длительности импульса 50 фс . Профиль пучка при этом имел практически идеальную гауссову форму (рис. 6, а). Тем не менее во второй гармонике наблюдались небольшие мелкомасштабные неоднородности интенсивности излучения (рис. 6, б). Это говорит о том, что в пучке накачки присутствует небольшая доля шумовой компоненты, от которой полностью не удалось избавиться при фильтрации пучка. Коэффициент полезного действия преобразования при этом оказался довольно низким, так как энергия лазерного пучка с длиной волны 475 нм составила 22 мкДж .

Для теоретического расчета модельного эксперимента были уточнены условия расчетов, а именно: была рассчитана фаза ϕ с помощью программы FRESNEL [17]. Ранее для модели использовалась нулевая фаза пучка, которой на практике добиться довольно трудно. Имея экспериментальный профиль пучка и расчетную фазу (рис. 7), уже можно было более точно смоделировать ситуацию, близкую к эксперименту.

В результате расчета было получено распределение интенсивности, при котором преобразованный во вторую гармонику пучок практически не имеет локальных флуктуаций неоднородности, наблюдающихся в эксперименте, и опять же повторяет профиль

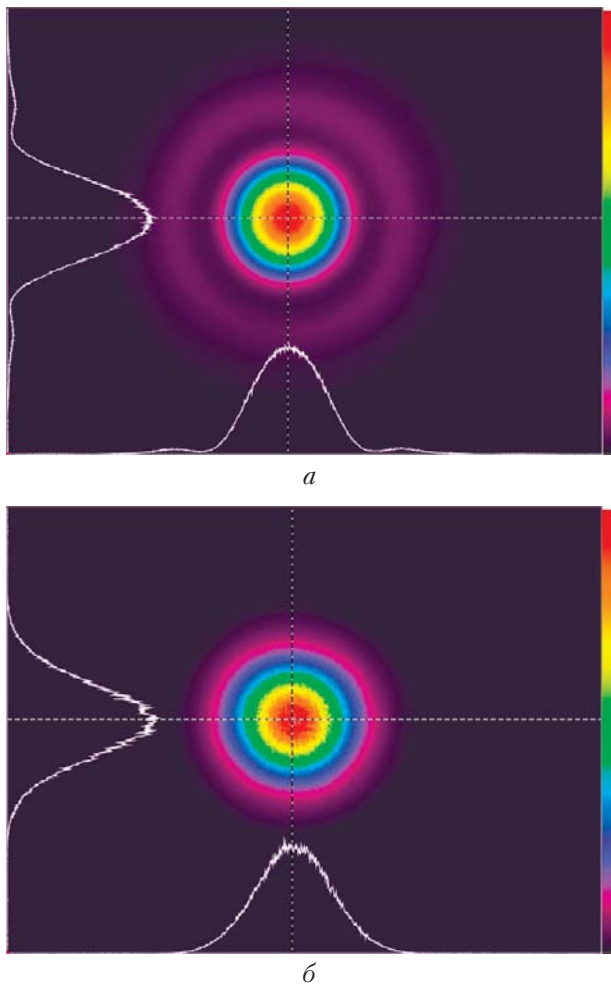


Рис. 6. Распределение интенсивности излучения основного пучка (а) и пучка, преобразованного во вторую гармонику (б), в модельном эксперименте с диаметром пучка 2 мм. На шкале справа показана относительная интенсивность излучения

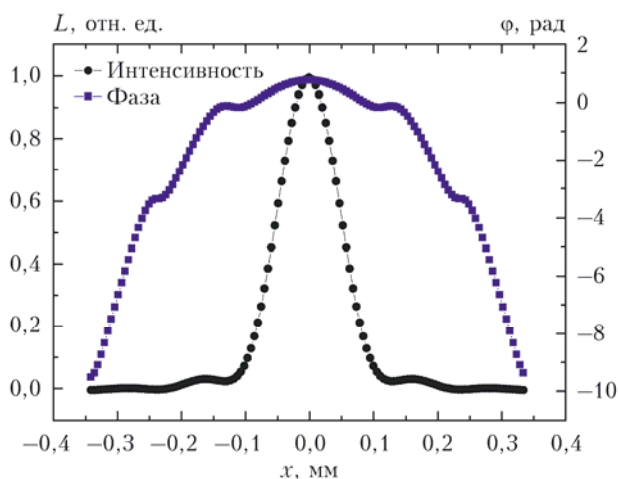


Рис. 7. Профиль интенсивности (круги) и фаза (квадраты) лазерного пучка, рассчитанного в программе FRESNEL

исходного пучка. При этом внесение в расчет искусственных искажений амплитуды величиной 10% дает 18%-ю неоднородность во второй гармонике.

