

PACS 42.55.Rz; 42.55.Xi; 42.60.By; 42.60.Fc; 42.62.Eh

# Высокоэффективный компактный Yb:KYW-лазер для прецизионных мобильных систем

С.А.Кузнецов, В.С.Пивцов

*Разработана перспективная схема иттербиевого лазера с использованием многомодовых лазерных диодов накачки. Yb:KYW-лазер в непрерывном режиме продемонстрировал рекордные дифференциальную (40%) и полную оптическую (35%) эффективности. Получен режим синхронизации мод, что позволяет использовать схему для разработки малогабаритных лазерных систем, например мобильных прецизионных фемтосекундных синтезаторов. Обсуждаются особенности работы лазера и пути дальнейшего повышения его эффективности.*

**Ключевые слова:** иттербиевый лазер, диодная накачка, синхронизация мод, сверхкороткие импульсы.

## 1. Введение

Оптические синтезаторы частот на основе фемтосекундных лазеров (фемтосекундные синтезаторы) являются важнейшими блоками прецизионных лазерных систем для измерения абсолютных оптических частот и их стабильности [1]. С их помощью также решается проблема переноса частотных характеристик оптических стандартов частоты в радиочастотный диапазон. В настоящее время все более популярными становятся синтезаторы на основе фемтосекундных волоконных эрбиевых лазеров [2]. Компактность конструкции и стабильность характеристик делают волоконные лазеры перспективными для создания мобильных синтезаторов. Еще одним кандидатом для разработки таких синтезаторов является фемтосекундный лазер на основе твердотельных сред, допускающих прямую накачку излучением диодных лазеров. Наиболее привлекательными здесь являются кристаллы, активированные иттербием [3–6]. Длина волны излучения лазеров на их основе составляет 1.03–1.06 мкм. Иттербиевые кристаллы имеют полосы поглощения, совпадающие с диапазоном длин волн генерации мощных полупроводниковых диодных лазеров. Среди сред, активированных иттербием, калиевые вольфраматы (KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>: Yb<sup>3+</sup> (KYW: Yb) и KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>: Yb<sup>3+</sup> (KGW: Yb)) [6] являются одними из наиболее перспективных из-за их больших поперечных сечений поглощения и вынужденного излучения, широкой полосы люминесценции и достаточно высокой теплопроводности. Однако коммерческие синтезаторы на основе иттербиевых активных сред не выпускаются. Известные оптические схемы непригодны для разработки специализированных фемтосекундных лазеров, используемых в прецизионных мобильных системах. Для этого требуются стабильные малогабаритные лазеры с межмодовой частотой более 100 МГц и высокой эф-

фективностью. Таким образом, разработка фемтосекундных лазеров с иттербиевой кристаллической активной средой для прецизионных мобильных систем, включая фемтосекундные синтезаторы, является несомненно актуальной.

Известен ряд публикаций, посвященных исследованиям иттербиевых лазеров в свободном и фемтосекундном режимах с накачкой диодными лазерами со свободным и волоконным выходами. В основном использовалась многомодовая диодная накачка (см., напр., [7–12]). Фемтосекундный режим достигался, как правило, с помощью нелинейного поглотителя SESAM. Лишь в работе [8] такой режим был получен без SESAM, но он был очень критичен к настройке резонатора. Исследовались лазеры с частотами следования импульсов (межмодовой частотой) менее 100 МГц. Только в работе [12] описан лазер с частотой следования импульсов 1 ГГц, дифференциальной эффективностью  $\eta_{\text{dif}} = 34\%$  при выходной мощности 3.4 Вт (полная оптическая эффективность  $\eta_{\text{opt}} = 26\%$ ). Режим генерации фемтосекундных импульсов возник при мощности накачки свыше 7.2 Вт.

Известны результаты исследований иттербиевых лазеров с накачкой маломощными одномодовыми диодными лазерами со свободным и волоконным выходами [13–19] (мощность в непрерывном режиме менее 1 Вт). Для накачки использовались один или два диодных лазера. Средняя выходная мощность фемтосекундных иттербиевых лазеров с такой накачкой составляет от десятков до сотен милливатт. Устойчивый режим генерации возникает как с использованием SESAM, так и без него. С накачкой одномодовыми диодными лазерами были разработаны компактные фемтосекундные лазеры с частотой следования импульсов более 1 ГГц и  $\eta_{\text{dif}} = 69\%$  при выходной мощности 770 мВт ( $\eta_{\text{opt}} = 61\%$ ) [18]. В работе [19] с такой накачкой достигнута частота следования импульсов 4.6 ГГц.

