



Мощный фемтосекундный лазер на сапфире с титаном с прямой диодной накачкой

С. П. Никитин, А. С. Суворина, С. А. Бабаев, П. А. Куликов, А. В. Корибут

Группа компаний «Российского Квантового Центра»

ООО «ФемтоВижн»

info@femtovision.ru

На основе спектрально-селективной схемы сведения пучков успешно осуществлена прямая диодная накачка фемтосекундного лазера на титане в сапфире. Достигнут режим пассивной синхронизации мод на Керровской нелинейности с выходной мощностью на уровне сотен милливатт. Используемая схема накачки сохраняет параметр качества пучка M^2 , обеспечивает поляризацию, близкую к линейной, и мощность до 10 Вт, что позволяет использовать ее как энергоэффективную и компактную альтернативу существующим лазерным источникам накачки титана в сапфире.

Ключевые слова: фемтосекундные лазеры, диодная накачка, ультракороткие импульсы

Статья получена: 18.07.2019. Принята к публикации: 08.08.2019.

Powerful Femtosecond Ti: Sapphire Laser with Direct Diode Pump

S. P. Nikitin, A. S. Suvorina, S. A. Babaev, P. A. Kulikov, A. V. Koribut

Group of companies of the Russian Quantum Center

FemtoVision LLC,

info@femtovision.ru

Direct diode pump of femtosecond Ti: Sapphire laser is achieved by using spectrally-selective beam combining device. Passive Kerr lens modelocking operation with average output power at several hundred milliwatt level has been demonstrated. Pump beam combining device preserves beam quality parameter M^2 , provides near-linear polarization and pump power of up to 10 W thus making this device a compact and energy efficient alternative to existing Ti: Sapphire laser pump solutions.

Keywords: femtosecond lasers, diode pumping, ultrashort pulses

Received: 18.07.2019. Accepted: 08.08.2019.

Источники лазерных ультракоротких импульсов (УКИ), имеющих длительность менее 1 пикосекунды, являются важнейшим инструментом, используемым для решения разнообразных как научных, так и прикладных задач [1]. Короткая длительность импульсов при

* *Примечание редактора:* Статья рекомендована программным комитетом конференции, проходившей в рамках специализированной выставки лазерной, оптической и оптоэлектронной техники «Фотоника. Мир лазеров и оптики. 2019».



относительно высокой их энергии определяет возможности применения инструмента для прецизионной микрообработки, эффективной генерации нелинейно-оптических процессов, позволяющих сформировать волновые пакеты с фотонами в неклассических (квантовых) суперпозиционных состояниях, достижения широкого спектрального диапазона частотных гребенок для решения задач метрологии и радиофотоники [2] и оптической обработки информации [3]. Разработанный в конце прошлого века Жераром Муру и Донной Стрикланд метод усиления таких импульсов [4] позволил достичь экстремально высоких интенсивностей лазерных полей, что еще больше расширило диапазон применений УКИ в науке и технике. За эти работы авторы [4] были удостоены Нобелевской премии по физике в 2018 году.

Титан-сапфировые лазеры представляют особый интерес, поскольку имеют исключительно широкий спектр генерации, простирающийся от 700 нм до 1100 нм и позволяющий генерировать импульсы длительностью примерно 5 фс, что существенно короче длительностей импульсов фемтосекундных лазеров, работающих на основе других лазерных сред, и составляет всего несколько оптических периодов [5]. Титан-сапфировые лазеры также позволяют реализовать плавную перестройку длины волны выходного излучения в указанном спектральном диапазоне, который близок диапазону прозрачности биологических сред [6]. Это обстоятельство позволяет использовать УКИ генерируемые титан-сапфировыми лазерами для трехмерной нелинейно-оптической микроскопии с применением целого ряда методов – спектроскопии когерентного комбинационного рассеяния, генерации оптических гармоник, а также для исследований в области оптических нейроинтерфейсов [7] и микрохирургии [8].

