

Достижение пиковой мощности излучения 40 ТВт лазерной гибридной фемтосекундной системы видимого диапазона

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

Приведены результаты исследований, направленных на повышения пиковой мощности излучения лазерной гибридной фемтосекундной системы видимого диапазона THL-100 на основе фотодиссоционного $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ -усилителя. Увеличение мощности реализовано за счет сокращения длительности импульса излучения на выходе системы в результате уширения спектрального контура второй гармоники с 5.3 до 8 нм, происходившего в процессе преобразования отрицательно chirпированного импульса излучения основной частоты в нелинейном кристалле KDP. После KDP импульс излучения удлинялся в призменном стретчере до 1.8 пс и усиливался в $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ -усилителе. На выходе усилителя была получена энергия 1.2 Дж. В результате компрессии усиленного импульса излучения его длительность составила 29.4 фс, что соответствует пиковой мощности излучения на выходе лазерной системы 40 ТВт.

Ключевые слова: гибридная лазерная система, фотодиссоционный $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ -усилитель, Ti:сапфировый стартовый комплекс, chirпированный импульс, стретчер, компрессор.

1. Введение

В настоящее время создание сверхмощных лазерных систем с длительностью импульса 30–60 фс основано главным образом на применении твердотельных титан-сапфировых или параметрических усилителей с использованием технологии CPA [1]. Удлинение импульса с помощью этой технологии до субнаносекундной длительности необходимо для снижения мощности излучения ниже пороговой, при которой возникает его самофокусировка. После усиления импульс снова сжимают до исходной длительности в компрессоре на основе дифракционных решеток. Все эти системы работают в ИК области спектра (0.8–1 мкм). Расширение спектрального диапазона их действия позволяет раздвинуть границы области применений таких систем и в ряде случаев способствует повышению эффективности взаимодействия фемтосекундного излучения с веществом [2, 3]. Известен способ продвижения в видимую область спектра за счет ВГ основного ИК излучения. Однако возможности преобразования сверхмощных пучков ИК излучения во вторую гармонику ограничены технологическими трудностями изготовления тонких (менее 1 мм) нелинейных кристаллов достаточно большого диаметра (20 см и более). Кроме того, данный метод имеет и другой существенный недостаток: качество преобразованного излучения с фемтосекундной длительностью импульса очень низкое из-за фазовой самомодуляции, кросс-модуляции, керровской самофокусировки и глубокой модуляции спектра ВГ в нелинейном кристалле [4–7]. В связи с этим мощность

4 ТВт, достигнутая для ВГ ($\lambda = 400$ нм, длительность импульса $\tau = 60$ фс) излучения Ti:сапфирового лазера в 2005 г. [8], долгое время оставалась рекордной для данного метода. Только в 2017 г. на мощной титан-сапфировой лазерной системе петаваттного уровня для ВГ ($\lambda = 400$ нм) была достигнута пиковая мощность излучения 270 ТВт ($\tau = 30$ фс) [9]. О получении мощности 27 ТВт ($\tau = 60$ фс) сообщалось в 2018 г., но было отмечено низкое качество пучка ВГ: при фокусировке излучения в дифракционное пятно собиралось только около 30% энергии [10].

В последнее десятилетие в ФИАНе (Москва) и в ИСЭ СО РАН (Томск) развивается альтернативный путь создания мультитераваттных лазерных систем, предполагающий использование твердотельного фемтосекундного лазерного комплекса и фотодиссоционного $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ -усилителя с газовой активной средой [11–15]. Достоинствами такой гибридной схемы являются низкая оптическая нелинейность газовой активной среды, видимый диапазон излучения, возможность масштабирования газового усилителя, достижение высокого контраста за счет преобразования излучения в нелинейном кристалле и низкого коэффициента усиления в газовой среде. В 2012 г. на лазерной системе THL-100 была получена рекордная для видимой области спектра пиковая мощность излучения 14 ТВт [13]. После этого проводились детальные исследования возможности повышения этой мощности. Для ее реализации необходимо было решить ряд проблем, связанных с неоднородностями пучка ВГ, возникающими при преобразовании излучения в нелинейном кристалле, с прохождением его без искажений через призменный стретчер и компрессор, с усилением его в газовом усилителе без образования керровской самофокусировки в активной среде и, наконец, с обработкой методик регистрации параметров излучения мультитераваттной мощности. В результате данных исследований, опубликованных в наших работах [16–26], была получена энергия 2.5 Дж в импульсе с $\tau = 2.35$ пс и 3.2 Дж – с $\tau = 50$ пс [24, 25].

