

Генерация пикосекундных УФ импульсов на основе Nd^{3+} :YAG-лазера с усилением в ArF-усилителе*

С.П.Садовский, П.А.Чижов, В.В.Букин, В.М.Брендель, Т.В.Долматов, Ю.Н.Поливанов, Н.С.Воробьев, А.В.Смирнов, С.В.Гарнов, С.К.Вартапетов

Реализована схема генерации УФ импульсов с длительностью 15 пс и выходной энергией до 1.5 мДж на основе системы, состоящей из пикосекундного Nd^{3+} :YAG-лазера с каскадным нелинейно-оптическим преобразованием излучения основной частоты в излучение с длиной волны 193 нм и эксимерного ArF-усилителя. Измерены временные характеристики и контраст усиленного импульса.

Ключевые слова: пикосекундный лазерный импульс, параметрический генератор бегущей волны, эксимерный ArF-усилитель.

1. Введение

Пикосекундные источники света УФ диапазона с высокой мощностью излучения представляют значительный интерес для разнообразных приложений, в том числе лазерной очистки веществ [1], абляции [2], фотохимии [3], исследования нелинейных атомных эффектов [4], а также в качестве источника для изучения физики поверхности [5]. Такое излучение может использоваться для генерации в сверхсветовых генераторах на базе УФ фотокатодов мощного направленного электромагнитного импульса субмиллиметрового диапазона [6].

Эксимерные лазеры позволяют получать большую энергию излучения, но их применение ограничено большой длительностью импульса (более 15 нс, если не использовать дополнительные методики), значительной расходимостью и шириной спектра излучения в режиме свободной генерации. Основным методом получения ультракоротких импульсов (УКИ) в УФ диапазоне является использование связки «генератор УФ излучения пикосекундной длительности и эксимерный усилитель» [7]. Первая работа по усилению пикосекундных импульсов задающего лазера на красителях эксимерным XeCl-лазером была опубликована в 1980 г. [8]. Системы на основе связки «генератор – усилитель» обладают многообразием характеристик и параметров, которые можно сгруппировать по длинам рабочих волн, возможности перестрой-

ки излучения, методам создания затравочного излучения, схемам усиления, временным характеристикам задающего и усиленного излучений. К методам генерации затравочного УФ излучения, попадающего в пик усиления эксимерных усилителей, относится генерация гармоник [8–11] и суммарной частоты [12–19], а также многоволновое взаимодействие [20,21]. Во множестве приведенных работ в качестве генератора УФ излучения использовались системы с задающим генератором на основе лазера на красителе и системы с Ti :сапфировым лазером с настраиваемой длиной волны и блоком генерации гармоник [22–26].

Результаты измерения контраста излучения по энергии и интенсивности в УФ системах с задающим лазером, генерирующим УКИ, и эксимерным усилителем приведены лишь в нескольких работах. Так, в [27] было получено мощное УФ излучение, контраст по энергии составил 10^6 , контраст по интенсивности, по утверждению авторов, равен 10^{10} . В работе [28] реализована лазерная система с генерацией затравочных импульсов на длине волны 248 нм. Контраст излучения по энергии составил от 43 до 0.3 в зависимости от энергии накачки предусилителя.

Основная цель настоящей работы – получение УФ импульса пикосекундной длительности на основе полностью твердотельной системы, состоящей из пикосекундного Nd^{3+} :YAG-лазера, каскадного нелинейно-оптического преобразователя излучения основной частоты в излучение с длиной волны 193 нм и эксимерного ArF-усилителя, а также измерение временных характеристик и контраста усиленного импульса.

2. Эксперимент

Из возможных схем получения излучения на длине волны $\lambda = 193$ нм нами выбрана схема, предложенная в работах [9, 12], в которой генерация суммарной частоты осуществляется при смешении излучения четвертой гармоники Nd^{3+} :YAG-лазера (266 нм) с излучением сигнальной волны параметрического генератора (708 нм). Генерация параметрической сигнальной волны реализуется по схеме с накачкой второй гармоникой (532 нм) основного излучения Nd :YAG-лазера (1064 нм).

