

Мощный импульсный иттербиевый волоконный лазер с энергией импульса 10 мкДж

А.И.Трикшев, В.А.Камынин, В.Б.Цветков, О.Н.Егорова

Представлена полностью волоконная импульсная лазерная система, излучающая на длине волны 1093 нм со средней выходной мощностью до 10 Вт. Система собрана по схеме задающий генератор/волоконный усилитель. Генерация импульсов осуществлялась при помощи пассивной синхронизации мод за счет нелинейного вращения поляризации в стандартном одномодовом волокне. Накачка главного волоконного усилителя осуществлялась полупроводниковыми лазерными диодами с волоконным выходом на длине волны 976 нм с максимальной суммарной мощностью до 50 Вт. Измеренная длительность импульсов была не более 60 пс при частоте следования около 1 МГц. Энергия в импульсе составила 10 мкДж.

Ключевые слова: импульсный волоконный лазер, нелинейное вращение поляризации, фазовая синхронизация мод.

1. Введение

Лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) находят широкое применение во многих областях науки и технологии. Особое место они занимают в медицине [1, 2]. Волоконные лазеры УКИ являются альтернативой твердотельным лазерам, т.к. они дешевы, надежны и просты в изготовлении.

Для осуществления стабильного импульсного режима генерации УКИ используют внутррезонаторные нелинейные модуляторы интенсивности излучения, обеспечивающие пассивную синхронизацию мод лазера [3, 4]. Такими модуляторами могут быть зеркала с полупроводниковым насыщающимся поглотителем (SESAM) [5, 6], насыщающиеся поглотители на основе одностенных углеродных нанотрубок [7], нелинейные волоконные зеркала [8], модуляторы на основе эффекта нелинейного вращения эллипса поляризации [9]. У каждого из этих методов есть свои преимущества и недостатки. Модуляторы на основе SESAM относительно дороги и часто выходят из строя при больших мощностях генерации, но системы, использующие их, имеют наилучшую стабильность. Нанотрубки также демонстрируют хорошую стабильность работы, но они деградируют со временем. Модуляторы на основе нелинейных зеркал и эффекта нелинейного вращения поляризации имеют минимальную стои-

мость, но их работоспособность сильно зависит от окружающих условий, что, однако, можно исправить, если использовать волокна с сохранением поляризации [10, 11].

В настоящей работе продемонстрирована полностью волоконная импульсная лазерная система, созданная на основе лазера с кольцевым резонатором, в котором пассивная синхронизация мод осуществляется за счет эффекта нелинейного вращения поляризации, и нескольких каскадов волоконных усилителей, использующих активное иттербиевое волокно. Энергия импульса на выходе системы составила около 10 мкДж при частоте следования 1 МГц, измеренная длительность импульса была не более 60 пс.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Лазер выполнен по схеме задающий генератор/система волоконных усилителей [12]. Задающий генератор I представлял собой кольцевой импульсный лазер, модуляция излучения которого осуществлялась посредством нелинейного вращения поляризации. В качестве активной среды использовалось активное иттербиевое волокно с многоэлементной первой оболочкой (GTWave) [13]. Диаметр активной сердцевины был равен 6 мкм, диаметр оболочки – 125 мкм. Апертура активной сердцевины $NA = 0.11$. Коэффициент поглощения на длине волны накачки $\lambda_p = 976$ нм составил 0.8 дБ/м. Длина активного волокна была 5 м. Накачка осуществлялась полупроводниковым лазерным диодом ($\lambda_p = 976$ нм). Для получения частоты следования импульсов генерации 1 МГц в резонатор включалась волоконная линия задержки (ВЗ) на основе одномодового волокна длиной около 180 м. Общая длина резонатора составила около 200 м. Для подстройки рабочего режима задающего генератора использовались волоконные контроллеры поляризации (ВКП). Вывод излучения из резонатора осуществлялся волоконным ответвителем 9/1, причем «слабое» плечо ответвителя возвращало часть мощности обратно в резонатор. Средняя выходная мощность на выходе задающего генератора

А.И.Трикшев, В.А.Камынин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Ульяновский государственный университет, Россия, 432017 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42; Лаборатория фотоники Пермского научного центра Уро РАН, Россия, 614990 Пермь, ул. Ленина, 13а; e-mail: trikshvegpi@gmail.com

В.Б.Цветков. 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

О.Н.Егорова. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 30 сентября 2016 г., после доработки – 21 октября 2016 г.

