

УДК 535

Yb:KYW-ЛАЗЕР С НАКАЧКОЙ МОЩНЫМ ОДНОМОДОВЫМ КОНИЧЕСКИМ ДИОДНЫМ ЛАЗЕРОМ

© 2019 г. С. А. Кузнецов^{1, *}, В. С. Пивцов^{1, 2}, А. В. Семенко^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский государственный технический университет”, Новосибирск, Россия

*E-mail: clock@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 03.09.2018 г.

После доработки 10.09.2018 г.

Принята к публикации 22.10.2018 г.

Разработан мощный одномодовый конический диодный лазер с распределенным брэгговским отражателем с малошумящим источником питания. Исследованы выходные характеристики лазера. С использованием диодного лазера в качестве источника накачки получен и исследован режим свободной генерации Yb:KYW-лазера. Показано, что на основе Yb:KYW-лазера с накачкой диодным лазером подобного типа возможно создать компактный прецизионный фемтосекундный синтезатор частот.

DOI: 10.1134/S0367676519030104

ВВЕДЕНИЕ

Исследования фемтосекундных иттербиевых кристаллических лазеров с накачкой диодными лазерами – актуальная тема и ею занимаются многие научные группы. В основном используется многомодовая диодная накачка (см., например, [1, 2]). Фемтосекундный режим, как правило, достигается с помощью SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, полупроводниковое зеркало с насыщающимся поглотителем). Исследовали лазеры с частотами повторения импульсов до нескольких сотен МГц. Средняя выходная мощность таких лазеров – от 10 мВт до нескольких Вт. Имеются публикации о результатах исследований фемтосекундных иттербиевых кристаллических лазеров с накачкой маломощными одномодовыми диодными лазерами с открытым и волоконным выходом [3–7]. Мощность таких диодных лазеров в непрерывном режиме <1 Вт. Средняя выходная мощность фемтосекундных иттербиевых лазеров с такой накачкой – от десятков мВт до сотен мВт. Устойчивый режим возникает как с использованием SESAM, так и без него.

Компактные фемтосекундные лазеры имеют высокую частоту повторения импульсов (>500 МГц). Лазеры с такими частотами повторения импульсов имеют диаметр перетяжки пучка генерирующего излучения несколько десятков

микрон. Сфокусировать накачку в пятно с таким диаметром можно только у одномодового лазера, излучение которого обладает дифракционной расходимостью. Поэтому лишь с такой накачкой были разработаны эффективные фемтосекундные лазеры с частотой повторения > 500 МГц. При использовании в качестве источника накачки мощного одномодового диодного лазера (Distributed Bragg Reflector Tapered Diode Laser, DBR TDL, мощность до 12 Вт) был получен фемтосекундный режим кристаллического иттербиевого лазера со средней выходной мощностью до 2.2 Вт и частотой повторения импульсов – 1 ГГц [8, 9].

Стабильный и самостартующий режим получался при использовании SESAM. Такие мощные компактные иттербиевые лазеры перспективны для разработки актуальных в настоящее время фемтосекундных синтезаторов оптических частот и прецизионных систем на их основе. В указанных публикациях демонстрировалось получение фемтосекундного режима, приводились энергетические, временные и спектральные характеристики. Однако оптимальные схемы фемтосекундных иттербиевых лазеров с целью их использования в синтезаторах не исследовали и не рассматривали. Не описывалась также система накачки и электронная часть питания и управления. Данная статья посвящена решению указанных выше задач.