Несмотря на эти важные преимущества, вне научных лабораторий титан-сапфировые лазеры используются существенно реже, чем фемтосекундные лазерные источники на основе оптических волокон, легированных редкоземельными элементами, или твердотельные лазеры на вольфраматах. Причина в том, что такие типы лазеров допускают прямую диодную накачку и более практичны в работе, хотя генерируемые ими УКИ имеют большие длительности. Использование диодной накачки не только удешевляет такие лазеры в разы, но и заметно уменьшает энергопотребление, упрощает конструкцию и повышает надежность работы этих лазеров, что и обеспечивает их конкурентные преимущества.

Профиль поглощения ионов титана в сапфире находится в диапазоне от 450 нм до 550 нм, что соответствует сине-зеленой части оптического спектра. Спектроскопические особенности этой среды требуют для эффективной накачки линейно-поляризованное лазерное излучение [9-10]. В первых титан-сапфировых лазерах для накачки использовались аргоновые лазеры (длины волн 488 и 514 нм). Позднее для этой цели стали чаще использоваться непрерывные неодимовые лазеры с внутрирезонаторным удвоением частоты (527/532 нм). Также для этой цели возможно применение иттербиевых лазеров с удвоением частоты (515/530 нм). Во всех перечисленных случаях необходимость использования внешнего лазера для накачки фемтосекундного источника приводит к кратному удорожанию стоимости и усложнению механической конструкции титан-сапфировых лазерных систем.

Ситуация изменилась с появлением доступных и относительно недорогих сине-зеленых лазерных диодов [11], за разработку которых Исама Акасаки, Хироси Аmano и Сюдзи Накамура были удостоены Нобелевской премии по физике в 2014 году. Синие-зеленые лазерные диоды способны излучать на длинах волн в диапазоне 450–520 нм, что делает их потенциально пригодными для создания титан-сапфирового лазера с прямой диодной накачкой.

Исследования, выполненные рядом научных групп в США и Европе [12-15], выявили ряд трудностей, возникающих при использовании таких диодов для накачки титан-сапфировых лазеров. Помимо относительно малой мощности первых доступных диодов существенной проблемой является их относительно плохое качество пучка. Выходное излучение таких диодов трудно сфокусировать в малое пятно, что является препятствием для достижения режима пассивной синхронизации мод в титан-сапфировых лазерах, поскольку этот механизм основан на возникновении в активном элементе Керровской линзы и требует острой фокусировки как лазерной моды, так и накачки в относительно небольшую перетяжку с размером в несколько десятков микрон, чтобы обеспечить высокую интенсивность лазерного поля.

В силу этих причин первые титан-сапфировые лазеры с диодной накачкой для достижения синхронизации мод требовали размещения вспомогательного насыщающегося поглотителя в резонаторе, а увеличение мощности накачки за счет использования нескольких диодов не улучшало ситуацию, поскольку поляризационное некоге-



рентное сложение пучков в случае титан-сапфира не эффективно, а геометрическое мультиплексирование пучков от нескольких диодов еще больше ухудшает параметр фокусируемости накачки.

В работе [16] удалось достичь режима Керровской синхронизации мод, используя двухстороннюю накачку двумя диодами мощностью 1,2 Вт каждый, при этом выходная мощность лазера была порядка 30 мВт, а в работе [17] был достигнут уровень мощности 450 мВт при накачке двумя диодами, излучающими 1,5 Вт каждый, что, однако, потребовало повышения тока накачки до 2,5 А по сравнению с номинальным значением 1,5 А. Позднее этой же научной группой была продемонстрирована возможность стабилизации смещения несущей частоты относительно огибающей фемтосекундных импульсов [18], генерируемых титан-сапфировым лазером с диодной накачкой. Срок жизни лазерных диодов в указанных условиях сокращается.

К настоящему времени номинальная мощность сине-зеленых лазерных диодов, пригодных для накачки титан-сапфировых лазеров, приблизилась к уровню 3 Вт, что позволило получить в титан-сапфировых лазерах стабильный режим пассивной синхронизации мод на Керровской нелинейности без вспомогательных внутрирезонаторных элементов [19, 20]. В прошлом году американская компания «KMLabs» анонсировала коммерческий титан-сапфировый лазер с прямой диодной накачкой. Вскоре наличие аналогичной разработки было заявлено и российской компанией «Авеста-Проект».