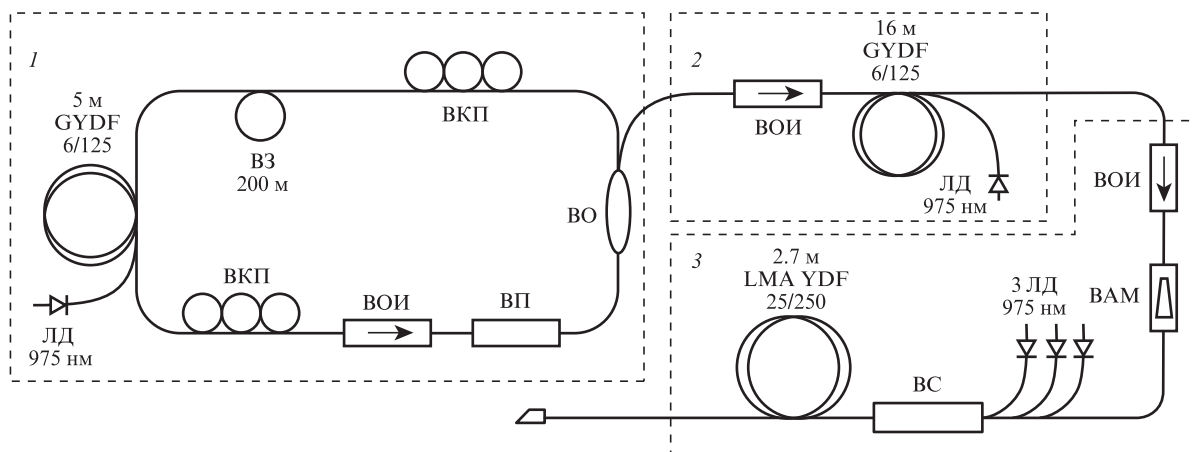


Рис.1. Экспериментальная установка:

1 – задающий генератор; 2 – предусилитель, 3 – усилитель; GYDF – иттербиевое GTWave-волокно; LMA YDF – иттербиевое активное волокно с большой площадью моды; B3 – волокно задержки; BKP – волоконный контроллер поляризации; BOI – волоконный оптический изолятор; BP – волоконный поляризатор; BO – волоконный ответвитель; LD – лазерный диод накачки; BAM – волоконный адаптер моды (коническое волокно); BC – волоконный сумматор.

составляла 10 мВт, что соответствует энергии импульса 9 нДж.

Волоконный предусилитель 2 представлял собой активное иттербиевое GTWave-волокно длиной 16 м, которое накачивалось полупроводниковым лазерным диодом с $\lambda_p = 976$ нм. Для предотвращения попадания мощности предусилителя обратно в задающий генератор перед ним устанавливался волоконный оптический изолятор (ВОИ). Средняя выходная мощность на выходе предусилителя составила 350 мВт, что соответствует энергии импульса 318 нДж.

Мощный волоконный усилитель 3 был выполнен на основе активного иттербиевого волокна с большой площадью моды [14], с диаметром сердцевины 25 мкм ($NA = 0.07$) и диаметром оболочки 250 мкм ($NA = 0.46$). Коэффициент поглощения на длине волны 976 нм составил 10 дБ/м. Длина активного волокна была 2.7 м. Для согласования апертур волокон предусилителя 2 и мощного усилителя 3 применялся волоконный модовый адаптер, представляющий собой коническое волокно с плавно меняющимся по длине волокна диаметром сердцевины. В качестве источника накачки использовались три многомодовых лазерных диода суммарной мощностью до 50 Вт. Излучение накачки подавалось с помощью волоконного сумматора $(6 + 1) \times 1$ (три входа оставались незадействованными). К выходному торцу активного волокна приваривался отрезок пассивного волокна длиной 20 см. Для вывода непоглощенной мощности накачки место сварки с пассивным волокном покрывалось выводящим излучение полимером. С целью предотвращения обратного отражения выходной торец пассивного волокна был сколот под углом 8° . При мощности излучения накачки 48 Вт средняя мощность на выходе системы составила 10 Вт, что соответствует энергии импульса 10 мкДж.