Таким образом, достаточно мощные (с мощностью свыше или около 1 Вт) иттербиевые лазеры в свободном и фемтосекундном режимах реализованы лишь при накачке многомодовыми диодными лазерами с недифракционной расходимостью излучения. При этом межмодовая частота иттербиевых лазеров, как правило, меньше

С.А.Кузнецов, В.С.Пивцов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: clock@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г., после доработки – 11 апреля 2014 г.

100 МГц, т.е. их размеры достаточно велики, что мало подходит для разработки мобильных малогабаритных лазерных систем. Описанный в работе [12] лазер с межмодовой частотой 1 ГГц имел высокий порог генерации (2.1 Вт). Оптимальные схемы иттербиевых лазеров для их использования в прецизионных малогабаритных лазерных системах (например, в синтезаторах оптических частот) не исследовались и не рассматривались в литературе.

В последнее время были разработаны одномодовые полупроводниковые лазеры мощностью до 12 Вт в непрерывном режиме [20]. При их использовании была получена генерация иттербиевого лазера со средней выходной мощностью до 2.2 Вт и частотой следования фемтосекундных импульсов 1 ГГц [21, 22]. Стабильный и самостартующий режим получался при использовании SESAM. Однако такие мощные одномодовые лазеры накачки находятся еще в стадии экспериментальных образцов.

Целью настоящей работы является разработка малогабаритных лазеров на иттербиевых кристаллах с накачкой коммерчески доступными диодными источниками с многомодовым волоконным выходом для мобильных лазерных систем, которые востребованы в прецизионной спектроскопии, метрологии и навигации, включая спутниковую.

## 2. Экспериментальная установка

В качестве активной среды использовались кристаллы KYW:Yb с массовой концентрацией Yb 7% толщиной 1.0 мм, вырезанные так, что ось *c* расположена вдоль направления генерации ( $E \parallel a, b$ ). Источником накачки служил излучатель LIMO25-F100-DL980 с волоконным многомодовым выходом; длина волны излучения накачки 980 нм, ширина спектра по полувысоте менее 5 нм, максимальная выходная мощность 25 Вт, диаметр сердцевины волокна 105 мкм. Поскольку у лазеров на иттербиевых кристаллах порог и мощность генерации зависят от температуры, кристалл охлаждался с помощью элемента Пельтье до температуры 9°C, при которой еще не начиналось его запотевание.

При использовании типовых схем резонаторов (рис.1) из-за несимметричного охлаждения в кристалле возникает линза с сильным астигматизмом, влияние которой существенно уменьшает эффективность лазера и не позволяет получить устойчивый режим синхронизации мод. Конструктивно сделать в таких схемах теплоотвод, симметричный относительно оси падающего излучения, проблематично. Для сравнения с характеристиками разработанных нами схем лазеров исследовались характеристики схемы лазера, показанной на рис.1,а. При минимально возможной длине резонатора межмодовая частота равнялась 670 МГц. Измеренный минимальный диаметр пятна накачки на активном элементе был примерно в два раза больше диаметра генерируемого излучения. Зависимость мощности выходного излучения от мощности накачки



Рис.1. Типовые конфигурации резонаторов фемтосекундных лазеров.

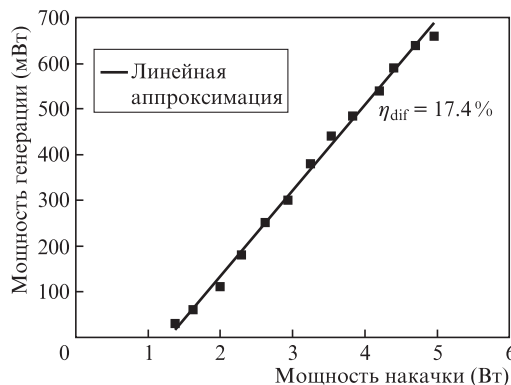


Рис.2. Зависимость мощности непрерывной генерации от мощности излучения накачки для конфигурации лазера, приведенной на рис.1,а.

приведена на рис.2 ( $\eta_{dif} = 17.4\%$ ). Для получения фемтосекундного режима было необходимо поместить в резонатор пару призм или зеркал GTI (Gires-Tournois-Interferometer mirrors) для компенсации дисперсии групповых скоростей (ДГС) и зеркало SESAM, что привело к увеличению длины резонатора. В результате из-за влияния астигматичной тепловой линзы кристалла порог генерации возрос, а выходная мощность упала в несколько раз (в зависимости от мощности накачки). По этой причине и из-за неполной компенсации ДГС фемтосекундный режим получить не удалось.

