

Формирование и усиление импульсов длительностью 50 пс в гибридной лазерной системе THL-100

С.В.Алексеев, Н.Г.Иванов, М.В.Иванов, В.Ф.Лосев, Г.А.Месяц, Л.Д.Михеев, Ю.Н.Панченко, Н.А.Ратахин, А.Г.Ястремский

Приведены результаты исследований гибридной лазерной системы видимого диапазона THL-100, состоящей из Ti:сапфирового стартового комплекса и фотодиссоционного XeF(C–A)-усилителя. В стартовом комплексе реализован режим генерации второй гармоники в линейно chirпированном импульсе с длительностью 50 пс и энергией до 5 мДж в пучке высокого качества. Продемонстрировано насыщение XeF(C–A)-усилителя при входной энергии более 2 мДж и получена выходная энергия 3.2 Дж, позволяющая рассчитывать на достижение пиковой мощности около 50 ТВт в импульсе длительностью 50 фс.

Ключевые слова: гибридная фемтосекундная система, XeF(C–A)-усилитель, генерация второй гармоники, видимый спектральный диапазон.

1. Введение

В настоящее время создание мультитераваттных и петаваттных лазерных систем основано главным образом на применении твердотельных титан-сапфировых или параметрических усилителей и метода усиления положительно chirпированных импульсов, т. е. импульсов, растянутых во времени до длительности 0.5–1 нс методом линейной частотной модуляции [1]. Эти системы работают в ИК области спектра (0.8–1 мкм). Расширение спектрального диапазона их действия позволяет раздвинуть границы области применения таких систем и в ряде случаев способствует повышению эффективности взаимодействия фемтосекундного излучения с веществом [2, 3]. Известен путь продвижения в видимую и УФ области спектра за счет генерации второй и третьей гармоник ИК излучения. Однако возможности преобразования сверхмощных пучков ИК излучения в эти диапазоны спектра, к сожалению, ограничены технологическими проблемами изготовления тонких (менее 1 мм) нелинейных кристаллов достаточного большого диаметра (свыше 10 см), необходимых для преодоления трудностей, обусловленных широким спектром и высокой интенсивностью фемтосекундного излучения [4]. Мощность 4 ТВт, достигнутая для излучения второй гармоники (400 нм) Ti:сапфи-

рового лазера 10 лет назад [5], остается на сегодняшний день максимальной для данного метода.

Альтернативным путем получения мультитераваттных лазерных пучков в видимой области является гибридный подход к построению фемтосекундных систем, развиваемый в настоящее время в ФИАНе (Москва) и ИСЭ СО РАН (Томск) на основе гибридных лазерных систем THL-30 и THL-100 соответственно [3, 6–13]. В этих системах используются твердотельные и газовые активные среды, а именно Ti:сапфировый фемтосекундный стартовый комплекс и фотодиссоционный XeF(C–A)-усилитель. Уже к настоящему времени на THL-100 получена рекордная для видимой области мощность лазерного импульса 14 ТВт [3, 8–11], и существует перспектива ее повышения до 50–100 ТВт с высоким временным контрастом излучения (10^{12} – 10^{13}) [14].

Данные лазерные системы, в принципе, способны работать с использованием двух оптических схем. Первая из них основана на усилении в газовом усилителе отрицательно chirпированного импульса пикосекундной длительности с последующей его временной компрессией в объеме стекла. Возможность применения такой схемы продиктована сравнительно низким уровнем оптической нелинейности среды используемого газового усилителя, позволяющего усиливать пикосекундные импульсы. Этот подход был реализован в экспериментах по получению пиковой мощности 14 ТВт в фемтосекундной системе THL-100 [3, 8–11], в которых для обеспечения отрицательного chirпа импульса, инжектируемого в газовый усилитель, использовалась призматическая пара. Дальнейшее развитие данного подхода с целью продвижения в область более высоких пиковых мощностей требует применения chirпированных (брэгговских) зеркал как на ранней стадии внесения отрицательного chirпа в инжектируемый импульс, так и в комбинации с использованием обратной временной компрессии в объеме стекла для снижения эффектов самовоздействия лазерного пучка.