3. Экспериментальные результаты

Спектр излучения задающего генератора при мощности выходного излучения 10 мВт, представленный на рис.2, соответствует спектру стохастических импульсов [15]. Пик лазерной генерации приходится на длину волны 1093 нм. На спектре по уровню -12 дБ относительно пика генерации виден пик на длине волны 1143 нм, соответ-

ствующий 1-й стоксовой компоненте ВКР в кварцевом стекле [16]. Впервые подобный пик в спектре полностью волоконного лазера с модуляцией добротности на нелинейном вращении поляризации наблюдался в работе [17], при этом энергия в лазерном импульсе составляла 20 нДж.

Осциллограмма импульса излучения в режиме стабильной генерации приведена на рис.3. Измеренная на осциллографе с полосой 16 ГГц длительность импульсов по полувысоте составила около 60 пс при частоте следования около 1 МГц. Отрицательный выброс сигнала на осциллограмме обусловлен переходной характеристикой электрического тракта от фотодиода до осциллографа. Энергия в импульсе составила 9 нДж.

При мощности накачки предусилителя около 3 Вт мощность излучения на его выходе достигала 350 мВт, а энергия в импульсе увеличилась до 318 нДж. Спектры излучения волоконного предусилителя при различных мощностях накачки, нормированные на максимальное значение, показаны на рис.4. Видно, что при увеличении мощности накачки до 2 Вт интенсивность пика 1-й стоксовой компоненты сначала уменьшается относительно основного пика генерации, а затем возрастает. Уменьшение относительной интенсивности пика связано с тем, что при малых мощностях сигнала основным механизмом формирования профиля его спектра является линейное усиление. В использованном нами волокне наиболее эффективно усиливаются длины волн, близкие к 1090 нм. Уве-

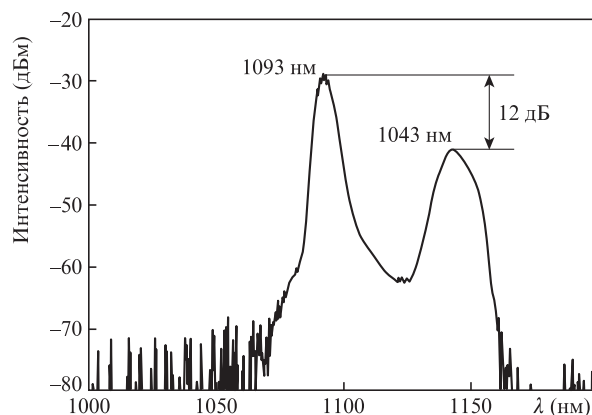


Рис.2. Спектр выходного излучения задающего генератора.

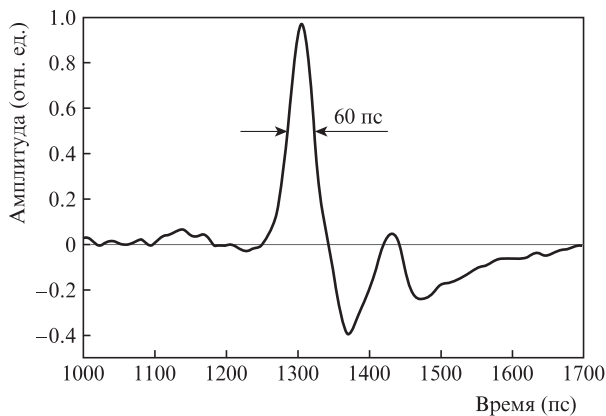


Рис.3. Оциллограмма импульса излучения задающего генератора.