* Доложена на 6-м Российском семинаре по волоконным лазерам, Новосибирск, апрель 2014 г.

С.П.Садовский, П.А.Чижов, В.В.Букин, В.М.Брендель, Т.В.Долматов, Ю.Н.Поливанов, Н.С.Воробьев, А.В.Смирнов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: spsadvovskiy@gmail.com

С.В.Гарнов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

С.К.Вартапетов. Центр физического приборостроения Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 142190 Москва, Троицк

Поступила в редакцию 3 июня 2014 г., после доработки – 25 сентября 2014 г.

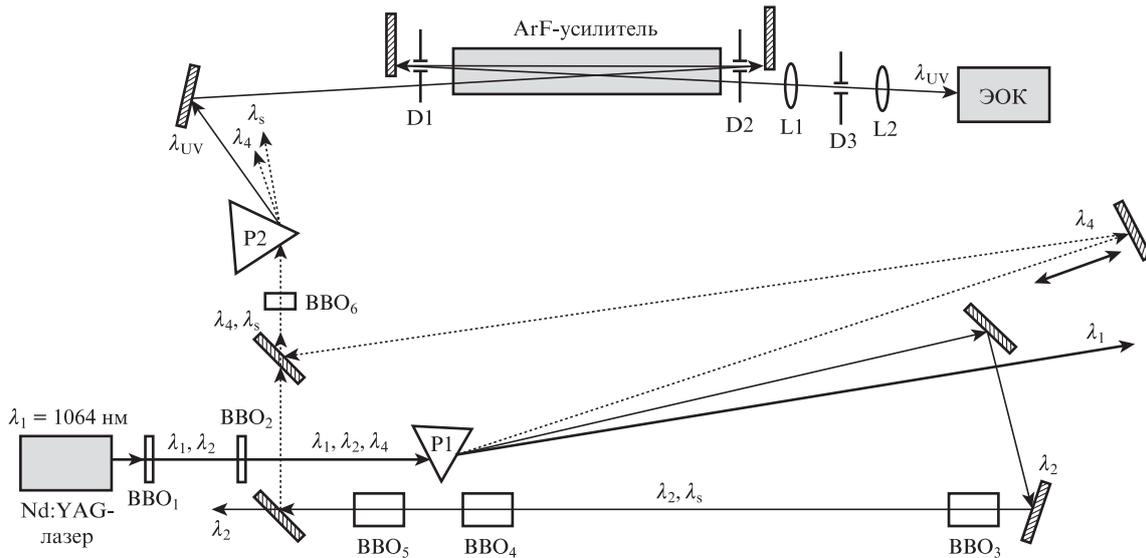


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

λ_1, λ_2 и λ_4 – длины волн основного излучения (1064 нм), второй (522 нм) и четвертой гармоник (266 нм); λ_s – длина волны сигнального излучения (708 нм) параметрического генератора; λ_{UV} – длина волны УФ излучения (193 нм); ВВО₁, ВВО₂ – кристаллы для получения второй и четвертой гармоник; ВВО_{3,4,5} – кристаллы параметрического генератора; ВВО₆ – кристалл для получения суммарной частоты; P1, P2 – кварцевые призмы; D1, D2 и D3 – апертурные диафрагмы; L1 и L2 – линзы.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Задающим генератором служил твердотельный лазер на кристалле Nd:YAG с пассивной синхронизацией мод ($\lambda = 1064$ нм). Одиночный импульс выводился из задающего генератора и усиливался тремя последовательно расположенными усилителями (на рисунке не показаны). После усиления энергия импульса достигала 30 мДж при частоте следования 2 Гц, поляризация излучения была вертикальной. Измерения длительности импульсов проводились с помощью электронно-оптической камеры ЭОК PS-1/S1 [29, 30], разработанной и изготовленной в ИОФ РАН. В ЭОК использовался электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с серебряно-кислородно-цезиевым фотокатодом. Для обеспечения спектральной чувствительности фотокатода в УФ диапазоне входное окно ЭОП было выполнено из увиолевого стекла, имеющего нижнюю границу пропускания 185 нм. ЭОК работала в режиме линейной развертки со скоростью 92 пс/см. Полученные на экране камеры изображения регистрировались и обрабатывались системой считывания на ПЗС-матрице С8484 (Hamamatsu). Снятая с помощью ЭОК зависимость интенсивности от времени аппроксимировалась гауссовой функцией (рис.2). Длительность импульса основной гармоники на уровне половинной амплитуды интенсивности составила 33–35 пс (рис.2,а). Для измерения мощности и энергии импульсов использовались измерители Ophir 3A-P-QUAD и Coherent J-10MB-LE соответственно. Спектры излучения определялись с помощью волоконно-оптического спектрометра Ocean Optics USB2000+UV-VIS.

