

Фемтосекундная лазерная система с импульсной накачкой генератора и усилителя при использовании одного силового блока

С.А. Тихомиров

Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
пр-т Независимости, 68, Минск 220072, Беларусь

Поступила 28.01.2021

Принята к печати 01.03.2021

Уже на протяжении нескольких десятилетий развитие методов генерации сверхкоротких импульсов является самостоятельной актуальной научно-технической задачей. Идёт постоянное совершенствование как способов получения импульсов, так и методов их использования. Целью данной работы являлось исследование возможности реализации согласованной работы двух принципиально разных типов лазеров накачки фемтосекундного генератора и усилителя на одном одноламповом квантроне и создание на этой основе компактной мощной фемтосекундной лазерной системы с импульсной накачкой и одним силовым блоком.

Осуществлена практическая реализация на одном квантроне с двумя активными элементами и одной лампой накачки двух типов импульсных лазеров (нано- и пикосекундного, работающих, соответственно, в режиме модулированной добротности и синхронизации мод). Получены требуемая синхронизация во времени момента формирования импульса накачки фемтосекундного усилителя и области квазистационарной генерации импульсов в выходном излучении фемтосекундного Ti:сапфирового генератора и необходимые взаимосогласованные энергетические параметры выходного излучения лазеров накачки фемтосекундного генератора и усилителя.

На этой основе разработана компактная импульсная моноблочная лазерная система, способная обеспечить генерацию фемтосекундных импульсов длительностью 50–150 фс с энергией до 1 мДж и достаточно высокой частотой повторения импульсов (вплоть до 1 кГц, что определяется типом используемых квантрона и блока накачки). В лазерной системе использована компактная совмещённая схема стретчера-компрессора с одной общей дифракционной решёткой.

Лазерные системы подобного типа, характеризующиеся относительно низкой стоимостью за счёт использования одного силового блока питания для одновременной накачки усилителя и генератора, а также более низкими требованиями к качеству оптических элементов и условиям эксплуатации благодаря импульсному режиму работы, представляются достаточно практичными. Они могут найти применение как в научных исследованиях в области сверхскоростной кинетической спектроскопии и нелинейной оптике, так и в многочисленных технических приложениях, в частности в прецизионной обработке материалов, как оптические имитаторы воздействия тяжёлых заряженных частиц при проведении испытаний радиационной стойкости интегральных микросхем и электронных модулей.

Ключевые слова: фемтосекундные лазеры, импульсная синхронная накачка, гибридная синхронизация мод.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-23-29

Адрес для переписки:

Тихомиров С.А.
Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси,
пр-т Независимости, 68, Минск 220072, Беларусь
e-mail: s.tik@ifanbel.bas-net.by

Address for correspondence:

Tikhomirov S.A.
B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy
of Sciences of Belarus,
Nezavisimosty Ave., 68, Minsk 220072, Belarus
e-mail: s.tik@ifanbel.bas-net.by

Для цитирования:

С.А. Тихомиров.
Фемтосекундная лазерная система с импульсной накачкой генератора
и усилителя при использовании одного силового блока.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 4. – С. 23–29.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-23-29

For citation:

S.A. Tikhomirov.
[Femtosecond System with Pulse Pumping of Seed Laser
and Amplifier by Using a Single Power Unit].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 4, pp. 23–29 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-23-29

Femtosecond System with Pulse Pumping of Seed Laser and Amplifier by Using a Single Power Unit

S.A. Tikhomirov

*B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Nezavisimosty Ave., 68, Minsk 220072, Belarus*

Received 28.01.2021

Accepted for publication 01.03.2021

Abstract

For several decades development of methods for generating ultrashort pulses has been an independent urgent scientific and technical problem. There is a constant improvement both in the methods of such pulses receiving and in methods of their use. The aim of this work was to investigate the possibility of realizing the coordinated operation of two fundamentally different types of pump lasers for the femtosecond oscillator and amplifier based on one single-lamp laser head and to create on this basis a compact high-power femtosecond system with pulsed pumping and one power unit.