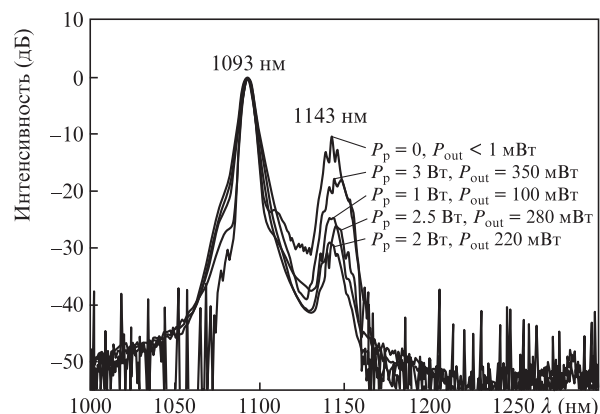


Рис.4. Спектры выходного излучения предусилителя при различных мощностях накачки P_p .

личение интенсивности пика связано с ростом мощности сигнала и, как следствие, с увеличением вклада нелинейных эффектов, в данном случае ВКР.

На рис.5 представлены графики зависимости мощности выходного излучения основного усилителя от мощности его накачки. Видно, что для получения наибольшей эффективности при данной длине активного волокна необходимо использовать накачку с длиной волны, попадающей точно в пик поглощения активного волокна (975 нм). При мощности накачки 48 Вт выходная средняя мощность составила 10 Вт, что соответствует энергии в импульсе 10 мкДж при дифференциальной эффективности $\eta = 27\%$.

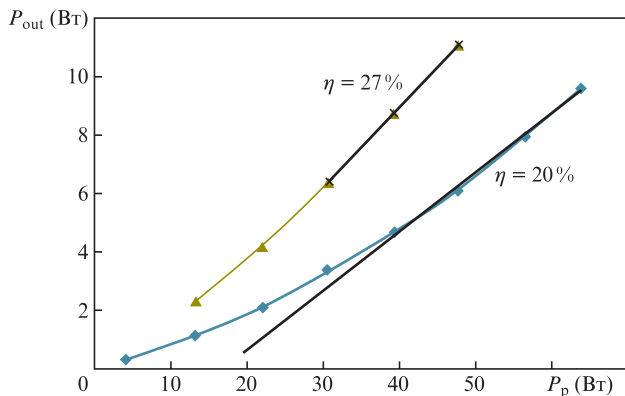


Рис.5. Зависимость мощности выходного излучения от мощности и длины волны накачки (η – дифференциальная эффективность).

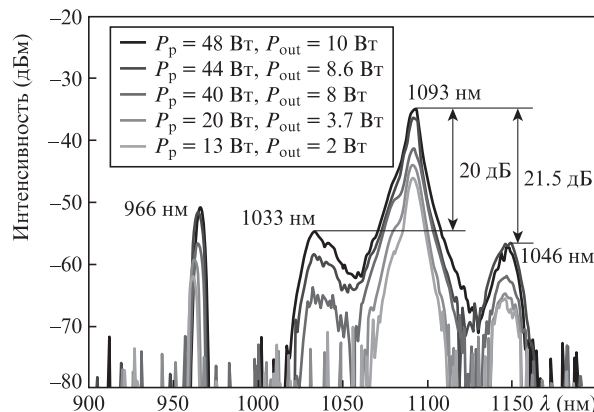


Рис.6. Спектры выходного излучения на выходе системы при различных мощностях накачки P_p .

Спектры выходного излучения при различной мощности накачки основного усилителя приведены на рис.6. На спектре, кроме основного пика генерации и пика, соответствующего 1-й стоксовой компоненте ВКР, также видны пик излучения непоглощенной накачки (966 нм) и пик на 1033 нм, соответствующий усиленной спонтанной люминесценции. Интегрирование мощности по спектру показало, что в основном пике генерации сосредоточено около 95% всей выходной мощности. Оциллограмма импульсов на выходе системы в режиме стабильной генерации представлена на рис.7. Измеренная длительность импульсов по полувысоте составила около 60 пс.

Итак, создан полностью волоконный импульсный лазер с пассивной модуляцией добротности на эффекте нелинейного вращения поляризации на основе кварцевого волокна, работающий в спектральной области ~ 1 мкм. Продемонстрировано усиление импульсов в активном световоде с многокомпонентной оболочкой с дифференциальной эффективностью 27%. В полностью волоконной схеме получена генерация импульсов длительностью 60 пс импульсов с частотой следования около 1 МГц и энергией в импульсе до 10 мкДж при средней мощности 10 Вт на длине волны 1093 нм.