Усиленное излучение Nd³⁺:YAG-лазера преобразовывалось в излучение второй гармоники (522 нм), энергия которой достигала 7.5 мДж, затем в четвертую гармонику (266 нм) с энергией до 1.5 мДж. Для генерации этих гармоник использовались кристаллы ВВО с преобразованием первого типа синхронизма. Нестабильность излучения по энергии составляла $\pm 5\%$. Дальнейшее преобразование излучения в излучение с длиной волны $\lambda = 193.4$ нм реализовывалось в двухкаскадной схеме.

В первом каскаде излучение второй гармоники преобразовывалось в параметрическом генераторе бегущей волны на трех последовательно расположенных кристаллах ВВО с апертурой 6×7 мм и длиной 15 мм каждый, вырезанных под углом, близким к углу коллинеарного фазового синхронизма $\theta = 21.2^\circ$ (преобразование первого типа синхронизма). Сигнальное излучение параметрического генератора настраивалось на длину волны $\lambda_s = 708$ нм. Использование трех кристаллов в параметрическом генераторе позволило, в частности, частично компенсировать относительно большой пространственный снос луча (0.8 мм на длине 15 мм), ограничивающий эффективность преобразования, и обеспечить усиление сигнальной волны. Параметрическая суперлюминесценция, возбужденная в первом кристалле, была широкополосной (более 20 нм). Для уменьшения спектральной ширины линии осуществлялась пространственно-частотная фильтрация за счет увеличения расстояния между третьим и вторым кристаллами (100 см) с компенсацией апертурных эффектов. В эксперименте получено излучение на длине волны 708 нм (с возможностью плавной перестройки от 665 до 850 нм) с шириной на уровне половины амплитуды сигнала 3.6 нм и энергией до 1.5 мДж. Эффективность преобразования энергии излучения второй гармоники в сигнальную волну составила 20%.

Во втором каскаде осуществлялась генерация излучения с длиной волны 193.4 нм, предназначенного для усиления в эксимерном AgF-усилителе, за счет получения суммарной частоты при нелинейно-оптическом смешении сигнальной волны параметрического генератора (708 нм) с излучением четвертой гармоники лазера (266 нм) в кристалле ВВО (апертура 5×7 мм, длина 5 мм, вырезан под углом, близким к углу синхронизма 75.8°). Измеренный коэффициент пропускания кристалла ВВО на длине волны 193 нм составил только 15% (соответствующий коэффициент поглощения равен 3.8 см^{-1} , тогда как в работе [22] он равен 1.39 см^{-1} , а в работе [18] – 1.15 см^{-1}). Совмещение по времени в кристалле ВВО₆ импульсов излучения четвертой гармоники и параметрического генерато-