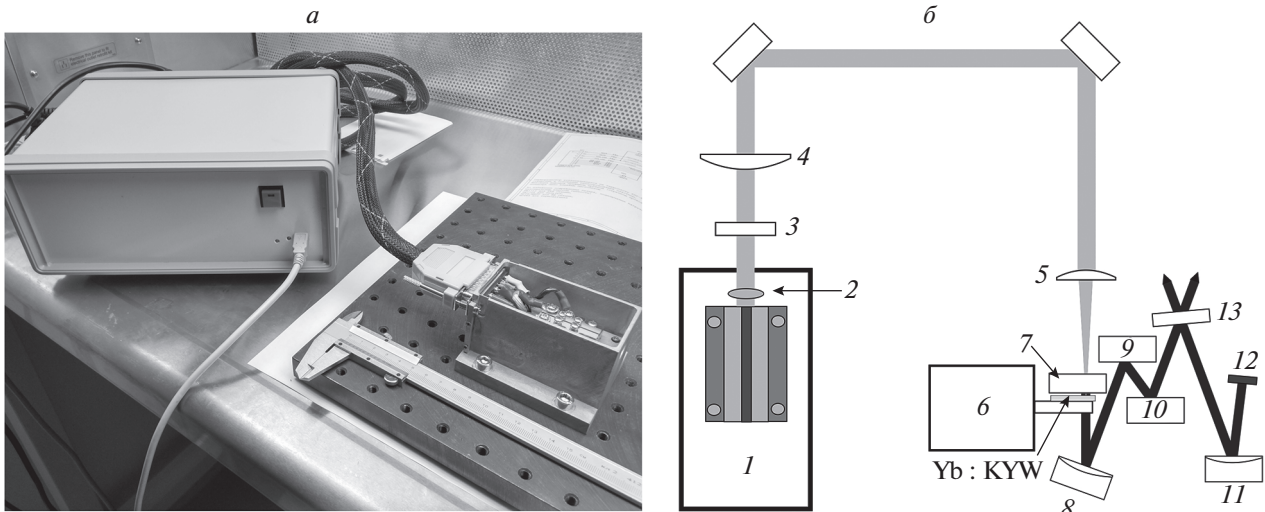


Рис. 1. *a* – Внешний вид DBR TDL-лазера с источником питания; *б* – схема экспериментальной установки: 1 – DBR TDL-лазер; 2 – асферическая линза; 3 – полуволновая пластина; 4 – цилиндрическая линза; 5 – фокусирующая линза; 6 – медный кристаллодержатель; 7 – дихроичное зеркало; 8, 11 – сферические зеркала; 9, 10 – ГТТ-зеркала; 12 – полупроводниковое насыщающееся зеркало SESAM, 13 – выходное зеркало.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пучок многомодового излучения накачки невозможно согласовать в активном элементе с пучком генерации компактного лазера, у которого перетяжка составляет несколько десятков микрон. Это ограничивает КПД лазера. Кроме того, у такого излучения поперечное распределение изрезано. Причем изрезанность меняется со временем и с изменением накачки. Стабильность режима синхронизации мод зависит от степени изрезанности вплоть до невозможности реализовать устойчивый режим. Для лазера обычных размеров перетяжка составляет сто и больше микрон. В этом случае возможно согласование пучков накачки и генерации, изрезанность влияет меньше и реально получение стабильного режима. Поэтому для стабильного режима синхронизации мод в компактном лазере необходима накачка одномодовым лазерным источником достаточной мощности. Коммерчески доступные одномодовые диодные лазеры с волоконным выходом имеют выходную мощность не более 1 Вт. В качестве альтернативного источника были использованы одномодовые диодные лазеры типа DBR TDL (производитель – Ferdinand-Braun-Institut, Berlin, Germany) с длиной волны излучения 981 нм (центр линии поглощения кристалла Yb:KYW) и максимальной выходной мощностью 6 Вт. Для этого необходимо было разработать малощумящий источник питания, оптимизировать характеристики излучения DBR TDL-лазера, оптимизировать резонатор иттербиевого лазера и исследовать достигнутые характеристики свободной генерации этого лазера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Из литературных источников и нашего опыта работы с фемтосекундными лазерами известно, что для устойчивого режима синхронизации мод и надежной стабилизации спектральных компонентов излучения необходимо, чтобы шум излучения накачки не превышал 10^{-4} от полной мощности. DBR TDL-лазер состоит из трех секций: секции пассивного распределенного брэгговского отражателя (DBR), секции гребневого волновода (RW) и конической секции (TA) с углом конуса 6° в едином чипе. Ток секций RW и TA контролировался индивидуально. Катод секций – общий. Для стабильности спектральных характеристик DBR TDL необходимо поддерживать температуру чипа с погрешностью 0.1°C . Коммерческий источник питания, обладающий необходимым для применения набором метрологических и функциональных характеристик, отсутствует. Использование отдельных источников для каждой из частей чипа усложняет эксплуатацию, затрудняет компьютерное управление и существенно удорожает оптическую накачку. По этой причине разработан источник питания и термостабилизации для DBR TDL (рис. 1а).