Другая возможная схема построения гибридных систем основана на традиционном подходе к усилению положительно chirпированного импульса субнаносекунд-

С.В.Алексеев, Н.Г.Иванов, М.В.Иванов, Ю.Н.Панченко, А.Г. Ястремский. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3

В.Ф.Лосев, Н.А.Ратахин. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: losev@old.hcei.tsc.ru

Г.А.Месяц. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Л.Д.Михеев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: mikheev@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 22 февраля 2017 г.

ной длительности с последующим его сжатием в компрессоре на основе дифракционных решеток. В настоящей работе исследуется именно этот подход в части формирования линейно chirпированного импульса на второй гармонике Ti:сапфирового стартового комплекса (470 нм) и его усиления в конечном XeF(C-A)-усилителе фемтосекундной системы THL-100.

2. Аппаратура и методика эксперимента

Лазерная система THL-100 включает в себя Ti:сапфировый фемтосекундный стартовый комплекс «Старт-480М», изготовленный фирмой «Авеста-Проект», и фотодиссоционный XeF(C-A)-усилитель, разработанный и созданный в ИСЭ СО РАН совместно с ФИАНом. В данных экспериментах комплекс состоял из Ti:сапфирового задающего генератора фемтосекундных импульсов с непрерывным лазером накачки (Verdi-8) на длине волны 532 нм, решеточного стретчера, регенеративного и двух многопроходных усилителей с импульсно-периодическими лазерами накачки на длине волны 532 нм, а также из генератора второй гармоники на основе кристалла KDP первого типа толщиной 2 мм.

В стандартной схеме стартового комплекса «Старт-480М» во вторую гармонику преобразуются спектрально-ограниченные импульсы длительностью 50 фс после решеточного компрессора [3, 6–13]. В настоящей работе излучение на длине волны 940 нм, усиленное в многопроходных усилителях, падало на нелинейный кристалл, минуя компрессор стартового комплекса. При этом импульсы излучения первой гармоники обладали энергией до 50 мДж, длительностью по полувысоте амплитуды 100 пс и шириной спектра, соответствующей спектрально-ограниченным импульсам длительностью 50 фс. Лазерный пучок имел диаметр 3.7 мм (по уровню интенсивности e^{-2}). После преобразования во вторую гармонику пучок с помощью зеркального телескопа увеличивался в диаметре и направлялся в XeF(C-A)-усилитель. При этом для геометрического согласования с многопроходной схемой усилителя (см. ниже) пучку придавался небольшой угол расхождения.

XeF(C-A)-усилитель, подробно описанный в работах [7, 9, 10, 13], возбуждается ВУФ излучением электронно-пучкового конвертера, преобразующего энергию электронных пучков в излучение ксенона на длине волны 172 нм. Это излучение транспортируется в лазерную кювету че-

рез окна, изготовленные из CaF_2 , и приводит к фотодиссоциации паров XeF_2 с образованием возбужденного состояния $\text{XeF}(\text{C})$. Усиление происходит на 33-х проходах по активной среде усилителя за счет отражения от 32-х зеркал постепенно увеличивающегося диаметра, установленных внутри лазерной камеры по периметру внутренних фланцев лазерной кюветы. Пучок совершает два круговых обхода по внутреннему периметру лазерной кюветы. Коэффициент отражения зеркал находится в диапазоне 99.5%–99.7%. Для снижения влияния дифракции пучка на краях зеркал на входе усилителя располагалась зубчатая диафрагма с внутренним диаметром 13 мм и отношением высоты зуба к шагу $h/d = 7$, которая вырезала центральную часть гауссова пучка по уровню e^{-2} и приводила к более резкому спаду интенсивности на его краях. Инжектируемый лазерный пучок, как уже указывалось, имел небольшой угол расхождения, поэтому он постоянно увеличивался в диаметре с 15 мм (на входе) до 60 мм (на предпоследнем зеркале). Предпоследнее выпуклое зеркало ($R = 5$ м) направляло пучок на плоское зеркало диаметром 100 мм, расположенное на оптической оси. После отражения от этого зеркала пучок распространялся по оптической оси кюветы и выводился наружу, имея диаметр 120 мм и угол расхождения 24 мрад. Оптическая схема экспериментов приведена на рис.1.