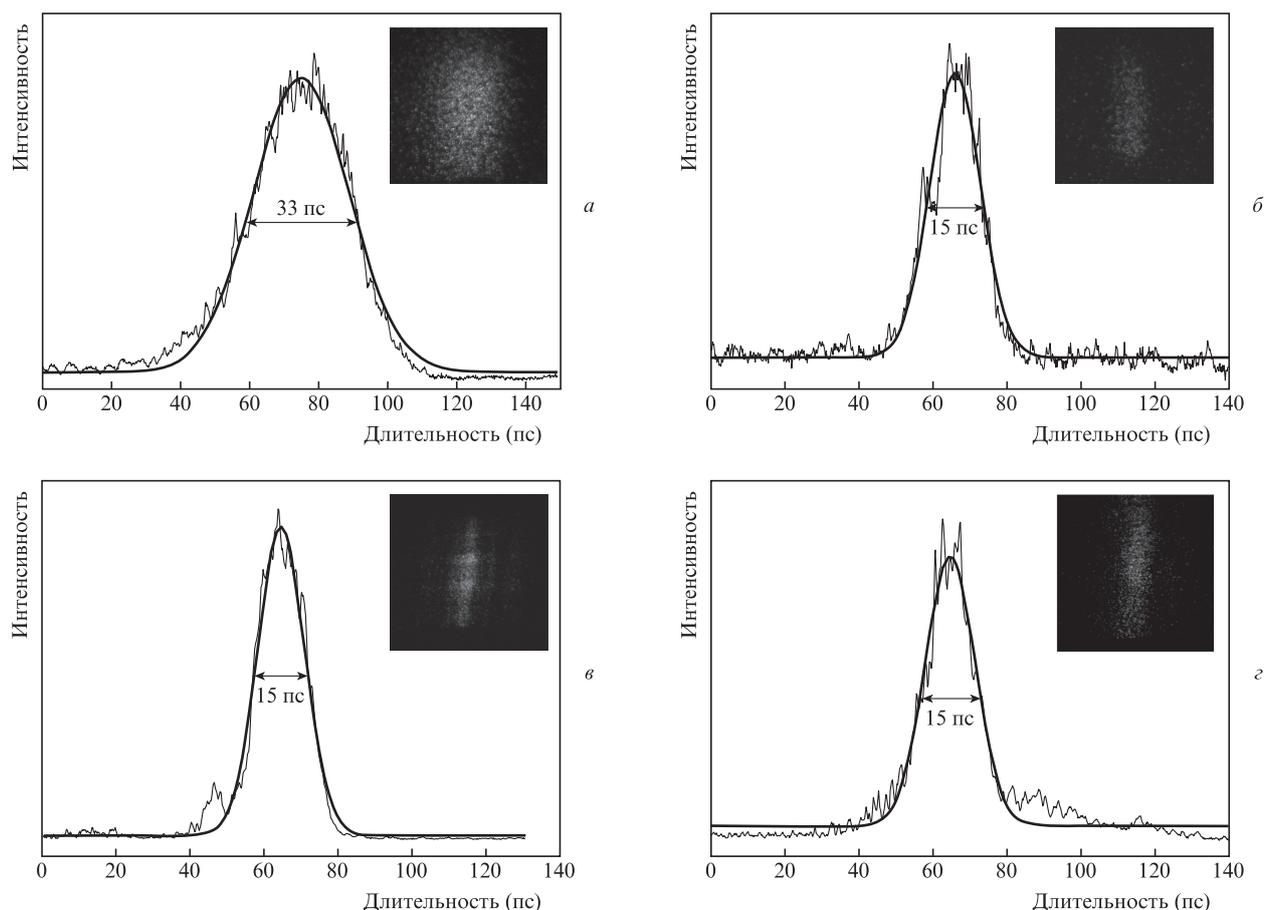


Рис.2. Зарегистрированные ЭОК импульсы излучения: задающего генератора (а), на входе усилителя (193 нм) (б), на выходе усилителя (193 нм) в однопроходной (в) и трехпроходной схеме (з).