Источник питания и термостабилизация предназначены для питания DBR TDL, а также для стабилизации его температуры. При разработке использованы драйверы тока, предназначенные для питания лазерных диодов и обладающие необходимыми метрологическими характеристиками. Помимо собственно драйверов тока источник содержит два независимых канала питания (один канал используется для цепей термостабилизатора

и драйвера оптического усилителя, второй – для диодного лазера), распределенную микропроцессорную систему управления, состоящую из двух микроконтроллеров, аналоговый контроллер термостабилизации, цифровой интерфейс UART с гальванической развязкой и преобразователь интерфейса UART-USB.

Встроенное программное обеспечение микроконтроллера каналов лазерного диода и оптического усилителя обеспечивает по поступлению соответствующей команды от персонального компьютера включение и выключение системы, формирование линейно нарастающих либо спадающих сигналов на входе управления током с программно задаваемыми скоростями изменения сигнала, установку стартового и рабочего тока диода и оптического усилителя, включение и выключение термостабилизации, задание и контроль температуры объекта. В случае обнаружения аварийной ситуации (детектировании обрыва, коротком замыкании нагрузки, выхода температуры за пределы допуска) микроконтроллер осуществляет немедленное выключение драйвера тока и переводит схему в безопасное состояние. Рабочие параметры каналов оптического усилителя, лазерного диода и термостабилизатора могут быть сохранены в энергонезависимой памяти микроконтроллера и использованы в дальнейшей работе.

Помимо режимов независимого управления термостабилизатором и оптическим усилителем, используемых, в основном, на этапе отладки источника, предусмотрен автоматический режим работы, предназначенный для использования источника на установке. В этом случае по поступлению соответствующей команды от компьютера либо по нажатию кнопки запуска источника выполняется заданная последовательность действий: включается термостабилизатор, по достижению заданной температуры объекта посылается команда включения диодного лазера, по получению готовности канала диодного лазера осуществляется процедура включения оптического усилителя. При поступлении команды выключения либо при нажатии кнопки выключения выполняется обратная последовательность действий.

В автоматическом режиме работы анализ аварийных ситуаций дополняется анализом состояния канала лазерного диода и детектированием отсутствия связи с микроконтроллером канала лазерного диода. Также при детектировании аварийной ситуации в канале оптического усилителя в канал лазерного диода передается команда аварийного отключения.

Характеристики, заложенные в источнике питания для DBR TDL.

Канал лазерного диода: выходной ток 0–200 мА; интегральное среднее квадратичное значение токового шума в диапазоне частот 0.1 Гц–0.5 МГц –

2 мкА; температурная нестабильность не более $1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$. Канал оптического усилителя: выходной ток 0–10 А; температурная нестабильность не более $2 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$. Канал термостабилизации: температура задания +10...+40 $^\circ\text{C}$; нестабильность поддержания температуры, воспроизводимость не хуже 0.1 $^\circ\text{C}$.

Была написана программа верхнего уровня для управления контроллером. Программа исполняется в операционной системе Windows 10. Программа отлажена и протестирована. Общий объем кода составляет порядка двух тысяч строк. Размер исполнительного файла 3 Мб.