The practical implementation of two types of pulsed lasers (nano- and picosecond ones operating, respectively, in Q-switch and modelock regime) on a single laser head with two active elements and one pump lamp is carried out. The required synchronization in time the pump pulse femtosecond amplifier formation and quasi-stationary region of generated pulses in the output radiation of a femtosecond Ti:sapphire is obtained.

On this basis a compact, pulse pumped monoblock laser system has been developed that can generate femtosecond pulses with a duration of 50–150 fs with an energy up to 1 mJ and a high enough pulse repetition rate (up to 1 kHz which is determined by the type of laser head and pump unit used). In the developed laser system a compact scheme of a stretcher-compressor with a single common diffraction grating is used.

Laser systems of this type characterized by a relatively low cost due to the use of a single power supply unit for simultaneous pumping of the amplifier and oscillator, as well as lower requirements for the quality of optical elements and usage conditions due to the pulse mode of operation, are quite practical and can be used both in scientific research in the field of ultra-high-speed kinetic spectroscopy and nonlinear optics, as well as in numerous technical applications, particular in the precision processing of materials, as optical simulators of the action of heavy charged particles in testing the radiation resistance of integrated circuits and electronic modules.

Keywords: femtosecond lasers, pulsed synchronous pumping, hybrid modelocking.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-23-29

Адрес для переписки:

Тихомиров С.А.
Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси,
пр-т Независимости, 68, Минск 220072, Беларусь
e-mail: s.tik@ifanbel.bas-net.by

Address for correspondence:

Tikhomirov S.A.
B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy
of Sciences of Belarus,
Nezavisimosty Ave., 68, Minsk 220072, Belarus
e-mail: s.tik@ifanbel.bas-net.by

Для цитирования:

С.А. Тихомиров.
Фемтосекундная лазерная система с импульсной накачкой генератора
и усилителя при использовании одного силового блока.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 4. – С. 23–29.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-23-29

For citation:

S.A. Tikhomirov.
[Femtosecond System with Pulse Pumping of Seed Laser
and Amplifier by Using a Single Power Unit].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 4, pp. 23–29 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-23-29

Введение

В настоящее время фемтосекундные лазеры широко используются как для научных исследований, так и в сфере технологий. Задающий генератор практически всех современных фемтосекундных систем обычно представляет собой полностью твердотельный (волоконный) непрерывно накачиваемый лазер [1–7]. Для накачки используются либо непрерывные твердотельные лазеры, либо прямая диодная накачка. Существует также, реализованный нами [8], метод генерации фемтосекундных импульсов при синхронной накачке титан-сапфирового лазера второй гармоникой импульсного Nd:YAG лазера с гибридной синхронизацией мод. На основе данного оригинального генератора фемтосекундных импульсов был создан фемтосекундный спектрометр [9], успешно эксплуатируемый в Институте физики НАН Беларуси уже на протяжении достаточно длительного времени. Система характеризуется относительно низкой стоимостью, естественной совместимостью генератора и усилителя, работающих в импульсном режиме с одинаковой частотой повторения, простотой в обслуживании.

Во всех предыдущих схемах реализации метода использовались два независимых импульсных Nd:YAG лазера: пикосекундный лазер с гибридной синхронизацией мод для синхронной накачки фемтосекундного титан-сапфирового генератора и моноимпульсный, работающий в режиме модуляции добротности и генерирующий наносекундные импульсы для накачки фемтосекундного усилителя. В то же время привлекательной представлялась идея организации работы двух принципиально разных типов лазеров на одном квантроне с двумя активными элементами и одной лампой накачки. В виду различных режимов работы данных лазеров и необходимости при этом одновременно обеспечить согласованные амплитудные и временные параметры генерируемых ими импульсов с требуемой синхронизацией во времени это являлось самостоятельной задачей, требующей экспериментальной проверки возможности её решения. В случае положительного результата предоставлялась возможность существенно упростить всю систему, снизить стоимость и, соответственно, повысить коммерческую привлекательность данного метода генерации фемтосекундных импульсов. Конечной целью работы было создание на этом принципе фемтосекундной лазерной системы.

