

## Микрочип-лазер на кристалле $\text{Yb}:\text{KYW}$ с ВКР-самопреобразованием частоты генерации

А.С.Грабчиков\*, А.Н.Кузьмин\*, В.А.Лисинецкий\*, В.А.Орлович\*,  
А.П.Войтович\*\*, А.А.Демидович\*\*, Г.Й.Эйхлер\*\*\*, А.Н.Титов\*\*\*\*

*Представлены результаты исследования микрочип-лазера на кристалле  $\text{Yb}:\text{KYW}$  с диодной накачкой в режимах непрерывной генерации и пассивной модуляции добротности. Максимальный дифференциальный КПД генерации в непрерывном режиме составил 23%. Реализован режим ВКР-самопреобразования частоты генерации микрочип-лазера.*

**Ключевые слова:** твердотельные лазеры, ВКР-самопреобразование частоты, микрочип-лазеры, диодная накачка.

Калий-иттриевый и калий-гадолиниевый вольфраматы, легированные ионами неодима и иттербия, известны как эффективные среды для твердотельных лазеров с диодной накачкой, включая микрочип-лазеры и лазеры с самопреобразованием частоты генерации на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [1–7]. Благодаря компактности, простоте и надежности конструкции микрочип-лазеры находят широкое применение в лазерных системах, работающих как в непрерывном режиме, так и в режиме пассивной модуляции добротности. Во многих случаях интерес к микрочип-лазерам, работающим в режиме пассивной модуляции добротности, обуславливается возможностью получения импульсов излучения нано- и субнаносекундной длительности с высокой пиковой мощностью, что обеспечивает эффективное нелинейное преобразование частоты генерируемого излучения.

Плоскопараллельная конфигурация микрочип-лазера накладывает ограничения на стабильность резонатора и требует тщательного выбора активной среды лазера для получения эффективной генерации [8]. В наших предыдущих работах [2, 9] было экспериментально показано, что кристаллы  $\text{Nd}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  являются подходящими активными средами для микрочип-лазеров, несмотря на наличие отрицательной термлинзы в активных элементах, вырезанных вдоль оси  $b$ , в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации [2].

Большинство работ по микрочип-лазерам, генерирующим излучение в спектральной области вблизи 1 мкм, посвящено неодимсодержащим лазерным средам, и только в работе [10] был экспериментально исследован лазер в режиме пассивной модуляции добротности на основе кристалла  $\text{Yb}:\text{YAG}$  в микрочип-конфигурации резонатора. В то же время кристаллы, легированные ионами

иттербия, являются перспективными средами для твердотельных лазеров нового типа – излучательно-сбалансированных лазеров (radiation balanced lasers) – и могут использоваться в лазерных системах для оптического охлаждения и других целей [11].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования лазеров на кристаллах  $\text{Yb}^{3+}:\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$  ( $\text{Yb}:\text{KYW}$ ) в плоскопараллельной микрочип-конфигурации резонатора при лазерной диодной накачке. Впервые были реализованы режимы непрерывной генерации и пассивной модуляции добротности. В режиме пассивной модуляции добротности впервые было получено ВКР-самопреобразование частоты генерации в микрочип-лазере.

К основным особенностям  $\text{Yb}:\text{KYW}$  как лазерной среды относятся широкая полоса поглощения в области 981 нм, что позволяет использовать для накачки мощные коммерческие лазерные диоды, относительно большой коэффициент поглощения ( $17\text{ см}^{-1}$  для типичной концентрации ионов  $\text{Yb}^{3+}$  5%, что соответствует концентрации  $3.2 \times 10^{20}\text{ см}^{-3}$ ) и относительно недорогая, воспроизводимая и простая технология выращивания кристаллов, обеспечивающая получение кристаллов высокого оптического качества. Двойные вольфраматы являются также эффективными ВКР-средами. Для кристаллов  $\text{Yb}:\text{KYW}$  коэффициент усиления ВКР составляет 21 см/ГВт на длине волны возбуждения 532 нм [12], что значительно расширяет области их применений в лазерных системах.