На рис. 1б приведена общая схема фемтосекундного иттербиевого лазера. Поскольку поперечное сечение выходного излучения лазера имело размеры $\sim 400 \times 100$ мкм, т.е. имелся значительный астигматизм, излучение коллимировалось отдельно по обеим осям: быстрая ось – асферической линзой 2 с фокусным расстоянием 3.1 мм, медленная ось – этой же асферической линзой и цилиндрической линзой 4 с фокусным расстоянием 30 мм. Так как астигматизм DBR TDL-лазера может несколько меняться от образца к образцу и, кроме того, зависит от тока, то цилиндрическая линза была помещена на линейный транслятор для корректировки ее позиции при изменении тока. Поскольку поперечное сечение выходного излучения лазера имеет эллиптическую форму, то и в фокальной плоскости оно будет иметь такую же форму. В этом случае полностью согласовать пучки накачки и излучения не удастся, что приведет к уменьшению КПД лазера. Поскольку DBR TDL-лазеры имеют квазидифракционную расходимость ($M^2 = 1.1–1.2$) со значительным астигматизмом, требуется индивидуальная для каждого образца оптимизация корректирующей и фокусирующей систем. Для поворота поляризации использовалась полуволновая пластина 3. Прямое измерение шумовых характеристик излучения DBR TDL-лазера с разработанным авторами источником питания показало, что амплитуда флуктуаций выходной мощности лазера не превышает 0.1% (уровень шума фотоприемника). По паспорту DBR TDL-лазер работал на длине волны 980.4 нм при температуре 25 $^\circ\text{C}$. При мощности излучения 5 Вт в центральном лепестке поперечного распределения должно содержаться $\sim 76\%$ мощности, $M^2 = 1.1$, ширина спектра по полувысоте < 20 пм.

С помощью CCD-камеры был снят поперечный профиль распределения интенсивности лазера DBR TDL (рис. 2). Поперечный профиль распределения интенсивности регистрировали после цилиндрической линзы. Поскольку точно подобрать фокусное расстояние цилиндрической

линзы для компенсации астигматизма затруднительно, поперечный профиль распределения интенсивности в фокальной плоскости асферической линзы будет иметь вид вытянутого эллипса. Такая форма неэффективна для накачки. Изменяя расстояние между линзами, добивались минимальных размеров перетяжки в кристалле. При этих условиях были зарегистрированы все результаты. Из рисунка видно, что поперечное распределение гладкое, без заметной изрезанности, по форме близко к гауссовому. Это очень важно, так как устойчивость режима синхронизации мод при изрезанности существенно ухудшается. Следует отметить, что максимально возможную эффективность накачки компактного фемтосекундного лазера (межмодовая частота > 1 ГГц) можно получить только при точной компенсации астигматизма и преобразования эллиптической формы пучка в круговую.

Оптимизацию иттербиевого лазера проводили в режиме свободной генерации. Поэтому дисперсионные зеркала 9, 10 (GTI) и нелинейное полупроводниковое зеркало (SESAM) 12 (см. рис. 1б) были заменены на плотные диэлектрические зеркала. В качестве активного элемента использовали кристаллы Yb:KYW с концентрацией активатора 10 вес. %, вырезанные вдоль оси C, толщиной 1 и 1.5 мм. Поскольку максимум линии поглощения кристалла Yb:KYW находится на длине волны 981.2 нм, лазер DBR TDL был перестроен на эту длину волны увеличением температуры диода. На рис. 3а приведена зависимость длины волны лазера от температуры для максимального тока $I_{TA} = 10$ А. Перестройка составила около 0.06 нм на 1°C . Зависимость перестройки длины волны от тока усилителя составила около 0.018 нм на ампер. Таким образом, в качестве рабочей температуры была выбрана 34.6°C . Корпус был спроектирован с запасом по отводимой мощности, поэтому лазер работал без водяного охлаждения.