Основная часть

На рисунке 1 приведена оптическая схема разработанной фемтосекундной лазерной системы. В квантроне размещены два активных цилиндрических элемента (Nd:YAG), одновременно накачиваемые одной импульсной лампой. В состав лазера накачки (II) фемтосекундного генератора входит активный элемент с размерами 5×60 мм, 2 плоских «глухих» зеркала, линза ($f = 14$ см), размещённая перед концевым глухим зеркалом, электронно-оптическая схема отрицательной обратной связи, выходное зеркало на клиновидной подложке с коэффициентом отражения 35 %, а также зеркало с насыщающимся поглотителем (*SESAM*), обеспечивающее совместно с электрооптическим затвором гибридную синхронизацию мод. Общая база резонатора ≈ 150 см. Линза устанавливается таким образом, чтобы обеспечить работу лазера вблизи внешней границы области стабильности на нулевой поперечной моде. Изменяя положение зеркала *SESAM* вдоль оси резонатора, можно регулировать интенсивность внутрирезонаторного поля в области насыщающего поглотителя. Оптимальное положение данного зеркала подбирается экспериментально.

Ключевую роль в обеспечении требуемого режима генерации играет электрооптическая отрицательная обратная связь (ООС). Она образована поляризатором, электрооптическим кристаллом и электронной схемой с быстрым фотодиодом. Обратная связь вносит потери, пропорциональные световому полю внутри резонатора. В результате интенсивность поля внутри активной среды ограничивается на заданном уровне. Запасённая инверсия расходуется за более длительное время, в течение которого происходит дополнительная подкачка инверсии населённости в активном кристалле. В результате, время непрерывной генерации увеличивается до требуемых 50–80 мкс, причём данное время легко регулируется глубиной обратной связи. Вторая функция ООС – регенеративная синхронизация мод. Поскольку ООС срабатывает на периодический сигнал внутри резонатора (шумовой выброс), она создаёт потери с периодом, равным времени обхода по резонатору. Для обеспечения синхронизации мод необходимо, чтобы воздействие обратной связи происходило в нужной фазе, что достигается либо подбором длины резонатора, либо изменением задержки прихода оптического сигнала на фотодиод. Длительность импульсов,

полученных с помощью регенеративной синхронизации мод, составляет несколько сотен пикосекунд. Нелинейный фильтр позволяет сократить

длительность генерируемых импульсов до десятков пикосекунд и повысить эффективность преобразования излучения во вторую гармонику.