Заключение

Таким образом, изучено влияние интенсивности излучения, пространственного профиля и уровня шумовой компоненты первой гармоники на длину волны 950 нм на однородность интенсивности второй гармоники. При этом интенсивность падающего пучка на нелинейный кристалл изменялась в диапазоне 50–270 ГВт/см². Теоретически и экспериментально было показано, что для получения хорошей однородности на второй гармонике необходимо обеспечивать высокую однородность излучения в первой гармонике и минимальный уровень шума в ее составе. Экспериментальное уменьшение шумовой компоненты в пучке накачки за счет использования пространственного фильтра позволило существенно подавить мелкомасштабные неоднородности во второй гармонике. Однако при интенсивности первой гармоники 125 ГВт/см² уже начинает проявляться поджатие пучка за счет керровской нелинейности. Показывается, что наличие амплитудных неоднородностей пучка накачки еще в большей мере проявляется во второй гармонике. При отсутствии неоднородностей (гауссов пучок) в пучке накачки с интенсивностью 125 ГВт/см² в расчетах повторяется гауссов пучок, однако в эксперименте наблюдаются небольшие мелкомасштабные неоднородности. Это говорит о том, что не учтены какие-то условия в теоретической модели либо в пучке накачки присутствует небольшая доля шумовой компоненты, от которой полностью не удалось избавиться при фильтрации пучка. Возможно, по этим же причинам рассчитанный кид оказался примерно в 2 раза выше, чем на практике. Следует отметить, что в экспериментах с ростом энергии основной гармоники всегда наблюдалось увеличение неоднородности интенсивности на второй гармонике.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 15-19-10021) в части формирования лазерного пучка на первой гармонике с требуемыми параметрами, Министерства образования и науки РФ (договор № 14.Z50.31.00) и грантов РФФИ № 14-08-31072, 15-08-02905, 14-28-02023-офи-м, 13-02-91323 СИГ_a.

1. 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., Potomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. Compact 0.56 Petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals // *Laser Phys. Lett.* 2007. V. 4, N 6. P. 421–427.
2. Pennington D.M., Perry M.D., Stuart B.C., Boyd R.D., Britten J.A., Brown C.G., Herman S.M., Miller J.L., Nguyen H.T., Shore B.W., Tietbohl G.L., Yanovsky V. Petawatt laser system // *Proc. SPIE Inc. Soc. Opt. Eng.* 1997. V. 3047. P. 490–500.
3. Gaul E.W., Martinez M., Blakeney J., Jochmann A., Ringuette M., Hammond D., Berger T., Escamilla R., Douglas S., Henderson W., Dyer G., Erlandson A., Cross R., Caird J., Ebberts C.A., Ditmire T. Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd:glass amplifier // *Appl. Opt.* 2010. V. 49, N 9. P. 1676–1681.