Выходной пучок сжимался с помощью положительной линзы и направлялся на клин из плавленого кварца. Диаметр пучка на клине составлял 2.5 см. Отраженный от одной грани клина пучок регистрировался измерителем энергии OPHIR. За клином находилась фотобумага для регистрации автографа лазерного пучка. Все измерения проводились в первом импульсе на новой газовой смеси, т.к. во втором импульсе вследствие выгорания XeF_2 коэффициент усиления активной среды снижался примерно на 20%.

Энергия излучения второй гармоники регистрировалась измерителем энергии Gentec с использованием двух селективных зеркал с максимальным отражением в спектральной области 475 нм для подавления излучения первой гармоники. Измерение длительности и спектра положительно chirпированных импульсов первой и второй гармоник на выходе из стартового комплекса осуществлялось с помощью универсальной стрик-камеры Hamamatsu C10910 с временным разрешением менее 1 пс, совмещенной со спектрографом Spectra-Pro (диапазон 200–1200 нм, спектральное разрешение 0.1 нм).

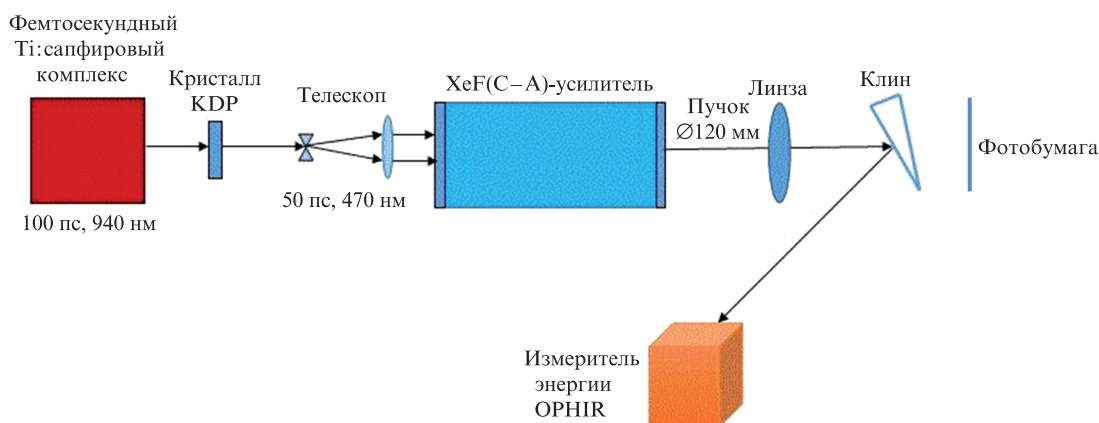


Рис.1. Оптическая схема экспериментов.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис.2 приведена зависимость энергетической эффективности преобразования фундаментальной частоты излучения стартового комплекса во вторую гармонику от интенсивности. В рабочем диапазоне интенсивностей, не превышающих 12 ГВт/см², эффективность преобразования достигала 12%, что позволяло получать энергию импульса до 5 мДж на длине волны второй гармоники. Необходимо отметить, что в стандартной схеме фемтосекундного стартового комплекса «Старт-480М» эффективность преобразования энергии спектрально-ограниченного импульса длительностью 50 фс во вторую гармонику составляет 35%–40% при интенсивности 0.5 ТВт/см². Снижение эффективности преобразования chirпированного импульса является платой за высокую однородность лазерного пучка излучения второй гармоники. На рис.3 представлены профили пучка на длине волны второй гармоники, полученные в фемтосекундном и субнаносекундном режимах при интенсивностях около 0.5 ТВт/см² и 10 ГВт/см² соответственно. Кубическая поляризация среды нелинейного кристалла ведет к деградации качества пучка при высоких интенсивностях, характерных для фемтосекундного режима, и практически не оказывает влияния на качество пучка во втором режиме. Деградация пучка в фемтосекундном режиме требует его пространственной фильтрации после нелинейного кристалла. Слабое влияние кубической нелинейности в случае длинного импульса позволяет также сохранить линейный chirп импульса на длине волны второй гармоники, что видно из рис.4, на котором представлена спектрально-временная развертка интенсивности пучка. Отметим, что ширина спектра соответствовала длительности спектрально-ограниченного импульса на длине волны второй гармоники,