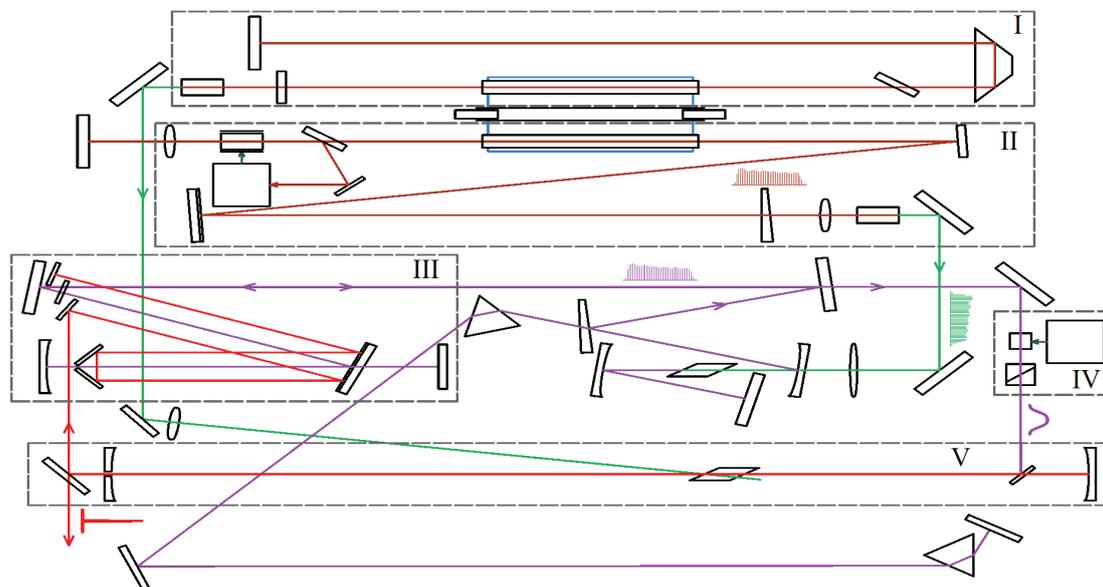


Рисунок 1 – Оптическая схема фемтосекундной лазерной системы: I – наносекундный лазер накачки усилителя; II – пикосекундный лазер накачки фемтосекундного генератора; III – стретчер-компрессор; IV – схема выделения одиночного импульса; V – многопроходный усилитель

Figure 1 – Optical scheme of a femtosecond laser system: I – nanosecond pump laser of the amplifier; II – picosecond pump laser of the femtosecond generator; III – stretcher-compressor scheme; IV – single pulse extraction circuit; V – multi-pass amplifier

С оптимизированными параметрами резонатора, обратной связи и накачки Nd:YAG лазер генерирует высокостабильные цуги пикосекундных импульсов на длине волны 1,054 мкм общей длительностью до 60 мкс и энергией порядка 3 мДж, способные обеспечить энергию второй гармоники в цуге (рисунок 2а), оптимальную для синхронной накачки фемтосекундного генератора. Частота повторения циклов генерации составляла 10 Гц.

Резонатор фемтосекундного генератора образован четырьмя плоскими и двумя сферическими высокоотражающими в спектральной области 740–840 нм зеркалами. Квазисолитонный механизм формирования фемтосекундных импульсов обеспечивается призмной парой, создающей необходимую отрицательную дисперсию групповой скорости. Для эффективности синхронной накачки резонатор сделан сильно несимметричным. Наиболее оптимальные условия для генерации фемтосекундных импульсов создаются при работе на внешнем краю зоны стабильности. При таких параметрах резонатора наблюдает-

ся старт керровского механизма синхронизации мод и стабильная генерация фемтосекундных импульсов в квазистационарном режиме во временном диапазоне порядка 40 мкс (рисунок 2b). Вывод излучения из резонатора осуществляется с помощью тонкой клиновидной подложки.

В разработанной лазерной системе в сравнении с ранними реализациями метода использована компактная схема стретчера-компрессора фемтосекундных импульсов с одной общей дифракционной решёткой, при этом при разводке лучей в стретчере используется верхняя половина решётки, а в компрессоре – нижняя (рисунок 1, III). Таким образом, все элементы компрессора расположены ниже элементов стретчера. Кроме того, по горизонтали стретчер и компрессор также используют разные части решётки: стретчер – центральную, компрессор – боковые. В результате удаётся разместить на одной площадке оба устройства так, чтобы их оптомеханические узлы не мешали друг другу. Благодаря такой компоновке, во-первых, экономится пространство.

Во-вторых, экономятся финансовые ресурсы, так как необходим один комплект дифракционной решётки и оптомеханического крепления к ней вместо двух. Кроме того, за счёт использования одной решётки автоматически решается задача согласования решёток стретчера и компрессора.