На максимальном токе усилителя 10 А значение падающей на кристалл мощности лазера составило 6 Вт (порог генерации 1.5 А). Были проведены исследования мощности Yb:KYW-лазера в режиме свободной генерации в зависимости от толщины кристалла и использования выходных зеркал с пропусканием 1, 2, 3 и 4%. Наилучшие результаты получены с кристаллом 1.5 мм. Из приведенных рис. 3б и 3в видно, что оптимальный коэффициент пропускания выходного зеркала составлял 3%, эффективный и полный оптический КПД составляют 64.9 и 61% соответственно. Лишь в одной цитированной работе [8] приведена эффективность лазера с накачкой до 5 Вт: эффективный и полный оптический КПД составляют 28 и 20% соответственно, что существенно ниже наших результатов.

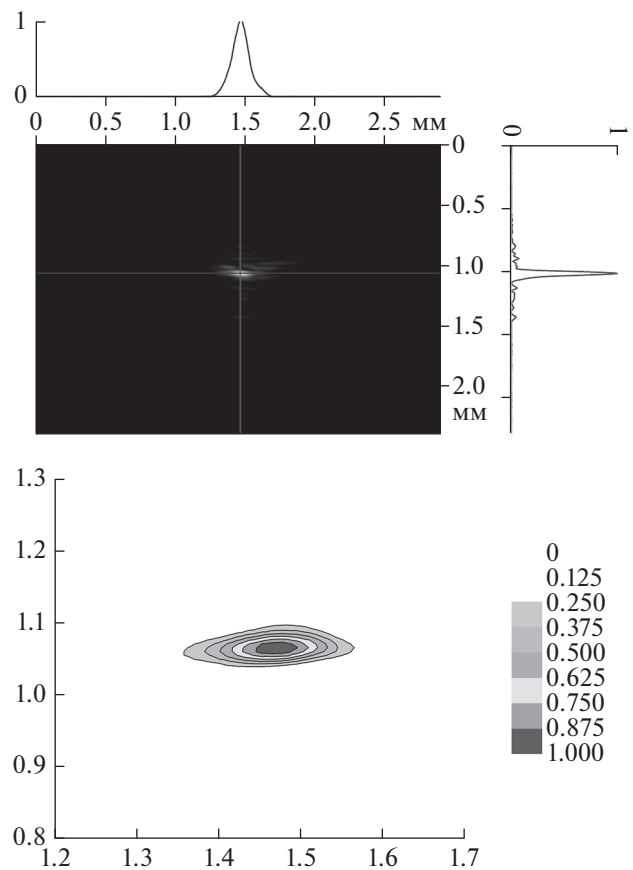


Рис. 2. Поперечный профиль распределения интенсивности DBR TDL-лазера.

При увеличении толщины кристаллов от 1 до 1.5 мм полный оптический КПД растет незначительно. Однако при этом возрастает дисперсия резонатора, что нежелательно. Таким образом, толщина около 1 мм является оптимальной толщиной кристалла Yb:KYW с концентрацией активатора 10 вес. %.

Следует отметить, что все экспериментальные результаты получены без охлаждения кристаллов Yb:KYW, т.е. при комнатной температуре. При максимальной мощности лазера накачки 6 Вт наблюдалось незначительное повышение температуры медного охладителя, при этом выходная мощность оставалась стабильной в течение нескольких часов. Использование элемента Пельтье и системы водяного охлаждения для снижения температуры кристалла до 15°C привело к повышению уровня мощности на 1.5% при максимальной мощности лазера накачки.