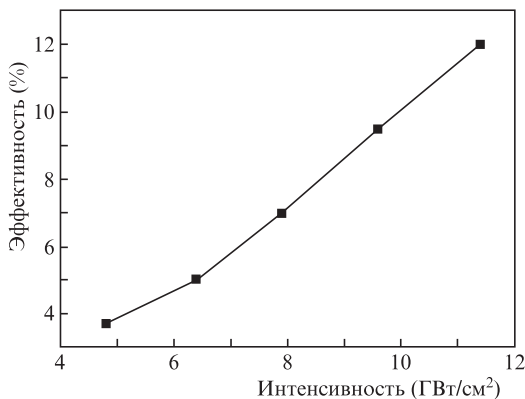


Рис.2. Зависимость энергетической эффективности преобразования фундаментальной частоты излучения стартового комплекса во вторую гармонику от интенсивности.

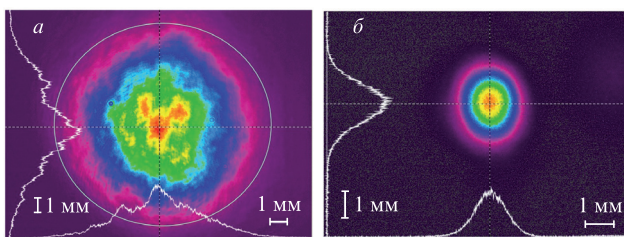


Рис.3. Профили пучка на длине волны второй гармоники, полученные в фемтосекундном (а) и субнаносекундном (б) режимах при интенсивностях около 0.5 ТВт/см² и 10 ГВт/см² соответственно.

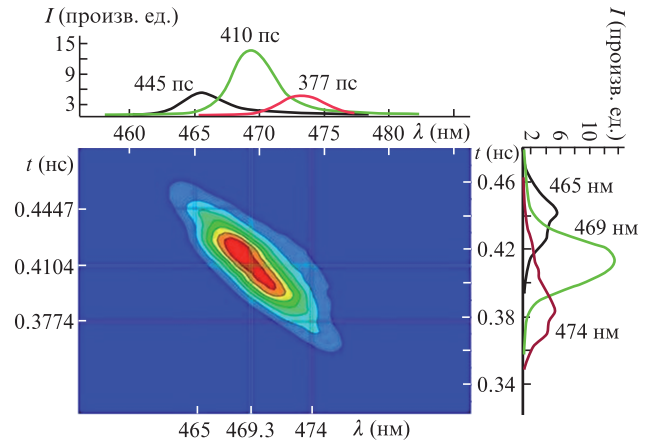


Рис.4. Спектрально-временная развертка интенсивности пучка.

равной 50 фс. Длительность импульса второй гармоники составляла 50 пс на полувысоте амплитуды при исходной длительности импульса первой гармоники 100 пс (рис.5).

Полученный импульс второй гармоники усиливался в XeF(C-A)-усилителе, лазерная камера которого наполнялась смесью N₂:XeF₂ = 0.5 атм:0.2 Тор. Энергия импульса на входе усилителя варьировалась от 2 до 3.5 мДж, однако его выходная энергия оставалась при этом практически неизменной, достигая 3.2 Дж. Отпечаток лазерного пучка на фотобумаге приведен на рис.6.