Легированные различными редкоземельными ионами двойные вольфраматы перспективны и как активные среды для ВКР-лазеров с самопреобразованием частоты. В наших предыдущих исследованиях  $\text{Yb}:\text{KYW}$ -лазера с пассивной модуляцией добротности в объемном полусферическом резонаторе было получено перестраиваемое ВКР-самопреобразование частоты генерации в излучение первой стоксовой компоненты с оптической эффективностью 3.4% относительно мощности лазерного диода накачки [7]. Это обстоятельство стимулировало продолжение исследований с целью реализации ВКР микрочип-лазера.

Кристалл  $\text{Yb}:\text{KYW}$  с концентрацией ионов  $\text{Yb}^{3+}$  10%, используемый в настоящих экспериментах, имел

\*Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, Беларусь, 220072 Минск, просп. Ф.Скорины, 68; orlovich@dragon.bas-net.by

\*\*Институт молекулярной и атомной физики НАНБ, Беларусь, 220072 Минск, просп. Ф.Скорины, 70

\*\*\*H. Eichler, Optical Institute, Technical University of Berlin, Strasse des 17 Juni 135, D-10623, Germany

\*\*\*\*Всероссийский научный центр «ГОИ им. С.И.Вавилова», Россия, 199034 С.-Петербург, Биржевая линия, 12

толщину 1.1 мм и был вырезан вдоль оси  $b$ . На одну из полированных граней кристалла было нанесено зеркало, пропускающее излучение лазерного диода накачки (981 нм) и имеющее коэффициент отражения  $R \geq 99.5\%$  в диапазоне длин волн 1020–1150 нм. На вторую грань кристалла было нанесено просветляющее покрытие в том же диапазоне длин волн. Для обеспечения centrosymmetric отвода тепла активный кристалл был установлен на медную пластину. В качестве выходного зеркала использовались плоские зеркала с коэффициентами отражения 90 %, 95 %, 98 % и 99.9 % на длине волны 1020 нм. Коэффициент пропускания последних двух зеркал составлял 2 % на длине волны 1130 нм. В качестве пассивного затвора использовался кристалл  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  толщиной 0.1 мм с начальным пропусканием 98 %, просветленный в диапазоне длин волн 1020–1150 нм. В эксперименте затвор устанавливался непосредственно на выходное зеркало резонатора.

Источником накачки служил многомодовый диодный лазер мощностью 1.2 Вт, излучающий на длине волны 981 нм. Излучение лазерного диода фокусировалось на активный элемент оптической системой, состоящей из коллимирующего объектива ( $f = 4.5$  мм,  $\text{NA} = 0.5$ ),  $4.5\times$ -цилиндрического телескопа и фокусирующей линзы ( $f = 10$  мм).

Выходные характеристики, полученные для непрерывного режима генерации, показаны на рис. 1. Наибольшая эффективность была достигнута при использовании выходного зеркала с коэффициентом отражения  $R = 90\%$  (рис.1,а). Максимальная выходная мощность излучения составила 54 мВт при мощности падающего излучения накачки 510 мВт. Дифференциальный ( $\eta_{\text{dif}}$ ) и оптический ( $\eta_{\text{opt}}$ ) КПД при этом были равны 23 % и 10 % соответственно. Для квазитрехуровневых лазерных сред

трудно экспериментально оценить поглощенную мощность излучения накачки из-за проявляющегося в таких средах эффекта насыщения поглощения. Поэтому нами для оценки лазерной эффективности учитывалась мощность падающего излучения накачки, хотя использование этого параметра вместо мощности поглощенного излучения приводит к занижению оценки реальной эффективности генерации.

Как видно из рис.1,б, спектр излучения микрочип-лазера имеет многомодовую структуру, обусловленную наличием двух связанных эталонов Фабри–Перо, которые образованы плоскопараллельными гранями кристалла и выходным зеркалом, расположенным в наших экспериментах на расстоянии 0.1 мм от кристалла.

В режиме пассивной модуляции добротности лучший результат был получен при использовании выходного зеркала с коэффициентом отражения  $R = 95\%$  (рис.2,а). При максимальной мощности излучения накачки средняя мощность генерации достигала 24 мВт (при частоте следования импульсов 49 кГц) с оптическим КПД около 5 %. Спектры генерации в режиме пассивной модуляции добротности имеют структуру, подобную структуре спектров в режиме непрерывной генерации (рис.2,б), отличие состоит лишь в расположении групп линий, поскольку параллельная пластина  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  играет роль третьего эталона Фабри–Перо внутри резонатора.