С.В.Алексеев, Н.Г.Иванов, В.Ф.Лосев, Н.А.Ратахин, Ю.Н.Панченко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru
Г.А.Месяц, Л.Д.Михеев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 25 апреля 2019 г., после доработки – 13 июня 2019 г.

В настоящей работе сообщается об использовании полученных нами результатов при проведении экспериментов, направленных на повышение пиковой мощности лазерной системы ТНЛ-100. Повышение мощности на выходе системы стало возможным благодаря сокращению длительности выходного импульса излучения при сохранении однородности пучка во всем оптическом тракте.

2. Аппаратура и методика эксперимента

Лазерная система ТНЛ-100 включает в себя Тi:сапфировый фемтосекундный стартовый комплекс «Старт-480М», изготовленный фирмой «Авеста-Проект», генератор второй гармоники, призмный стретчер, фотодиссоционный XeF(C–A)-усилитель, разработанный и созданный в ИСЭ СО РАН совместно с ФИАНом, и компрессор на основе пластин из плавяного кварца. Оптическая схема лазерной системы приведена на рис.1. Комплекс состоит из Тi:сапфирового задающего генератора фемтосекундных импульсов, решеточного стретчера, регенеративного и двух многопроходных усилителей, а также компрессора на дифракционных решетках. Он работает с частотой следования импульсов 10 Гц или в режиме одиночного импульса с внешним запуском. Комплекс обеспечивает на выходе спектрально-ограниченный импульс излучения на центральной длине волны 950 нм с энергией до 50 мДж и длительностью 60–70 фс.

В качестве генератора второй гармоники использовался кристалл KDP первого типа толщиной 1.8 мм. Призмный стретчер был образован призмами П1 и П2 из плавяного кварца и поворотными зеркалами. Он обеспечивает удлинение импульса излучения с фемтосекундной длительности до пикосекундной за счет отрицательной дисперсии групповых скоростей. Пикосекундный импульс излучения усиливается в XeF(C–A)-усилителе за 33 прохода по активной среде. Для снижения влияния дифракции усиливаемого излучения на краях зеркал на входе в усилитель устанавливалась зубчатая диафрагма с внутренним диаметром 13 мм и отношением высоты зуба

к шагу $h/d = 7$. Усилитель подробно описан в наших работах [13–15]. Его накачка обеспечивается ВУФ излучением электронно-пучкового конвертера, преобразующего энергию шести электронных пучков в УФ излучение ксенона на $\lambda = 172$ нм, которое вводится в шестигранную лазерную кювету с апертурой 24 см через окна из CaF₂. Кювета наполняется парами XeF₂ с парциальным давлением 0.2–0.3 Тор и азотом до давления 0.25–0.5 атм. УФ излучение приводит к фотодиссоциации паров XeF₂ с образованием возбужденного С-состояния молекулы XeF. Вынужденное излучение возникает при переходе молекулы XeF из состояния С в разлетное состояние А. Для геометрического согласования диаметра пучка с многопроходной зеркальной схемой усилителя перед его входом устанавливалось выпуклое зеркало 310 с радиусом кривизны –23 м. На последних двух проходах излучение дополнительно расширялось предпоследним зеркалом в схеме с радиусом кривизны –5 м и выводилось из кюветы в виде расходящегося (угол 0.23 мрад) пучка диаметром 12 см. После этого пучок коллимировался сферическим зеркалом 311 до диаметра 20 см и проходил через компрессор, состоящий из трех пластин из кварца КУ толщиной 4 см, расположенных под углом Брюстера. Потери энергии излучения в компрессоре не превышали 2%.