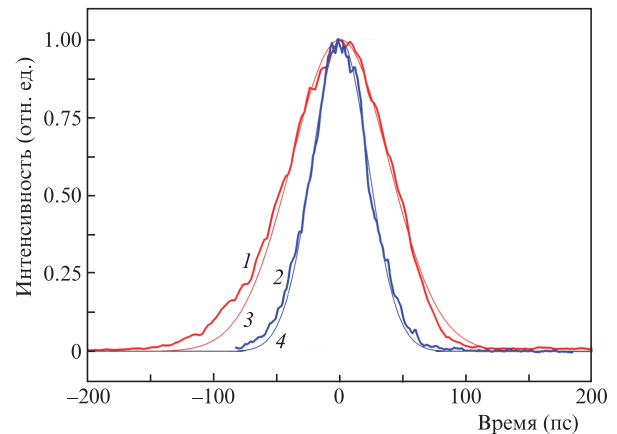


Рис.5. Формы импульсов излучения на первой (1) и второй (2) гармониках и их аппроксимация гауссовыми функциями $\exp(-x^2/3000)$ (3) и $\exp(-x^2/1000)$ (4) соответственно.

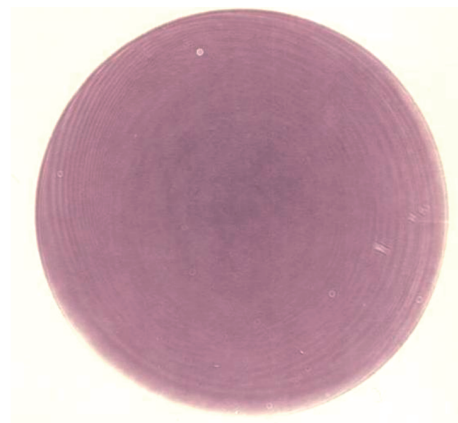


Рис.6. Автограф лазерного пучка с энергией 3.2 Дж.

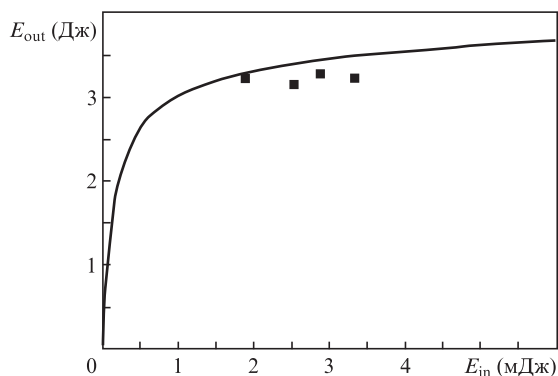


Рис. 7. Зависимость выходной энергии конечного XeF(C–A)-усилителя от входной энергии при $N_2:XeF_2 = 380:0.2$ Тор, $E_{VUF} = 270$ Дж. Кривая – расчет, точки – эксперимент.

Полученные значения энергии хорошо согласуются с результатами численного расчета. На рис. 7 приведены расчетная кривая зависимости выходной энергии усилителя от энергии инжектируемого сигнала и экспериментальные значения выходной энергии конечного усилителя, полученные при различных энергиях инжектируемого импульса. Расчеты проводились на основе модели активной среды, описанной в работе [9]. Отличие приведенной на рис. 7 расчетной кривой от зависимости, полученной в [9], обусловлено тем обстоятельством, что в результате модернизации электронно-пучкового конвертера, подробно описанной в более поздней работе [13], удалось на порядок увеличить полный коэффициент усиления малого сигнала в многопроходном усилителе и довести его до $(5-6) \times 10^4$ [3]. Приведенные на рис. 7 экспериментальные и расчетные данные свидетельствуют о возможности существенного снижения входной энергии насыщения XeF(C–A)-усилителя, что дает свободу манипуляции со входным пучком с целью формирования в нем супергауссова профиля и реализации методов уширения спектра фемтосекундного импульса для его сокращения.

4. Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований в гибридной фемтосекундной системе THL-100 найден режим генерации второй гармоники стартового Ti:сапфирового комплекса, позволяющий сформировать на входе XeF(C–A)-усилителя линейно chirпированный задающий импульс излучения субнаносекундной длительности в пучке высокого качества. При этом, как было показано экспериментально и теоретически, несмотря на сравнительно низкую эффективность преобразования во вторую гармонику (менее 12%) при используемых интенсивностях на фундаментальной частоте, генерируемая энергия импульса на второй гармонике существенно превышает энергию (1–2 мДж), требуемую для насыщения конечного XeF(C–A)-усилителя. Полученные результаты делают перспективной реализацию схемы усиления с

выходным компрессором на основе дифракционных решеток с алюминиевым или серебряным покрытием, обладающим высоким коэффициентом отражения в видимом диапазоне. В настоящее время коммерчески доступны такие решетки размером 154×206 мм с эффективностью в первом порядке дифракции 90% и более. Следует отметить, что аналогичная схема впервые была успешно реализована в работе [15], в которой вторая гармоника chirпированного импульса Ti:сапфировой системы была сжата до 26 фс в решеточном компрессоре.

Экспериментально достигнутая в настоящей работе выходная энергия импульса 3.2 Дж позволяет рассчитывать на получение в гибридной системе THL-100 пиковой мощности около 50 ТВт при сжатии усиленного импульса до длительности 50 фс.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-08-02905 и 16-08-00204), Программы Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения» и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

1. Strickland D., Mourou G.A. *Opt. Commun.*, **56**, 219 (1985).
2. Mikheev L.D., Tcheremiskine V.I., Uteza O.P., Sentsis M.L. *Progr. Quantum Electron.*, **36**, 98 (2012).
3. Mikheev L.D., Losev V.F., in «*High Energy and Short Pulse Lasers*», ed. by R. Viskup (Croatia: InTech, 2016, ch. 6, pp 131–161).
4. Begishev I.A., Kalashnikov M., Karpov V., Nickles P., Schönnagel H., Kulagin I.A., Usmanov T. *J. Opt. Soc. Am. B*, **21**, 318 (2004).
5. Ozaki T., Kieffer J.-C., Toth R., Fourmaux S., Bandulet H. *Laser Part. Beams*, **24**, 101 (2006).
6. Аристов А.И., Грудцын Я.В., Зубарев И.Г., Иванов Н.Г., Крохин О.Н., Лосев В.Ф., Мамаев С.Б., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Растворцева А.А., Ратахин Н.А., Сентис М.Л., Стародуб А.Н., Утеза О., Черемискин В.И., Яловой В.И. *Оптика атмосферы и океана*, **22**, 1029 (2009).
7. 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. *Laser Part. Beams*, **31**, 17 (2013).
8. Алексеев С.В., Аристов А.И., Иванов Н.Г., Ковальчук Б.М., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Ратахин Н.А. *Квантовая электроника*, **42**, 377 (2012).
9. Алексеев С.В., Аристов А.И., Грудцын В.Я., 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., Ратохин Н.А., Яловой В.И., Ястремский А.Г. *Квантовая электроника*, **43**, 190 (2013).
10. Лосев М.Ф., Михеев Л.Д. В кн. «*Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул*» (Томск: STT, 2014, с. 225).
11. Losev V., Alekseev S., Ivanov N., Kovalchuk B., Mikheev L., Mesyats G., Panchenko Yu., Puchikin A., Ratakhin N., Yastremsky A. *Proc. SPIE*, **7993**, 7993 (2011).
12. Алексеев С.В., Иванов М.В., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Ратохин Н.А. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **57** (12/2), 101 (2014).
13. Алексеев С.В., Иванов М.В., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Ратахин Н.А. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **58** (8), 50 (2015).
14. Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. *Оптика атмосферы и океана*, **29**, 133 (2016).
15. Didenko N.V., Konyashchenko A.V., Losev L.L., Pazyuk V.S., Tenyakov S.Yu. *Opt. Commun.*, **282**, 997 (2009).