ра осуществлялось с помощью линии оптической задержки. При смешении излучения с длиной волны 708 нм и энергией 0.7 мДж (диаметр пучка 2.2 мм) с излучением с $\lambda = 266$ нм и энергией 0.9 мДж (диаметр пучка 1.7 мм) были получены импульсы УФ излучения (193 нм) с энергией до 7 мкДж. Измеренная длительность УФ импульса составила 14–16 пс (рис.2,б).

Пикосекундные УФ импульсы с энергией 0.3 мкДж (диаметр пучка 6 мм) поступали в эксимерный ArF-усилитель CL 7000 (ООО «Оптосистемь»). Параметры усилителя: объем разрядного промежутка $\sim 7 \times 2 \times 100$ см, давление 2.6 атм, напряжение разряда 25 кВ, длительность разряда 45 нс, время запуска модуля ~ 1 мкс при нестабильности ± 2 нс. В качестве окон ArF-усилителя использовались пластины из CaF_2 , повернутые на угол, достаточный для подавления паразитной генерации за счет френелевского отражения. Синхронизация задающего генератора осуществлялась четырехканальным цифровым генератором импульсов DG535 (Stanford Research Systems).

В однопроходном режиме работы получен коэффициент усиления 10^3 при плотности энергии в пятне ~ 0.4 мДж/см² (что согласуется с результатами работы [18]) и длительности выходного импульса 14–16 пс (рис.2,в).

В трехпроходной схеме усилителя дискриминация паразитного фонового излучения в тракте второго и третьего проходов обеспечивалась апертурными диафрагмами. Выходное излучение (энергия в импульсе до 1.5 мДж, длительность 14–16 пс (рис.2,з)) «очищалось» пространственным фильтром, образованным телескопом и диафрагмой.

Использованная трехпроходная схема усиления позволила снизить вклад энергии суперлюминесценции в полную энергию импульса до приемлемого (не более 10%) уровня. Измеренный с помощью ЭОК контраст по интенсивности составил 70–150, такой разброс обусловлен нестабильностью синхронизации слабого входного сигнала и импульса накачки эксимерного усилителя (измерялась интенсивность пикосекундного усиленного импульса, суперлюминесценции и фона).

3. Результаты

В заключение отметим преимущества созданной системы: затравочный импульс ($\lambda = 193$ нм) создается с использованием одного твердотельного $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ -лазера; пикосекундные УФ импульсы синхронизованы с мощными пикосекундными импульсами видимого и ИК диапазона; дополнительные оптические элементы для поворота поляризации при нелинейно-оптических преобразованиях не используются. На выходе ArF-усилителя получены УФ импульсы длительностью 15 пс с энергией до 1.5 мДж и частотой следования 2 Гц. Вклад суперлюминесценции в полную энергию импульса не превышал 10%. Измеренный контраст по интенсивности составил 70–150. Эффективность преобразования энергии основного излучения (1064 нм) в излучение затравочного импульса (193 нм) была $\sim 0.03\%$.

Авторы выражают благодарность В.И.Лозовому за предоставление ЭОК и обсуждение полученных результатов.