В данных экспериментах формирование второй гармоники происходило при спектрально-ограниченном и отрицательно chirпированном импульсе излучения основной частоты. Chirпирование обеспечивалось за счет увеличения расстояния между решетками компрессора стартового комплекса. Избыточная отрицательная дисперсия групповых скоростей относительно спектрально-ограниченного импульса составляла –23000 фс². Для повышения эффективности преобразования пучков перед кристаллом KDP сжимался зеркальным телескопом (зеркала 32, 33) до диаметра 1 см. Длительность отрицательно chirпированного импульса ВГ была равна 750 фс. После KDP излучение второй гармоники направлялось в призмный стретчер, где длительность импульса увеличивалась до 1.8 пс, и далее оно усиливалось в XeF(C–A)-усилителе.

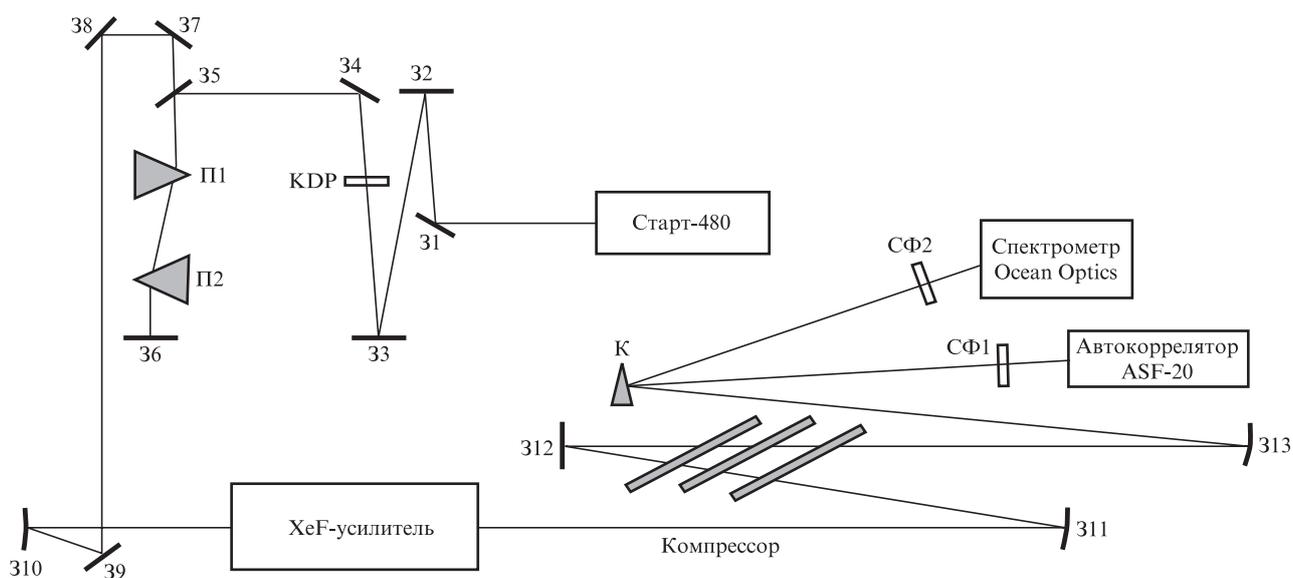


Рис.1. Оптическая схема лазерной системы:

31, 34–39, 312 – плоские поворотные зеркала; 32, 33 – зеркала телескопа; П1 и П2 – призмы стретчера; 310 – выпуклое зеркало радиусом –23 м; 311 – вогнутое зеркало радиусом 15 м; 313 – вогнутое зеркало радиусом 24.4 м; К – клин; СФ1 и СФ2 – светофильтры.

Для измерения длительности импульса усиленного излучения центральная часть пучка фокусировалась с помощью сферического зеркала 313 (диаметр 90 мм, фокусное расстояние 12.2 м) и направлялась на автокоррелятор ASF-20-480, предварительно отражаясь от грани клина К из плавленного кварца. Перед автокоррелятором в фокальной перетяжке устанавливалась диафрагма диаметром 250 мкм. Отражение от второй грани клина использовалось для регистрации спектрального состава излучения с помощью спектрометра Ocean Optics (HR4000CG-UV-NIR). В режиме усиления перед спектрометром размещались нейтральные светофильтры СФ1 и СФ2.