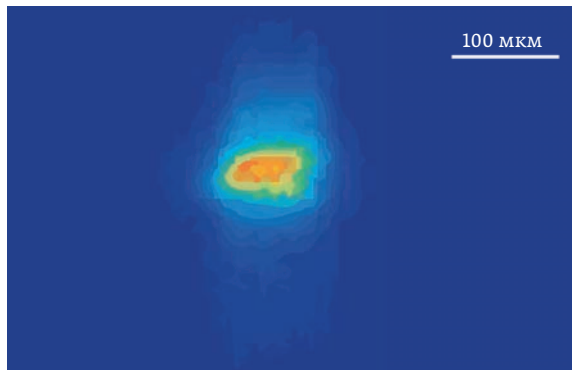
Несмотря на достигнутый прогресс в данной области, по-прежнему остается проблема ограниченной мощности выходного излучения лазерных диодов. Поэтому задача масштабирования мощности диодной накачки при сохранении линейной поляризации и фокусируемости пучка является важной и актуальной. Для решения этой задачи был предложен и экспериментально изучен метод спектрально-поляризационного сведения лазерных пучков [21], позволяющий свести в единый пучок излучение от нескольких лазерных источников с близкими, но не перекрывающимися спектрами. При этом поляризация излучения в сведенном пучке близка к линейной, фокусируемость остается неизменной, а энергетические потери при сведении пучков не превышают 10%. Количество лазерных пучков, которое можно свести данным методом, теоретически не ограничено. На практике оно определяется шириной спектра и разбросом центральных длин волн используемых лазерных источников. В частности, в работе [21]

было продемонстрировано эффективное сведение трех спектрально близких пучков от однотипных лазерных диодов.

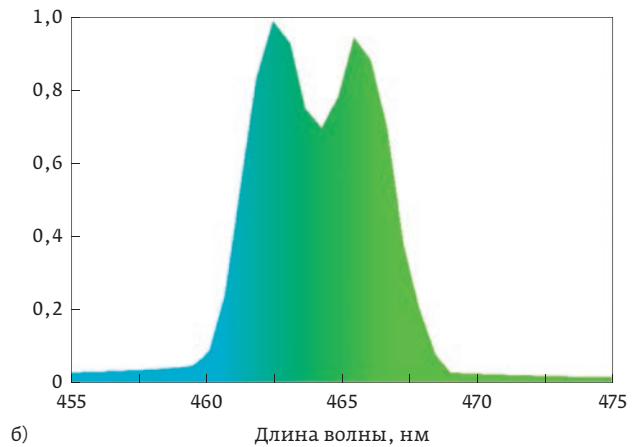
На основе данного метода компанией «Фемто-Вижн» разработаны компактные и мощные диодные лазерные модули, пригодные для накачки титан-сапфировых лазеров. Такие модули, в зависимости от конфигурации, типа и числа используемых в них лазерных диодов, обеспечивают максимальную выходную мощность от 5 до 9 Вт с длиной волны в диапазоне 440–470 нм. Это позволяет использовать их в качестве привлекательной по стоимости альтернативы лазерам на ионах редкоземельных элементов с внутрирезонаторным удвоением частоты, существенно большим как по размерам, так и по энергопотреблению. Также такие модули могут оказаться полезными для других применений, где не требуется узкий спектральный состав излучения, но необходим уровень мощности, в разы превышающий мощность, достижимую от одиночных лазерных диодов, при сопоставимой фокусируемости пучка.

В данной статье сообщается об успешном использовании таких диодных лазерных модулей для получения режима пассивной синхронизации мод на Керровской нелинейности в титан-сапфировом лазере, собранном на основе серийно выпускаемого компанией «Авеста-Проект» комплекта «TiF-Kit-20». Состав данного комплекта оптики и соответствующая геометрия лазерного резонатора исходно разрабатывались для его использования лазерами на неодиме с удвоением частоты с оптической накачкой. Они отличаются от лазерных диодов не только гораздо более узким спектром, но и существенно лучшей фокусируемостью пучка, обычно не превышающей в таких лазерах дифракционный предел более чем в 1,5–2 раза.