Для устранения астигматизма тепловой линзы нами предложена схема иттербиевого лазера с симметричным охлаждением активной среды (рис.3). Кристалл KYW:Yb (клиновидность  $0.5^\circ$ ) с нанесенным высокоотражающим диэлектрическим покрытием приклеивался к медному теплоотводу. Другая поверхность кристалла была просветлена. В такой конфигурации тепловая линза является симметричной относительно оси генерации и может быть скомпенсирована изменением расстояния между сферическим зеркалом и кристаллом. Фактически это модифицированный дисковый лазер, отличающийся тем, что толщина кристалла много больше диаметра перетяжек накачки и генерируемого излучения, которые составляли 110 и 40 мкм соответственно. По этой причине их оси должны совпадать. Поляризация излучения накачки и генерации направлена параллельно оси *a* кристалла (р-поляризация). Для компенсации ДГС использовалась пара GTI-зеркал (Layertec) с дисперсией  $D = -900 \pm 100 \text{ фс}^2$ .

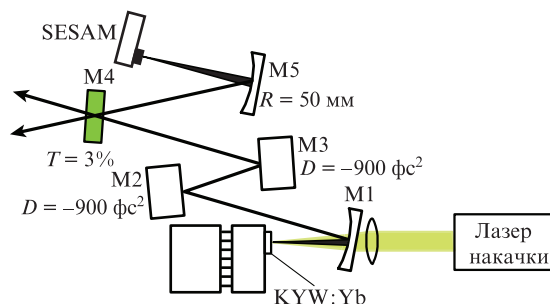


Рис.3. Схема фемтосекундного иттербиевого лазера: M1 – дихроичное зеркало с радиусом кривизны  $R = 50 \text{ мм}$ ; M2 и M3 – GTI-зеркала с дисперсией  $D = -900 \pm 100 \text{ фс}^2$  каждое; M4 – выходное зеркало с коэффициентом пропускания  $T = 3\%$ ; M5 – сферическое зеркало с  $R = 50 \text{ мм}$ . Излучения накачки и генерации имеют р-поляризацию.

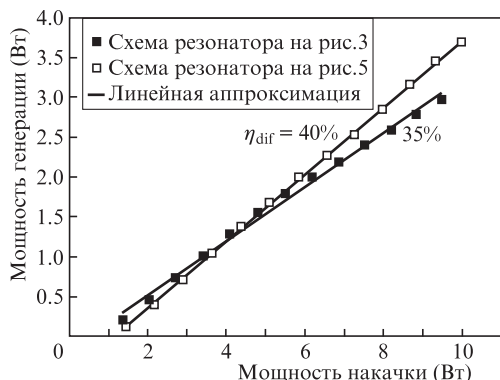


Рис.4. Зависимости мощности непрерывной генерации иттербиевого лазера со схемами резонатора, приведенными на рис.3 и 5, от мощности излучения накачки.

Для запуска режима синхронизации мод использовалось зеркало SESAM (BATOP GmbH) со следующими характеристиками: насыщаемое поглощение  $A_0 = 1\%$  на длине волны 1040 нм, глубина модуляции 0.6%, плотность энергии насыщения 120 мкДж/см<sup>2</sup>, постоянная времени релаксации 500 фс. Межмодовая частота составляла около 400 МГц. Регистрировалась мощность генерации в зависимости от мощности накачки для свободного режима генерации (рис.4). Насыщения зависимости не наблюдалось до мощности накачки по крайней мере 14 Вт. Получена максимальная выходная мощность 3.0 Вт при мощности накачки 9.5 Вт, порог генерации составил 0.8 Вт,  $\eta_{dif} = 35\%$ . Режим синхронизации мод получить не удалось, по-видимому, из-за неполной компенсации ДГС. Недостатком такой схемы является неоптимальная фокусировка многомодового излучения накачки.

В схеме, представленной на рис.5, указанный недостаток был минимизирован. Здесь фокусное расстояние линзы может быть уменьшено, поэтому излучение накачки будет фокусироваться в пятно меньших размеров и эффективность лазера возрастет. Кроме того, можно оптимизировать соотношение фокусного расстояния линзы и радиуса кривизны сферического зеркала. Однако изготовить отклоняющее зеркало (угол наклона – 45°) с большим пропусканием и отражением для излучений накачки