При измерении энергии усиленного излучения диаметр выходного пучка XeF(C-A)-усилителя сжимался с помощью телескопа Галилея до 4 см и пучок направлялся на клин из плавленного кварца. Отраженный от одной грани клина пучок регистрировался измерителем энергии Gentec. Реальная энергия пересчитывалась с учетом коэффициентов отражения грани клина и поверхностей линз телескопа Галилея. За клином располагалась фотобумага для регистрации пространственного распределения интенсивности лазерного излучения, которое обрабатывалось с помощью программы Veam.

3. Результаты и их обсуждение

При планировании данных экспериментов был проведен анализ условий прохождения лазерного пучка через элементы оптической схемы и активную среду с целью исключения в них нелинейных явлений. Анализ показал, что эти условия будут выполняться при выходной энергии лазерной системы не более 1.5 Дж. Чтобы это реализовать, выходная энергия лазерного импульса стартового комплекса должна составлять примерно 0.1 мДж, давление азота в лазерной кювете – 0.25 атм, давление паров XeF₂ – 0.2 Тор. Преобразование chirпированного импульса излучения основной частоты в KDP позволило уширить спектральный контур и сократить длительность спектрально-ограниченного импульса ВГ после компрессора.

На рис.2,*a* приведены спектры спектрально-ограниченного и chirпированного импульсов ВГ после KDP. Видно, что полуширина спектра chirпированного импульса увеличилась с 5.3 до 8 нм. Кроме того, на его спектральном контуре наблюдаются модуляции интенсивности излучения. Chirпирование импульса позволило также исключить керровскую самофокусировку в нелинейном кристалле [22] и снизить искажения пучка в призмах стретчера [17]. Уширение спектра излучения дало возможность уменьшить толщину кварцевого стекла в компрессоре при длительности отрицательно chirпированного импульса 1.8 пс. Такая длительность, по нашим оценкам, является минимальной для исключения нелинейности в активной среде газового усилителя. При ширине спектра 5.3 нм и длительности chirпированного импульса 1.8 пс нам потребовалась бы примерно в 1.5 раза большая толщина кварца в компрессоре.

Перед проведением экспериментов с усилением пучка в XeF(C-A)-усилителе было проведено измерение длительности импульса излучения и его спектра на выходе усилителя в отсутствие его накачки. Регистрируемая длительность спектрально-ограниченного импульса ВГ составляла ~30 фс, а спектр практически повторял спектр излучения после кристалла KDP.

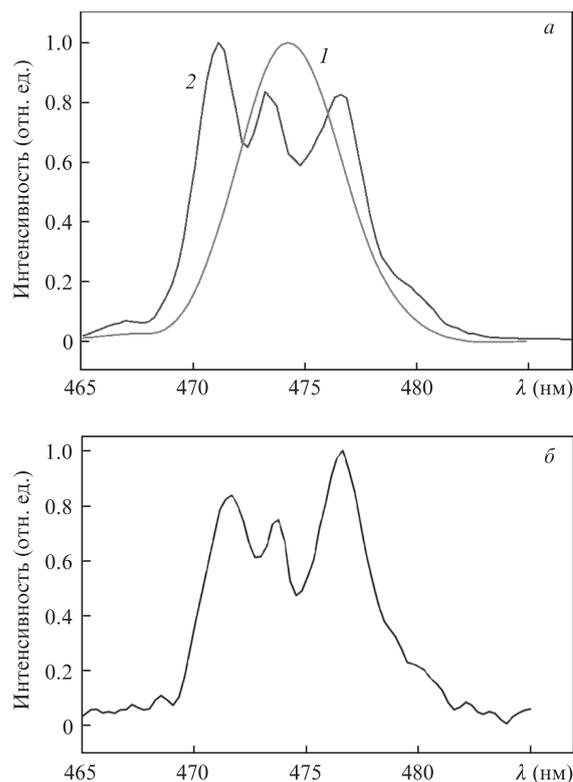


Рис.2. Спектры излучения для спектрально-ограниченного (1) и chirпированного (2) импульсов ВГ до усиления в газовом усилителе (а) и усиленного излучения на выходе лазерной системы после компрессора (б).