Вместо подобных лазеров в экспериментах использовались два диодных модуля, излучающих в спектральном диапазоне 460–470 нм и обеспечивающих максимальную суммарную мощность в линейной поляризации до 10 Вт, расположенных по схеме встречной накачки. При этом фокусируемость излучения накачки была заметно хуже дифракционного предела (во взаимно ортогональных плоскостях) в 3 и 10 раз, а эффективная ширина спектра излучения накачки составляла более 5 нм. Разная фокусируемость пучка в ортогональных плоскостях является характерной особенностью мощных многомодовых лазерных диодов. Но эллиптичность фокального пятна при необходимости можно уменьшить с помощью анаморфных призм или цилиндрической оптики. При этом для реше-



а)



б)

Рис. 1. Характеристики выходного излучения диодного модуля: слева – распределение интенсивности в фокальной перетяжке, полученное с помощью линзы с фокусным расстоянием 250 мм; справа – характерный спектр выходного излучения диодного модуля накачки

ния задач накачки фемтосекундных лазеров достижение максимальной интенсивности в фокальном пятне и достижение эффективного перекрытия моды резонатора с накачкой оказывается важнее, чем полная компенсация эллиптичности пучка.

Характерный спектр излучения накачки и вид фокальной перетяжки приведены на рис. 1. Частичная компенсация астигматизма пучков накачки осуществлялась с помощью цилиндрических телескопов, установленных на выходе каждого из диод-



Телефон: +7 (812) 394-53-34, +7 (996) 767-59-34

Эл. почта: info@laserteh.ru

Адрес: Санкт-Петербург,
Коломяжский пр, д. 10, лит. АЭ

ЛАЗЕРТЕХ

www.laserteh.ru



ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНЫ И КАЧЕСТВА



Компания ООО «СП «Лазертех» предлагает широкую линейку лазерных технологических комплексов для резки, гравировки, очистки, сварки, термообработки, наплавки, маркировки, в т. ч. прецизионной обработки от лидера лазерной отрасли Китая – компании HGTECH. Поставка комплексов осуществляется, в т. ч. на выгодных условиях лизинга.

ООО «СП «Лазертех» является официальным сертифицированным дистрибьютером компании HGTECH и осуществляет монтаж и ввод в эксплуатацию, гарантийное и постгарантийное обслуживание, ремонт, поставку ЗИП и комплектующих, обучение.

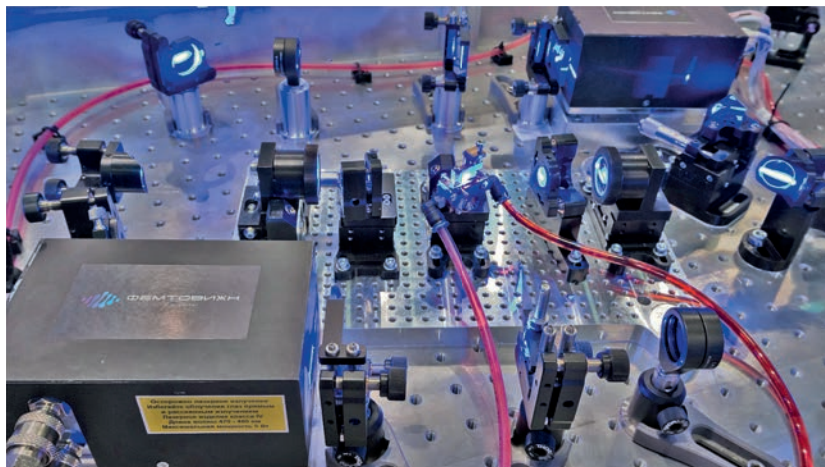


Рис. 2. Экспериментальная установка

При токе накачки, сниженном примерно на 15% от номинального значения 3 А, полная оптическая мощность накачки составляла 7 Вт. Такой режим позволяет увеличение срока службы лазерных диодов. Механическое воздействие на одну из призм в резонаторе привело к переходу лазера в режим пассивной синхронизации мод, что является типичным для титан-сапфировых лазеров.