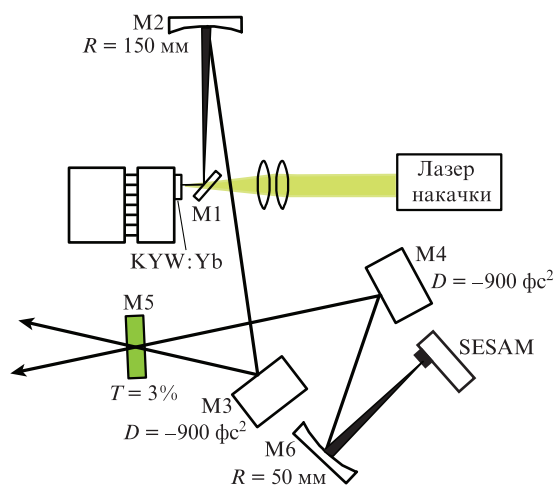


Рис.5. Схема фемтосекундного иттербиевого лазера: М1 – дихроичное зеркало; М2 – дихроичное зеркало с  $R = 150$  мм; М3 и М4 – GTI-зеркала с  $D = -900 \pm 100$  фс<sup>2</sup> каждое; М5 – выходное зеркало с  $T = 3\%$ ; М6 – сферическое зеркало с  $R = 50$  мм. Излучение накачки имеет р-поляризацию, генерация – s-поляризацию.

и генерации соответственно при одинаковой поляризации обоих технически сложно. Поэтому использовалось зеркало с пропусканием излучения накачки ~80% для поляризации по оси  $a$  кристалла (р-поляризация) и менее 0.05% для излучения генерации, поляризованного по оси  $b$  (s-поляризация). Порог генерации лазера составил 1 Вт,  $\eta_{dif} = 40\%$  (рис.4). При мощности лазера накачки 14 Вт максимальная выходная мощность достигала 4.9 Вт, т. е.  $\eta_{opt} = 35\%$ . Это является рекордным достижением при использовании многомодового источника накачки. Длительность импульса в режиме синхронизации мод не измерялась, межмодовая частота равнялась примерно 340 МГц, мощность генерации в режиме синхронизации мод составила 1.3 Вт при мощности накачки 7 Вт, длина волны излучения – 1041 нм, ширина спектра по полувысоте – около 2 нм. Режим самосинхронизации оказался не самостартующим, т. е. при включении или срыве генерации необходим запуск с помощью перемещения какого-либо элемента резонатора. После установления режима возникает гребенка узких межмодовых частот с высоким (более 60 дБ) отношением сигнал/шум. Спектр на межмодовой частоте в режиме синхронизации мод приведен на рис.6. При использовании одного зеркала GTI ( $D = -900$  фс<sup>2</sup>) режим синхронизации мод не возникает, а при трех зеркалах ( $-2700$  фс<sup>2</sup>) возникает, но запускается с трудом, не стабилен, т. е. точка полной компенсации дисперсии находится между  $D = -1800$  и  $-2700$  фс<sup>2</sup>. Для полной компенсации ДГС необходимо подбирать зеркала GTI с нужными характеристиками или использовать для точной компенсации пару клиньев в резонаторе.

В настоящее время существуют серийные одиночные многомодовые диодные лазеры с выходной мощностью до 10 Вт, пригодные для накачки разработанного лазера. При их использовании возможно создание компактного моноблока: лазер + накачка. Кроме того, схема не требует специальных мер защиты источника накачки от обратного отражения из-за его малости по сравнению с таковым для типовых схем [20–22], что существенно для мобильных систем. Таким образом, предложенная схема (рис.5) перспективна для разработки малогабаритных лазерных систем, например мобильных прецизионных фемтосекундных оптических часов. Следует отметить, что указанная схема не оптимизирована на максимальную эффективность. Используемый в настоящей работе источник накачки имеет круговую поляризацию выходного излучения. При этом s-поляризация излучения накачки

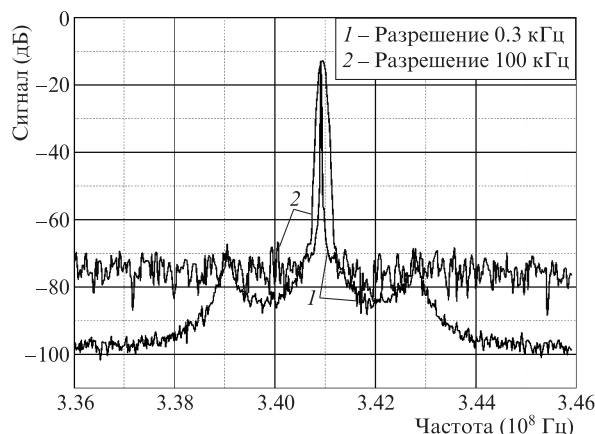


Рис.6. Спектры излучения на межмодовой частоте в режиме синхронизации мод, снятые при разрешении 0.3 и 100 кГц.