Для получения фемтосекундного режима использована пара дисперсионных зеркал с суммарной дисперсией -2350 фс² и зеркало SESAM (BATOP GmbH) с параметрами: глубина модуляции $\Delta R = 1.2\%$; поглощение $A_0 = 2\%$; постоянная

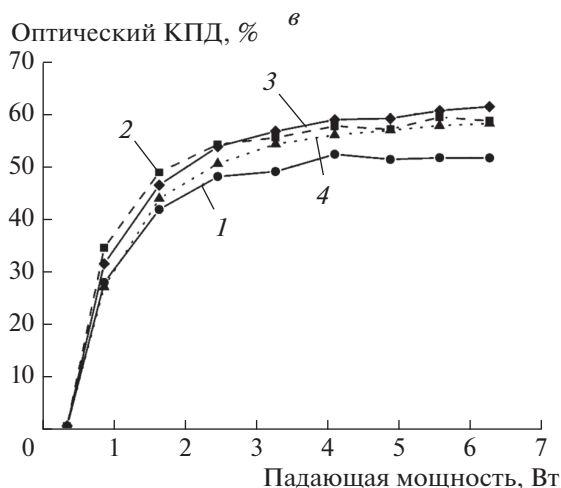
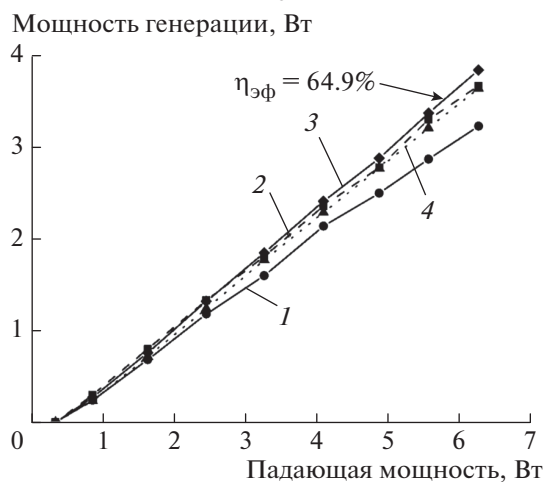
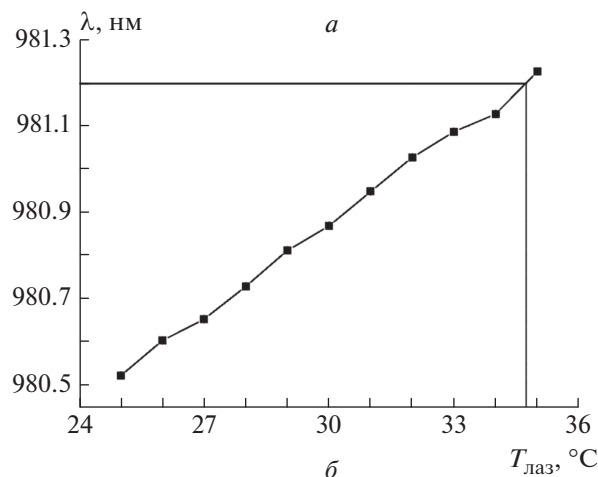


Рис. 3. *a* – Зависимость длины волны лазера DBR TDL от температуры при максимальном токе $I_{TA} = 10$ А. *б* – зависимость мощности генерации лазера от падающей мощности для 1.5 мм кристалла Yb:KYW и различных коэффициентов пропускания выходного зеркала. 1 – выходное зеркало $T = 1\%$; 2 – выходное зеркало $T = 2\%$; 3 – выходное зеркало $T = 3\%$; 4 – выходное зеркало $T = 4\%$. *в* – зависимость полного оптического КПД лазера от падающей мощности для 1.5 мм кристалла Yb:KYW и различных коэффициентов пропускания выходного зеркала. 1 – выходное зеркало $T = 1\%$; 2 – выходное зеркало $T = 2\%$; 3 – выходное зеркало $T = 3\%$; 4 – выходное зеркало $T = 4\%$.