Исследование временных характеристик излучения показало сложную динамику генерации микрочип-лазера в режиме пассивной модуляции добротности. В зависимости от юстировки резонатора мы наблюдали изменение частоты повторения импульса, а также одновременную генерацию на двух модах с различными интенсивностями и частотами повторения. Выходная мощность генерации была нестабильной. С наибольшей ве-

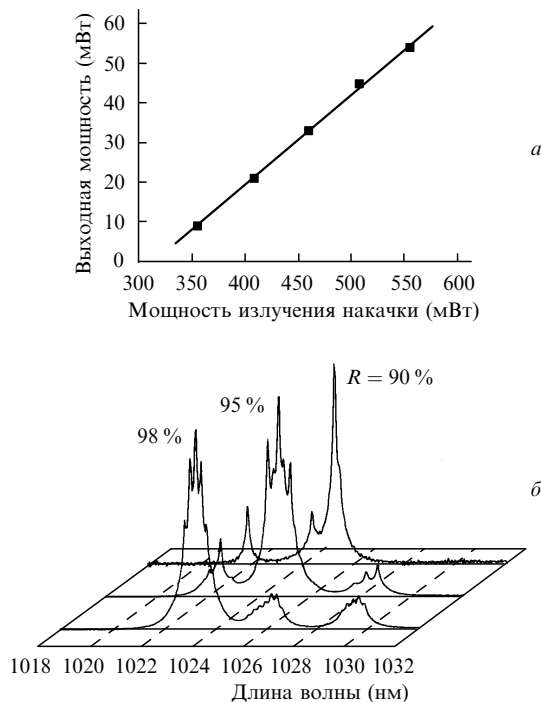


Рис.1. Зависимость выходной мощности микрочип-лазера на кристалле  $\text{Yb}:\text{KYW}$  в режиме непрерывной генерации от мощности излучения накачки для выходного зеркала с оптимальным коэффициентом отражения  $R = 90\%$  (а) и структура спектров генерации лазерного излучения (б).

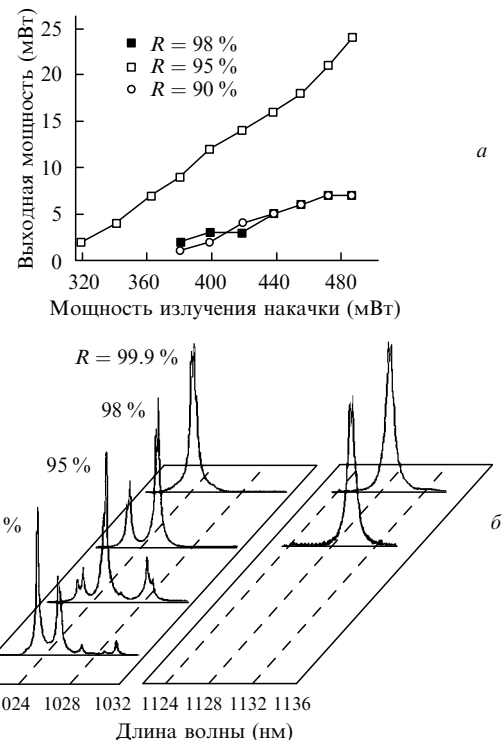


Рис.2. Зависимость выходной мощности микрочип-лазера на кристалле  $\text{Yb}:\text{KYW}$  в режиме пассивной модуляции добротности от мощности излучения накачки (а) и структура спектров генерации лазерного излучения и излучения первой стоковой компоненты (б).

роятностью это происходит по двум причинам. Первая – наличие отрицательной термолинзы в одном из направлений активного элемента, влияющей на стабильность резонатора, и положительной термолинзы в другом направлении (как и в кристалле Nd: KGW) [2]. Вторая причина – процесс ВКР-самопреобразования, который приводит к вырождению наиболее сильной спектральной моды, превышающей порог ВКР, и, следовательно, поддерживает развитие внутри резонатора второй конкурирующей моды генерации, не достигающей порога ВКР.