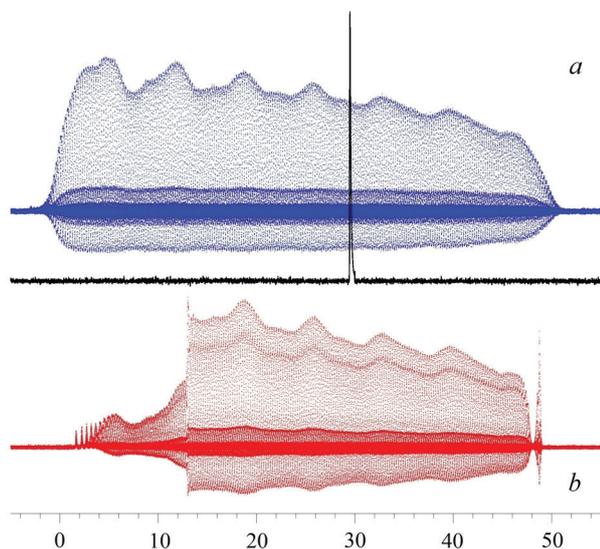


Рисунок 2 – Осциллограммы излучения второй гармоники пикосекундного лазера (а) и излучения синхронно накачиваемого титан-сапфирового лазера в режиме генерации фемтосекундных импульсов (б). Чёрная линия – осциллограмма импульса второй гармоники наносекундного лазера на гранате, накачивающей титан сапфировый усилитель

Figure 2 – Oscilloscope traces of the second harmonic radiation of a picosecond laser (a) and the radiation of a synchronously pumped titanium-sapphire laser in the femtosecond pulse generation operating mode (b). The black line is the oscillogram of the second harmonic pulse of a nanosecond Nd:YAG laser pumping the titanium sapphire amplifier

Накачка активной среды усилителя производится излучением второй гармоники наносекундного лазера (рисунок 1, I), сформированного по стандартной схеме на втором активном элементе Nd:YAG размером 6×60 , размещённом в том же квантроне, что и активный элемент пикосекундного лазера. Принципиальной задачей является синхронизация времени формирования импульса накачки усилителя с областью устойчивой генерации фемтосекундных импульсов, из которой происходит выделение усиливаемого импульса, т. е. обеспечение подачи усиливаемого импульса в многопроходный усилитель в момент создания максимальной инверсии населённости

в активном элементе, создаваемой наносекундным импульсом второй гармоники гранатового лазера. Основной возможностью осуществления такой синхронизации в нашем варианте является варьирование (уменьшение) добротности резонатора пикосекундного лазера, поскольку процесс синхронизации мод и формирования ультракоротких импульсов существенно (десятки микросекунд) в обычных условиях опережает формирование наносекундного импульса в лазере с модулированной добротностью. Для обеспечения необходимого уровня добротности использовалась плавная отстройка электрооптического кристалла ООС путём регулировки степени отклонения отражения юстировочного лазера от грани кристалла по биссектрисе прямого угла в рабочей четверти. Как оказалось, данная операция, помимо решения основной задачи – получения требуемой синхронизации во времени импульса накачки усилителя и усиливаемого фемтосекундного импульса, способствует работе всей системы отрицательной обратной связи в наиболее благоприятном линейном режиме.

На рисунке 2 приведены соответствующие осциллограммы, иллюстрирующие обеспечение требуемого согласования во времени участка квазистационарной генерации фемтосекундных импульсов и сформированного импульса накачки фемтосекундного усилителя. Область резкого увеличения амплитуды генерации на осциллограмме соответствует старту и установлению процесса синхронизации мод за счёт керровской линзы и квазисолитонного механизма.

После стретчера и схемы выделения (IV) одиночный импульс из области цуга, примерно соответствующей по положению центру участка квазистационарной генерации фемтосекундных импульсов, направляется в многопроходный усилитель (V), в котором организовано 10 проходов усиливаемого импульса через активную среду (титан-сапфировый кристалл). На рисунке 3 приведена фотография разводки лучей поступающего в усилитель излучения на выходном сферическом зеркале многопроходного усилителя. Десятый луч проходит через отверстие в зеркале.

В результате 10 разведенных в вертикальной плоскости проходов через область активной среды, накачиваемую наносекундным импульсом второй гармоники лазера на гранате с энергией порядка 7 мДж, импульс усиливается более чем в 10^6 раз и направляется в компрессор, собранный на той же дифракционной решётке,

что и стретчер. На выходе компрессора получаем одиночный фемтосекундный импульс с энергией до 1 мДж и задаваемой частотой повторения, определяемой типом используемого силового блока.