4. Ozaki T., Keiffer J.-C., Toth R., Fourmaux S., Bandulet H. Experimental prospects at the Canadian advanced laser light source facility // *Laser Part. Beams*. 2006. V. 24, N 1. P. 101–106.
5. Кочеткова М.С., Мартыанов М.А., Потемкин А.К., Хазанов Е.А. Экспериментальное наблюдение мелкомасштабной самофокусировки пучка в неразрушающем режиме // *Квант. электрон.* 2009. Т. 39, № 10. С. 923–927.
6. Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Миронов С.Ю., Потемкин А.К., Хазанов Е.А. Влияние мелкомасштабной самофокусировки на генерацию второй гармоники сверхсильным лазерным полем // *Квант. электрон.* 2010. Т. 40, № 6. С. 503–508.
7. Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Лучинин Г.А., Кирсанов А.В., Яковлев И.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. Высокоэффективная генерация второй гармоники интенсивного фемтосекундного излучения при существенном влиянии кубической нелинейности // *Квант. электрон.* 2011. Т. 41, № 11. С. 963–967.
8. Losev V., Alekseev S., Ivanov N., Kovalchuk B., Mikheev L., Mesyats G., Panchenko Yu., Ratakhin N., Yastremsky A. Development of a hybrid (solid state/gas) femtosecond laser system of multiterawatt peak power // *Proc. SPIE*. 2010. V. 7751. P. 7751 (09–12).
9. Losev V., Alekseev S., Ivanov N., Kovalchuk B., Mikheev L., Mesyats G., Panchenko Yu., Puchikin A., Ratakhin N., Yastremsky A. Development of a 100-terawatt hybrid femtosecond laser system // *Proc. SPIE*. 2011. V. 7993. P. 799317.
10. Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Наац Э.И., Рыжов В.В., Турчановский И.Ю., Ястремский А.Г. ХеС1-лазер с энергией генерации 200 Дж // *Квант. электрон.* 1997. Т. 24, № 8. С. 688–690.
11. Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.Н. ХеС1-лазер, возбуждаемый микросекундным электронным пучком // *Квант. электрон.* 1983. Т. 10, № 7. С. 1510–1512.
12. Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Месяц Г.А. ХеС1-лазер с энергией генерации 150 Дж // *Письма в ЖТФ*. 1988. Т. 14, вып. 6. С. 566–569.
13. Алексеев С.В., Иванов Н.Г., Ковальчук Б.М., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Ратахин Н.А., Ястремский А.Г. Тераваттная гибридная лазерная система THL-100 на базе фотодиссоционного ХеF(C–A)-усилителя // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 3. С. 221–225.
14. Losev V.F., Alekseev S.V., Aristov A.I., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M., Mesyats G.A., Mikheev L.D., Panchenko Yu.N., Ratakhin N.A. Hybrid multi-terawatt laser system of visible spectral range // *Proc. SPIE*. 2012. V. 8677. P. 86770Y (1–7).
15. Alekseev S.V., Aristov A.I., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M., Losev V.F., Mesyats G.A., Mikheev L.D., Panchenko Yu.N., Ratakhin N.A. Multiterawatt femtosecond laser system in the visible with photochemically driven ХеF(C–A) boosting amplifier // *Laser Part. Beams*. 2013. V. 31, N 1. P. 17–21.
16. Алексеев С.В., Аристов А.И., Грудцын Я.В., Иванов Н.Г., Ковальчук Б.М., Лосев В.Ф., Мамаев С.Б., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Поливин А.В., Степанов С.Г., Ратахин Н.А., Яловой В.И., Ястремский А.Г. Гибридные фемтосекундные системы видимого диапазона на основе ХеF(C–A)-усилителя: состояние и перспективы // *Квант. электрон.* 2013. Т. 43, № 3. С. 190–200.
17. Гаранин С.Г., Епатко И.В., Львов Л.В., Серов Р.В., Сухарев С.А. Подавление самофокусировки в системе из двух нелинейных сред и пространственного фильтра // *Квант. электрон.* 2007. Т. 37, № 12. С. 1159–1165.

S.V. Alekseev, N.G. Ivanov, V.F. Losev, S.Yu. Mironov. The conversion of a femtosecond pulse with a central wavelength of 950 nm into the second harmonic.

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the second harmonic generation process in the Ti:sapphire femtosecond complex, which includes generator of the femtosecond pulse, stretcher, regenerative amplifier, two multi-pass amplifiers, compressor, and second-harmonic generator. This complex provides 50-fs pulses with energy of 20 mJ and is used as a master oscillator in the THL-100 hybrid laser system, which operates in the visible region at a wavelength of 475 nm. Experiments and calculations for various beam parameters of the fundamental harmonic, such as radiation intensity, spatial profile of the beam, and the level of the noise component, were performed. It is theoretically shown that in the absence of the noise component in the beam of the fundamental wave a good homogeneity of the second harmonic should be observed. When making the amplitude inhomogeneities in the first harmonic even greater inhomogeneities in the second harmonic appeared. It is experimentally shown that the inhomogeneity of the second harmonic beam increases with the beam energy.