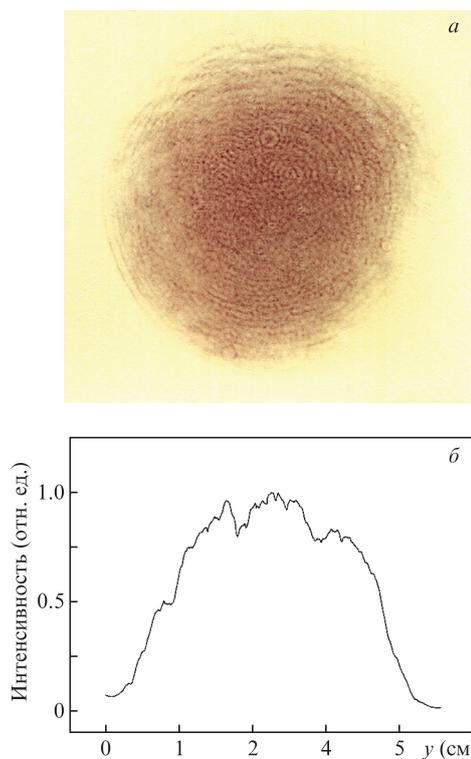


Рис.3. Автограф (а) и пространственное распределение интенсивности усиленного в XeF(C-A)-усилителе пучка излучения (б).

Затем были проведены эксперименты по усилению отрицательно chirпированного импульса в XeF(C-A)-усилителе. При этом энергия излучения на его входе составляла 70 мкДж. Энергия импульса усиленного излучения

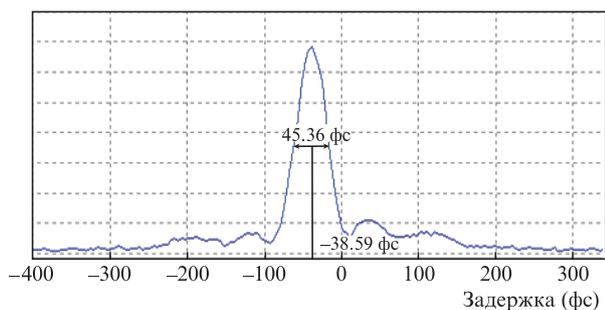


Рис.4. Автокорреляционная функция импульса усиленного излучения длительностью 29.4 ± 1.4 фс.

составила 1–1.2 Дж. На рис.3 представлены форма и пространственное распределение интенсивности пучка усиленного излучения. Видно, что распределение интенсивности выходного излучения близко к супергауссову. На рис. 2,б приведен спектр усиленного излучения, ширина которого после усиления сохраняется на уровне 8 нм, однако спектральный контур несколько трансформируется вследствие повышения интенсивности длинноволновых компонент. Это можно объяснить тем, что максимум контура усиления находится в области 481 нм [27]. Измерение длительности усиленного импульса с помощью автокоррелятора в приближении sech^2 показало, что она равна 29.4 фс (рис.4). На основании полученных данных можно сказать, что с учетом потерь в компрессоре (2%) получена пиковая мощность лазерного излучения 40 ТВт. На настоящее время, по нашим данным, это второй результат по достижению максимальной мощности излучения для видимого диапазона спектра.

4. Заключение

Таким образом, мы сообщаем о повышении пиковой мощности импульса излучения гибридной лазерной системы THL-100, работающей в видимом диапазоне спектра (475 нм), с 14 до 40 ТВт. Увеличения выходной мощности удалось достичь за счет уширения спектра на выходе стартового комплекса и улучшения качества усиливаемого пучка. Уширение спектрального контура ВГ с 5.3 до 8 нм осуществлялось в нелинейном кристалле путем chirpирования импульса излучения основной частоты компрессором стартового комплекса. Увеличение длительности импульса первой гармоники при chirpировании до 750 фс позволило исключить керровскую самофокусировку в нелинейном кристалле и «провести» более длинный импульс излучения ВГ без искажений через призмный стретчер, в котором его длительность увеличивалась до 1.8 пс. Уширение спектра излучения позволило уменьшить толщину кварцевого стекла в компрессоре на выходе системы по сравнению со случаем импульса длительностью 50 фс, а сокращение длительности выходного импульса – повысить выходную мощность при невысокой энергии. Все это – важные факторы, способствующие