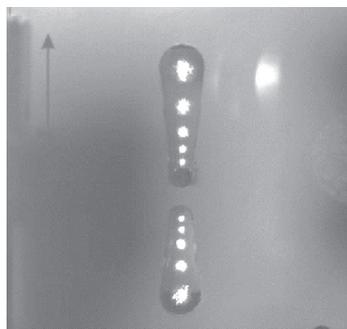


Рисунок 3 – Разводка лучей усиливаемого импульса титан-сапфирового лазера на выходном зеркале усилителя

Figure 3 – Distribution of the beams of the amplified pulse of a titanium-sapphire laser on the output mirror of the amplifier

На рисунке 4 представлен спектр и автокорреляционная функция усиленного импульса.

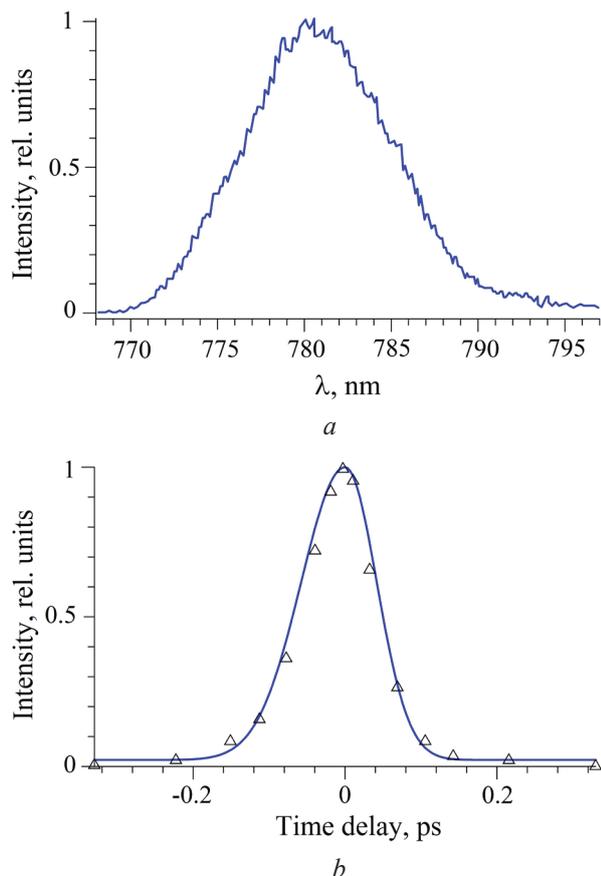


Рисунок 4 – Спектр (a) и автокорреляционная функция (b) усиленного фемтосекундного импульса

Figure 4 – Spectrum (a) and autocorrelation function (b) of the amplified femtosecond pulse

Длительность сжатого импульса составила порядка 70 фс при ширине спектра на полувысоте 10 нм.

Заключение

Разработана компактная моноблочная лазерная система, способная обеспечить генерацию фемтосекундных импульсов длительностью 50–150 фс с энергией до 1 мДж и достаточно высокой частотой повторения импульсов (вплоть до 1 кГц, что определяется типом используемых квантрона и блока накачки). Имеется возможность оперативной перестройки основной частоты в спектральном диапазоне 760–830 нм.

Фемтосекундные лазерные системы подобного типа, характеризующиеся относительно низкой стоимостью за счёт использования одного силового блока питания для одновременной накачки усилителя и генератора, а также более низкими требованиями к качеству оптических элементов и условиям эксплуатации вследствие импульсного режима работы, представляются достаточно практичными. Они могут найти применение как в научных исследованиях в области сверхскоростной кинетической спектроскопии и нелинейной оптики, так и в многочисленных технических приложениях, в частности в прецизионной обработке материалов, как оптические имитаторы воздействия тяжелых заряженных частиц при проведении испытаний радиационной стойкости интегральных микросхем и электронных модулей и др.