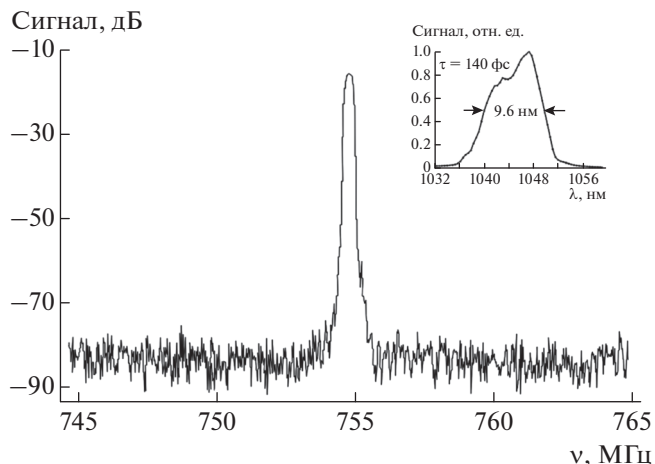


Рис. 4. Спектр излучения на межмодовой частоте в режиме синхронизации мод: центральная частота 754.7 МГц, полоса обзора 20 МГц, разрешение 0.3 МГц. Вставка – оптический спектр Yb:KYW-лазера.

времени релаксации 1 пс; порог насыщения $\Phi_{\text{нас}} = 60$ мкДж · см⁻²; порог разрушения $\Phi = 4$ мДж · см⁻². После самостарта режима синхронизации мод возникает характерная гребенка межмодовых частот с высоким отношением сигнал/шум (более 60 дБ при разрешении 300 кГц). На рис. 4 приведен спектр межмодовых биений на частоте 754.7 МГц. Ширина оптического спектра по полувысоте составила 9.6 нм, центральная длина волны 1045 нм, длительность импульса около 140 фс при средней выходной мощности 2 Вт (эффективный и полный оптический КПД составили 40 и 37% соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработан мощный одномодовый диодный лазер типа DBR TDL с малошумящим источником питания. Проведены исследования и оптимизация выходных характеристик лазера. Показана их перспективность как источников накачки компактных фемтосекундных итербиевых лазеров. Исследован режим свободной генерации Yb:KYW-лазера с накачкой излучением DBR TDL-лазера. Получена рекордная эффективность для компактных лазеров с накачкой излучением DBR TDL-лазера: 64.9% эффективный КПД и 61% полный оптический КПД. Получен самостартующийся фемтосекундный режим с длительностью импульса 140 фс, средней выходной мощностью 2 Вт (эффективный и полный оптический КПД составили 40 и 37%). Использование зеркала SESAM для запуска режима синхронизации мод Yb:KYW-лазера позволяет создать полностью автоматизированный компактный прецизионный фемтосекундный синтезатор частот,

что было проблематично с многомодовой накачкой [10, 11].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-29-20007) с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Фемтосекундный лазерный комплекс”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Paunescu G., Hein J., Sauerbrey R.* // Appl. Phys. B. 2004. V. 79. P. 555.
2. *Liu J., Wang W.W., Liu C.C. et al.* // Laser Phys. Lett. 2010. V. 7. P. 104.
3. *Lagatsky A.A., Brown C.T.A., Sibbertt W.* // Opt. Expr. 2004. V. 12. P. 3928.
4. *Lagatsky A.A., Sarmani A.R., Brown C.T.A. et al.* // Opt. Lett. 2005. V. 30. P. 3234.
5. *Wasylczyk P., Wnuk P., Radzewicz C.* // Opt. Expr. 2009. V. 17. P. 5630.
6. *Schratwieser Th., Leburn Ch., Reid D.* // Opt. Lett. 2012. V. 37. P. 1133.
7. *Endo M., Ozawa A., Kobayashi Y.* // Opt. Expr. 2012. V. 20. P. 12191.
8. *Pekarek S., Fiebig C., Stumpf M.C. et al.* // Opt. Expr. 2010. V. 18. P. 16320.
9. *Pekarek S., Südmeyer T., Lecomte S. et al.* // Opt. Expr. 2011. V. 19. P. 16491.
10. *Кирпичникова А.А., Кузнецов С.А., Пивцов В.С.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 2. С. 228; *Kirpichnikova A.A., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2015. V. 79. № 2. P. 169.
11. *Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Semenko A.V., Bagayev S.N.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 793(1). Art. no. 012016.