1. Larciprete R., Borsella E. *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, **76**, 607 (1995).
2. Zhao Z., Jose G., Steenson P., Bamiedakis N., Penty R.V., White I.H., Jha A. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44** (9), 095501 (2011).
3. Jacob J.J., Merriam A.J. Proc. *24th Annual Vacus Symposium on Photomask Technology* (Bellingham: SPIE Int. Soc. Opt. Eng., 2004).
4. Wight C.A., Leone S.R. *J. Chem. Phys.*, **78** (8), 4875 (1983).
5. Haight R., Bokor J., Stark J.S., Storz R.H., Freeman R.R., Bucksbaum P.H. *Phys. Rev. Lett.*, **54**, 1302 (1983).
6. Лазарев Ю.Н., Петров П.В. *ЖЭТФ*, **115** (5), 1689 (1999).
7. Попов В.В. *УФН*, **147** (3), 587 (1985).
8. Maeda M., Mizunami T., Sato A., Uchino O., Miyazoe Y. *Appl. Phys. Lett.*, **36** (8), 636 (1980).
9. Ахманов С.А., Вальшин А.М., Гордиенко В.М., Джидоев М.С., Краюшкин С.В., Платоненко В.Т., Попов В.К. *Квантовая электроника*, **11** (10), 1897 (1984).
10. Egger H., Luk T.S., Boyer K., Muller D.F., Pummer H., Srinivasan T., Rhodes C.K. *Appl. Phys. Lett.*, **41** (11), 1032 (1982).
11. Ringling J., Kittelmann O., Noack F. *Opt. Lett.*, **17** (24), 1794 (1992).
12. Horn I., Gunther D., Guillong M. *Spectrochim. Acta B*, **58**, 1837 (2003).
13. Guillong M., Horn I., Günther D. *J. Anal. Atom. Spectrom.*, **18** (10), 1224 (2003).
14. Бхар Дж.К., Чаттерджи У., Рудра А.М., Кумбхакар П. *Квантовая электроника*, **28** (3), 245 (1999).
15. Bhar G.C., Kumbhakar P., Chatterjee U., Rudra A.M., Nagahori A. *Opt. Commun.*, **176** (1–3), 199 (2000).
16. Mirov S.B., Fedorov V.V., Voczar V., Frost R., Pryor V. *Opt. Commun.*, **198** (4–6), 403 (2001).
17. Sakuma J., Deki K., Finch A., Ohsako Y., Yokota T. *Appl. Opt.*, **39** (30), 5505 (2000).
18. Tomov I.V., Anderson T., Rentzepis P.M. *Appl. Phys. Lett.*, **61** (10), 1157 (1992).
19. Hatten D.L., Cui Y., Hill W.T., Mikes T., Goldhar J. *Appl. Opt.*, **31** (33), 7042 (1992).
20. Glowina J.H., Kaschke M., Sorokin P.P. *Opt. Lett.*, **17** (5), 337 (1992).
21. Tunnermann A., Momma C., Mossavi K., Windolph C., Welleghausen B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (4), 1233 (1993).
22. Kouta H., Kuwano Y. *Opt. Lett.*, **24** (17), 1230 (1999).
23. Zhang F.F., Yang F., Zhang S.J., Xu Z., Wang Z.M., Xu F.L., Peng Q.J., Zhang J.Y., Wang X.Y., Chen C.T., Xu Z.Y. *Chin. Phys. B*, **22** (6), 3 (2013).
24. Ringling J., Korn G., Squier J., Kittelmann O., Noack F. *Opt. Lett.*, **18** (23), 2035 (1993).
25. Kasamatsu T., Tsunekane M., Sekita H., Morishige Y., Kishida S. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (23), 3396 (1995).
26. Kachynski A.V., Orlovich V.A., Bui A.A., Kopachevsky V.D., Kudryakov A.V., Kiefer W. *Opt. Commun.*, **218** (4–6), 351 (2003).
27. Almasi G., Szatmari S., Simon P. *Opt. Commun.*, **88** (2), 231 (1992).
28. Barr J.M., Everall N.J., Hooker C.J., Ross I.N., Shaw M.J., Toner W.T. *Opt. Commun.*, **66** (2), 127 (1988).
29. Гаранин С.Г., Бельков С.А., Рогожников Г.С., Рукавишников Н.Н., Романов В.В., Воронич И.Н., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Щелев М.Я. *Квантовая электроника*, **44** (8), 798 (2014).
30. Агеева Н.Н., Броневова И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносос А.Н., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Щелев М.Я. *ИТЭ*, **4**, 108 (2011).