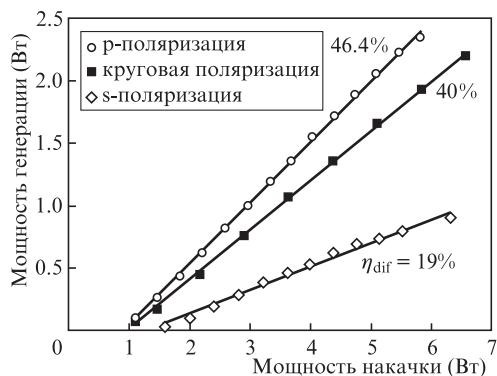


Рис.7. Зависимости мощности непрерывной генерации от мощности накачки при круговой поляризации, s-поляризации (порог 1.2 Вт) и р-поляризации (порог 0.74 Вт) излучения накачки.

используется неэффективно из-за меньшего поглощения в кристалле ( $E \parallel b$ ) и невысокого пропускания зеркала, что снижает общую эффективность и увеличивает порог генерации. На рис.7 приведены зависимости мощности генерации от мощности накачки при различных поляризациях излучения накачки. При использовании эффективной р-поляризации излучения накачки ( $E \parallel a$ ) порог генерации уменьшился до 0.74 Вт, а  $\eta_{\text{dif}}$  выросла до 46.4%. Предельная эффективность может быть получена при использовании в такой схеме одномодовой диодной накачки, что позволяет обеспечить полное перекрытие перетяжек пучков накачки и генерации.

Таким образом, разработана перспективная схема иттербиевого лазера с многомодовым источником накачки. Для лазера на кристалле KYW:Yb в непрерывном режиме получены рекордные значения дифференциальной (40%) и полной оптической (35%) эффективностей. Реализован режим синхронизации мод, что позволяет ис-

пользовать схему для разработки малогабаритных лазерных систем, например мобильных прецизионных фемтосекундных синтезаторов. Оптимизация параметров лазера позволит увеличить его эффективность.

Авторы благодарны Н.И.Чуносову за помощь в эксперименте.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-02-00541-а) и Программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» с использованием оборудования ЦКП «Фемтосекундный лазерный комплекс».

1. Udem T., Holzwarth R., Hänsch T.W. *Nature*, **416**, 233 (2002).
2. Nakajima Y. et al. *Opt. Express*, **18**, 1667 (2010).
3. Kuleshov N.V. et al. *Opt. Lett.*, **22**, 1317 (1997).
4. Kuleshov N.V. et al. *Appl. Phys. B*, **64**, 409 (1997).
5. Hönninger C. et al. *Appl. Phys. B*, **69**, 3 (1999).
6. Brenier A., Boulon G. *J. Alloys Compd.*, **323–324**, 210 (2001).
7. Brunner F. et al. *Opt. Lett.*, **25**, 1119 (2000).
8. Liu H., Nees J., Mourou G. *Opt. Lett.*, **26**, 1723 (2001).
9. Paunescu G., Hein J., Sauerbrey R. *Appl. Phys. B*, **79**, 555 (2004).
10. Kim G.H. и др. *Оптика и спектроскопия*, **108**, 819 (2010).
11. Liu J. et al. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 104 (2010).
12. Klenner A., Golling M., Keller U. *Opt. Express*, **21**, 10351 (2013).
13. Lagatsky A.A., Brown C.T.A., Sibbert W. *Opt. Express*, **12**, 3928 (2004).
14. Lagatsky A.A. et al. *Opt. Lett.*, **30**, 3234 (2005).
15. Meyer S.A., Squier J.A., Diddams S.A. *Eur. Phys. J. D*, **48**, 19 (2008).
16. Wasylczyk P., Wnuk P., Radzewicz C. *Opt. Express*, **17**, 5630 (2009).
17. Yamazoe S., Katou M., Adachi T., Kasamatsu T. *Opt. Lett.*, **35**, 748 (2010).
18. Schratwieser T.C., Leburn C.G., Reid D.T. *Opt. Lett.*, **37**, 1133 (2012).
19. Endo M., Ozawa A., Kobayashi Y. *Opt. Express*, **20**, 12191 (2012).
20. Fiebig C. et al. *Electron. Lett.*, **44**, 1253 (2008).
21. Pekarek S. et al. *Opt. Express*, **18**, 16320 (2010).
22. Pekarek S. et al. *Opt. Express*, **19**, 16491 (2011).