На рис. 2 приведена фотография части экспериментальной установки, на которой изображены два диодных модуля накачки, цилиндрическая оптика и накачиваемый лазер-

ных модулей. Размер пятна накачки в активном элементе имел характерный размер 25 мкм.

Несмотря на заметные отличия параметров излучения диодных модулей как по ширине спектра, так и по степени фокусируемости пучка, в этой конфигурации возникала непрерывная генерация в титан-сапфировом лазере на низшей пространственной моде резонатора с возможностью спектральной перестройки в зависимости от положения дисперсионной призмы и глухого зеркала в конце резонатора, находящегося непосредственно за призмой.

ными диодами активный элемент из сапфира с титаном. На рис. 3 показан характерный широкий спектр, возникающий при переходе титан-сапфирового лазера в режим пассивной синхронизации мод. Ширина оптического спектра в данном случае в большей степени определяется не свойствами пучка накачки, а юстировкой призм, компенсирующих дисперсию групповых скоростей в резонаторе титан-сапфирового лазера, а также спектральными характеристиками диэлектрических отражающих покрытий, используемых в резонаторе.

Выходная мощность на выходе осциллятора в этих условиях составляла порядка 150 мВт, а частота повторения фемтосекундных импульсов, определяемая длиной резонатора фемтосекундного лазера, составляла 90 МГц. Последующие эксперименты с такими диодными модулями накачки, проводимые в компании «Авеста-Проект», продемонстрировали среднюю мощность на выходе фемтосекундного лазера, превышающую уровень 300 мВт.

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность прямой замены лазеров с внутррезонаторным удвоением частоты, используемых для накачки титан-сапфировых лазеров мощными, недорогими и существенно более компактными модулями диодной накачки. Показано, что такое замещение источника требует минимальных изменений в оптической схеме фемтосекундного лазера. Дальнейшая работа в этом направлении открывает перспективы создания компактных, недорогих и энергоэффективных твердотельных фемтосекундных лазерных

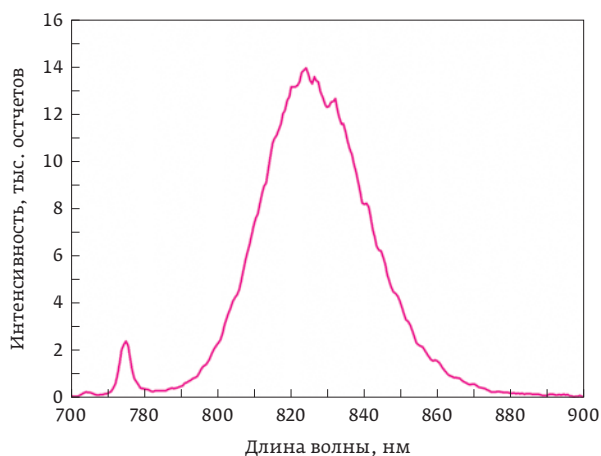


Рис. 3. Характерный спектр излучения на выходе титан-сапфирового лазера с прямой диодной накачкой в режиме пассивной синхронизации мод

систем с прямой диодной накачкой для самых разных практических применений в биомедицине, метрологии, квантовой оптике и нанобработке материалов, а также в фундаментальных научных исследованиях.