Авторы выражают благодарность А.Е.Левченко и В.В.Вельмискину за вытяжку конического световода, который использовался в качестве адаптера поля моды.

Работа выполнена при поддержке РАН в рамках программы фундаментальных исследований «Основные и прикладные проблемы фотоники и науки о новых оптических материалах» и Минобрнауки РФ (проект № 14.Z50.31.0015).

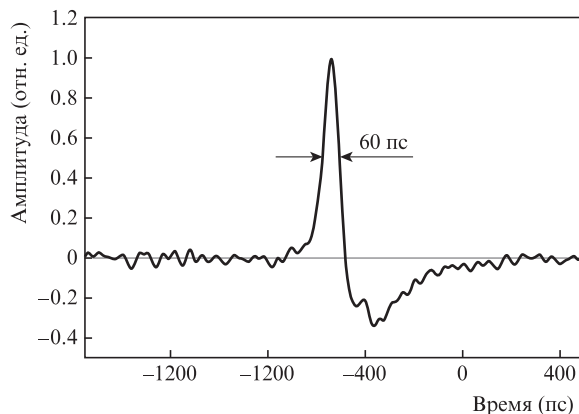


Рис.7. Оциллограмма импульса излучения на выходе системы.

1. Pierce M.C., Jackson S.D., Golding P.S., Dickinson B., Dickinson M.R., King T.A., Sloan P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4253**, 144 (2001).
2. Jin L., Jiang F., Dai N., Peng J., Hu M., He S., Fang K., Yang X. *Opt. Express*, **23** (17), 22012 (2015).
3. Fermann M.E., Galvanauskas A., Sucha G., Harter D. *Appl. Phys. B*, **65**, 259 (1997).
4. Турицын С.К., Розанов Н.Н., Яругкина И.А., Беднякова А.Е., Фёдоров С.В., Штырина О.В., Федорук М.П. *УФН*, **186** (7), 713 (2016).
5. Крылов А.А., Чернышева М.А., Черных Д.С., Сенаторов А.К., Тупицын И.М., Крюков П.Г., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **42** (5), 426 (2012).
6. Song R., Chen H.W., Chen S.P., Hou J., Lu Q.S. *J. Opt.*, **13** (3), 035201 (2011).
7. Wang J., Liang X., Hu G., Zheng Z., Lin S., Ouyang D., Xu Wu, Yan P., Ruan S., Sun Z., Hasan T. *Sci. Rep.*, **6**, 28885 (2016).
8. Duling I.N., Chen C.J., Wai P.K.A., Menyuk C.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1), 194 (1994).
9. Liu X. *Opt. Express*, **17** (12), 9549 (2009).
10. Senoo Y., Nishizawa N., Sakakibara Y., Sumimura K., Itoga E., Kataura H., Itoh K. *Opt. Express*, **17** (22), 20233 (2009).
11. Jia Yu, Ye Feng, Cai Y., Li X., Hu X., Wei Zhang, Duan L., Yang Z., Wang Y., Liu Y., Wei Zhao. *Opt. Express*, **24** (15), 16630 (2016).
12. Андрианов А.В., Анашкина Е.А., Муравьев С.В., Ким А.В. *Квантовая электроника*, **43** (3), 256 (2013).
13. Буфетов И.А., Бубнов М.М., Мелькумов М.А., Дудин В.В., Шубин А.В., Семенов С.Л., Кравцов К.С., Гурьянов А.Н., Яшков М.В., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 328 (2005).
14. Brodericka N.G.R., Offerhaus H.L., Richardson D.J., Sammuta R.A., Caplena J., Donga L. *Opt. Fiber Technol.*, **5**, 185 (1999).
15. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Turitsyn S., Latkin A. *Opt. Express*, **17** (23), 20707 (2009).
16. Wang Y., Xu Ch.-Q. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6343**, 634310 (2006).
17. Kharenko D.S., Podivilov E.V., Apolonski A.A., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **37**, 4104 (2012).