снижению нелинейного набега фазы в компрессоре. В результате усиления отрицательно chirpированного импульса излучения в XeF(C–A)-усилителе получена энергия 1.2 Дж, а при сжатии импульса в компрессоре на основе пластин из плавленого кварца его длительность составила 29.4 фс.

Эксперименты по уширению спектра и компрессии импульса излучения стартового комплекса выполнялись при финансовой поддержке РФФ (грант № 18-19-00009), а усиление импульса излучения с длительностью импульса 1.8 пс в XeF(C–A)-усилителе осуществлялось при поддержке РФФИ (грант № 18-08-00383 а).

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» (Croatia: InTech, 2016, Ch. 6, pp 131–161).
4. Begishev I.A., Kalashnikov M., Karpov V., et al. *J. Opt. Soc. Am.*, **21**, 318 (2004).
5. Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Миронов С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **40**, 503 (2010) [*Quantum Electron.*, **40**, 503 (2010)].
6. Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В. и др. *Квантовая электроника*, **41**, 963 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 963 (2011)].
7. Horlein R., Dromey B., Adams D., et al. *New J. Phys.*, **10**, 083002 (2008).
8. Toth R., Kieffer J.C., Fourmaux S., Ozaki T. *Rev.Sci. Instrum.*, **76**, 083701 (2005).
9. Yong Wang, Shoujun Wang, Alex Rockwood, et al. *Opt. Lett.*, **42**, 3828 (2017).
10. Curtis A., Calvi C., Tinsley J., et al. *Nature Commun.*, **9**, 1077 (2018).
11. Mikheev L.D. *Laser Part. Beams*, **10**, 473 (1992).
12. Аристов А.И., Грудцын Я.В., Зубарев И.Г. и др. *Оптика атмосферы и океана*, **22**, 1029 (2009).
13. Алексеев С.В., Аристов А.И., Иванов Н.Г. и др. *Квантовая электроника*, **42**, 377 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 377 (2012)].
14. Alekseev S.V., Aristov A.I., Ivanov N.G. и др. *Laser Part. Beams*, **31**, 17 (2013).
15. Алексеев С.В., Аристов А.И., Грудцын Я.В. и др. *Квантовая электроника*, **43**, 190 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 190 (2013)].
16. Алексеев С.В., Иванов Н.Г., Иванов М.В., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **79**, 266 (2015).
17. Ivanov M.V., Alekseev S.V., Ivanov N.G., Losev V.F. *Proc. SPIE*, **9810**, 98100J (2015).
18. Алексеев С.В., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Миронов С.Ю. *Оптика атмосферы и океана*, **29**, 243 (2016).
19. Иванов Н.Г., Иванов М.В., Лосев В.Ф., Ястремский А.Г. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **59**, 65 (2016).
20. Ястремский А.Г., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. *Квантовая электроника*, **46**, 982 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 982 (2016)].
21. Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **61**, 76 (2018).
22. Алексеев С.В., Иванов М.В., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **83**, 320 (2019).
23. Losev V.F., Alekseev S.V., Ivanov M.V., et al. *Proc. SPIE*, **11042**, 110420P (2019).
24. Алексеев С.В., Иванов Н.Г., Иванов М.В. и др. *Квантовая электроника*, **47**, 184 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 184 (2017)].
25. Алексеев С.В., Иванов Н.Г., Иванов М.В. и др. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **59**, 75 (2017).
26. Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. *Оптика атмосферы и океана*, **29**, 133 (2016).
27. Bischek W.K., Ecstrom D.J., Walfer H.C., Tilton R.A. *J. Appl. Phys.*, **52**, 4429 (1981).