Авторы выражают благодарность НИТУ «МИСиС» за финансовую поддержку и признательность сотрудникам компании «Авеста-Проект» за всестороннюю техническую поддержку и помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Крюков П. Г.** Лазеры ультракоротких импульсов и их применение. – Долгопрудный: ИД «Интеллект». 2012.
Kryukov P. G. Ultrashort-pulse lasers i ih primeneniye. – Dolgoprudnyj: ID «Intellekt». 2012.
2. **Крюков П. Г.** Лазеры ультракоротких импульсов. *Квантовая электроника*. 2001; 31 (2): 95–119.
Kryukov P. G. Ultrashort-pulse lasers. *Kvantovaya Elektronika*. 2001; 31 (2): 95–119.
3. **Zhang J. et al.** Eternal 5D data storage by ultrafast laser writing in glass. *Proc. of SPIE*. 2016; 9736: 97360U.
4. **Strickland D., Mourou G.** Compression of amplified chirped optical pulses. *Optics Communications*. 1985; 56 (3): 219–221.
5. **Morgner U. et al.** Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens modelocked Ti: sapphire laser. *Opt. Lett.* 1999; 24 (6): 411–413.
6. **Weissleder R.** A clearer vision for in vivo imaging. *Nature biotechnology*. 2001; 19: 316–317.
7. **Дорони́на-Амитонова Л. В. и др.** Нейрофотоника: оптические методы исследования и управления мозгом. *Успехи Физических Наук*. 2015; 185 (4): 371–392.
Doronina-Amitonova L. V. et al. Neirofotonika: opticheskie metody issledovaniya i upravleniya mozgom. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2015; 185 (4): 371–392.
8. **Sarkisov O. M.** New directions of femtochemistry and femtobiology. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2012; 6 (4): 458–470.
9. **Moulton P. F.** Spectroscopic and laser characteristics of Ti: Al₂O₃. *JOSA B*. 1986; 3 (1): 125–132.
10. **Wall K.F. and Sanchez A.** Titanium sapphire lasers. *Lincoln Laboratory Journal*. 1990; 3 (3): 447–462.
11. **Nakamura S. et al.** Blue InGaN-based laser diodes with an emission wavelength of 450 nm. *Appl. Phys. Lett.* 2000; 76: 22–24.
12. **Roth P.W. et al.** Directly diode-laser-pumped Ti: sapphire laser. *Optics Letters*. 2009; 34 (21): 3334–3336.
13. **Roth P.W. et al.** Direct diode-laser pumping of a mode-locked Ti: sapphire laser. *Optics Letters*. 2011; 36 (2): 304–306.
14. **Roth P.W., Burns D., Kemp A. J.** Power scaling of a directly diode-laser-pumped Ti: sapphire laser. *Optics Express*. 2012; 20(18): 20629–20634.
15. **Sawai S. et al.** Demonstration of a Ti: sapphire mode-locked laser pumped directly with a green diode laser. *Applied Physics Express*. 2014; 7 (2): 022702.
16. **Durfee C. G. et al.** Direct diode-pumped Kerr-lens mode-locked Ti: sapphire laser. *Optics Express*. 2012; 20 (13): 13677–13683.
17. **Gürel K. et al.** Green-diode-pumped femtosecond Ti: Sapphire laser with up to 450 mW average power. *Optics Express*. 2015; 23 (23): 30043–30048.
18. **Gürel K. et al.** Carrier envelope offset frequency detection and stabilization of a diode-pumped mode-locked Ti: sapphire laser. *Optics Letters*. 2017; 42 (6): 1035–1038.
19. **Backus S. et al.** Direct diode-pumped Kerr Lens 13 fs Ti: sapphire ultrafast oscillator using a single blue laser diode. *Optics Express*. 2017; 25 (11): 12469–12477.
20. **Kopylov D. et al.** Kerr-lens mode locked Ti: sapphire laser pumped by a single laser diode. *Laser Physics Letters*. 2018; 15: 045001–5.
21. **Pochechuev M. et al.** Wavelength beam combining by spectrally selective polarization transformation. *JOSA B*. 2018; 35 (11): 2842–2845.

ООО «Лажус Оптикс» Серия тепловизионных монокуляров



Lahoux *Spotter* M | Lahoux *Spotter* Pro | Lahoux *Spotter* Pro+35mm | Lahoux *Spotter* Elite 50mm
240x180, 13mm | 384x288, 19mm | 384x288, 35mm | 640x480, 50mm

Lahoux Spotter - серия приборов, подходящих как для наблюдения за природой, так и для научных исследований!

в Голландии
47, Stephensonstraat
2014 KC, HAARLEM
THE NETHERLANDS
Tel.: +31 23 5514678
Fax.: +31 23 55 14679
info@lahoux.nl
www.lahousoptics.nl

Lahoux Optics

в России
125080, РОССИЯ, Г. МОСКВА
Волоколамское ш. д.1.стр.1.
Тел.: +7(916)535-1800
info@lahousoptics.ru
www.lahousoptics.ru