Список использованных источников

1. Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers / U. Keller // Nature. – 2003. – Vol. 424(6950). – Pp. 831–838.
2. Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов / П.Г. Крюков // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – С. 95–119.
3. Spence D.E., Kean P.N., Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser / D.E. Spence, P.N. Kean, W. Sibbett // Opt. Lett. – 1991. – Vol. 16, iss. 1. – Pp. 42–44.
DOI: 10.1364/OL.16.000042
4. Ell R. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser / R. Ell [et al.] // Opt. Lett. – 2001. – Vol. 26, iss. 6. – Pp. 373–375. DOI: 10.1364/OL.26.000373
5. Kisel V.E. Femtosecond pulse generation with a diode-pumped Yb³⁺:YVO₄ laser / V.E. Kisel [et al.] // Opt.

Lett. – 2005. – Vol. 30, iss. 10. – Pp. 1150–1152.

DOI: 10.1364/OL.30.001150

6. Gürel K. Green-diode-pumped femtosecond Ti:sapphire laser with up to 450 mW average power / K. Gürel [et al.] // *Optics express*. – 2015. – Vol. 23, no. 23. – Pp. 30043–30048. **DOI:** 10.1364/OE.23.030043

7. Sell A. 8-fs pulses from a compact Er: fiber system: quantitative modeling and experimental implementation / A. Sell [et al.] // *Opt. Exp.* – 2009. – Vol. 17. – P. 10.

8. Борисевич Н.А. Квантовая электроника / Н.А. Борисевич [и др.]. – 1999. – Т. 28, № 3. – С. 225–231.

9. Stsiapura V.I. Charge transfer process determines ultrafast excited state deactivation of thioflavin T in low-viscosity solvents / V.I. Stsiapura [et al.] // *J. Phys. Chem. A*. – 2010. – Vol. 114, no. 32. – Pp. 8345–8350.

DOI: 10.1021/jp105186z

References

1. Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers. *Nature*, 2003, vol. 424, pp. 831–838.

2. Kryukov P.G. [Ultrashort pulse lasers]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2001, vol. 31, no. 2, pp. 95–119 (in Russian).

3. Spence D.E., Kean P.N., Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Optics Letters*, 1991, vol. 16, iss. 1, pp. 42–44.

DOI: 10.1364/OL.16.000042

4. Ell R., Morgner U., Kärtner F.X., Fujimoto J.G., Ippen E.P., Scheuer V., Angelow G., Tschudi T.

Lederer M.J., Boiko A., Luther-Davies B. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser. *Optics Letters*, 2001, vol. 26, iss. 6, pp. 373–375. **DOI:** 10.1364/OL.26.000373

5. Kisel V.E., Troshin A.E., Shcherbitsky V.G., Kuleshov N.V., Matrosov V.N., Matrosova T.A., Kupchenko M.I., Brunner F., Paschotta R., Morier-Genoud F., Keller U. Femtosecond pulse generation with a diode-pumped Yb³⁺:YVO₄ laser. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, iss. 10, pp. 1150–1152. **DOI:** 10.1364/OL.30.001150

6. Gürel K., Wittwer V.J., Hoffmann M., Saraceno C.J., Hakobyan S., Resan B., Südmeyer T. Green-diode-pumped femtosecond Ti:sapphire laser with up to 450 mW average power. *Optics express*, 2015, vol. 23, iss. 23, pp. 30043–30048.

DOI: 10.1364/OE.23.030043

7. Sell A., Krauss G., Scheu R., Huber R., Leitenstorfer A. 8-fs pulses from a compact Er: fiber system: quantitative modeling and experimental implementation. *Optics express*, 2009, vol. 17, iss. 2, pp. 1070–1077.

8. Borisevich N.A., Buganov O.V., Tikhomirov S.A., Tolstorozhev G.B., Shkred G.L. [Passive mode locking of a femtosecond Ti:sapphire laser with pulsed synchronous pumping by a limited train of picosecond pulses]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 1999, vol. 28, no. 3, pp. 225–231 (in Russian).

9. Stsiapura V.I., Maskevich A.A., Tikhomirov S.A., Buganov O.V. Charge transfer process determines ultrafast excited state deactivation of thioflavin T in low-viscosity solvents. *J. Phys. Chem. A*, 2010, vol. 114, no. 32, pp. 8345–8350. **DOI:** 10.1021/jp105186z