К сожалению, система регистрации, которую мы использовали в наших экспериментах, не позволяла измерять импульсы длительностью менее 2 нс, хотя по оценочным расчетам длительность импульса генерации должна быть менее 1 нс. При максимальной мощности накачки и выходном зеркале с коэффициентом отражения  $R = 95\%$  частота повторения импульсов достигала 49 кГц. Считая, что длительность импульса была 2 нс, получаем пиковую мощность генерации микрочипа 265 Вт.

ВКР-самопреобразование частоты в излучение первой стоксовой компоненты в исследованном микрочип-лазере наблюдалось при использовании выходных зеркал с  $R = 98\%$  и  $99.9\%$  на длине волны 1020 нм (рис. 2, б). Обнаружено, что ВКР-преобразование частоты имеет место для линий из наиболее сильной спектральной группы лазерной генерации, при этом в стоксовом излучении воспроизводится спектральная структура. Однако если при юстировке выходного зеркала на лазерной частоте наблюдались две группы спектральных мод приблизительно равных интенсивностей, то и спектр стоксового излучения также состоял из двух линий. Лучший результат для ВКР-самопреобразования частоты в исследованном микрочип-лазере был получен при выходном зеркале с коэффициентом отражения  $98\%$  на длине волны лазерной генерации. При максимальной мощности накачки средняя мощность излучения первой стоксовой компоненты составила 2 мВт.

Дальнейшее улучшение выходных характеристик микрочип-лазера на кристалле Yb: KYW может быть достигнуто при использовании монолитной конструкции (в

режиме непрерывной генерации), а также за счет уменьшения зазора между внутррезонаторными элементами, использования просветляющих покрытий более высокого качества и применения специальных атермических активных элементов, вырезанных вдоль направления, при котором в процессе накачки в активном элементе формируется изотропная положительная термолинза. Эти улучшения вместе с оптимизацией коэффициента отражения выходного зеркала на длине волны первой стоксовой компоненты позволят также увеличить эффективность ВКР-самопреобразования частоты.

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты выполненных впервые исследований микрочип-лазера на кристалле Yb: KYW с диодной накачкой в режимах непрерывной генерации и пассивной модуляции добротности. В режиме пассивной модуляции добротности впервые реализовано ВКР-самопреобразование частоты генерации микрочип-лазера.

1. Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Podlipensky A.V., et al. *Opt. Lett.*, **22**, 1317 (1997).
2. Demidovich A.A., Shkadarevich A.P., Danailov M.V., et al. *Appl. Phys. B*, **67**, 11 (1998).
3. Lagatsky A.A., Kuleshov N.V., Mikhailov V.P. *Opt. Commun.*, **165**, 71 (1999).
4. Grabtchikov A.S., Kuzmin A.N., Lisinetskii V.A., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3742 (1999).
5. Demidovich A.A., Kuzmin A.N., Ryabtsev G.I., et al. *J. Alloys and Compounds*, **2000**, 238 (2000).
6. Grabtchikov A.S., Kuzmin A.N., Lisinetskii V.A., et al. *Digest Conf., CLEO/Europe'2000* (Nice, France, 2000, p. 284).
7. Grabtchikov A.S., Demidovich A.A., Kuzmin A.N., et al. *Tech. Program & Abstracts Belarussian-German Seminar 'Lasers and Their Applications'* (Grodno, 2000, p. 29).
8. Sinclair B.D. *Opt. Mater.*, **11**, 217 (1999).
9. Demidovich A.A., Kuzmin A.N., Ryabtsev G.I., et al. *OSA Tech. Digest Series* (Baltimore Conventional Center, 1997, v. 11, p. 522).
10. Spuehler G.J., Paschotta R., Kullberg M.P., et al. *Appl. Phys. B*, **72**, 285 (2001).
11. Bowman S.R., Mungan C.E. *Appl. Phys. B*, **71**, 807 (2000).
12. Cerny P., Zverev P., Jelinkova H., Basiev T. *Opt. Commun.*, **177**, 397 (2000).