

Компактный Yb:Er-лазер, работающий с частотой следования импульсов 10 Гц в режиме модуляции добротности

А.А.Крылов, В.А.Бученков, А.В.Усков

Представлены результаты разработки компактного Yb:Er-лазера, генерирующего в режиме модуляции добротности акустооптическим затвором импульсы излучения ($\lambda = 1.5$ мкм) с энергией 8 мДж, длительностью 20 нс и с частотой следования 10 Гц. Расходимость лазерного излучения на выходе формирующей оптической системы составляет 1 мрад. Экспериментальный образец способен стабильно работать в широком температурном диапазоне с сохранением параметров выходного излучения. Созданный лазер имеет габариты 110 × 30 × 30 мм с учетом габаритов формирующей оптической системы. Образец прошел ресурсные испытания и продемонстрировал стабильную работу при непрерывной генерации 50000 импульсов излучения.

Ключевые слова: Yb:Er-стекло, диодная накачка, модуляция добротности, акустооптический затвор.

1. Введение

Применение в дальнометрии в качестве источника излучения импульсных твердотельных лазеров, работающих в безопасном для глаз спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм, позволяет не только использовать устройства на их основе в густонаселенных районах, но и реализовать довольно высокую точность и дальность измерений [1–3].

Одним из наиболее распространенных типов твердотельных лазеров, работающих в спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм, являются лазеры с активным элементом (АЭ), изготовленным из Yb:Er-стекла. Это, прежде всего, связано с большим временем жизни верхнего лазерного состояния в активной среде (от 6 до 10 мс), позволяющим осуществлять накачку длинными импульсами и эффективно запасать энергию. Кроме того, наличие широких полос поглощения у Yb:Er-стекла в спектральной области излучения коммерчески доступных лазерных диодов дает возможность использовать такие лазеры без систем точной термостабилизации. Помимо этого, генерация излучения происходит сразу на длине волны 1.54 мкм и не требует дополнительных преобразователей частоты излучения. Все это в сочетании с коммерческой доступностью АЭ из фосфатного стекла делает Yb:Er-лазеры весьма привлекательными для использования в качестве источников излучения в дальнометрии.

Однако при разработке лазеров такого типа возникает ряд проблем. Во-первых, для применения лазерного излучателя в переносном устройстве необходима его ком-

пактность, что требует высокой энергетической эффективности. Во-вторых, схема и конструкция лазера должны обеспечивать не только большой КПД, но и высокую стабильность работы в широком температурном диапазоне [4–6].

На сегодняшний день единственным модулятором добротности, который используется в компактных лазерах с АЭ из Yb:Er-стекла, работающих с частотой следования импульсов до 10 Гц и выше, является затвор на основе нарушенного полного внутреннего отражения, прошедший на смену оптико-механическим затворам с вращающейся призмой [6, 7]. Однако при использовании такого типа модуляторов в устройстве, работающем в широком температурном диапазоне, необходимо применять дополнительные системы термостабилизации затвора. В конечном итоге сложная технология производства в сочетании с необходимостью применения специальной системы управления определяет его низкую коммерческую доступность.

Настоящая работа посвящена разработке компактного лазера с АЭ из фосфатного Yb:Er-стекла, модуляция добротности в котором осуществляется малогабаритным акустооптическим затвором [8–11]. Созданный лазерный излучатель на $\lambda = 1.5$ мкм стабильно работает в широком температурном диапазоне с частотой следования импульсов от 1 до 10 Гц, с выходной энергией 8 мДж, длительностью не более 1 мрад после формирующей оптической системы. Такие характеристики лазера с учетом его компактности (габариты 110 × 30 × 30 мм) позволяют говорить о том, что он отвечает самым современным требованиям для его применения в импульсной лазерной дальнометрии в безопасном для глаз диапазоне длин волн. Следует отметить, что по энергии импульса и габаритам разработанный лазер сравним с устройствами от компании Kigre [12] – мирового лидера в производстве безопасных для глаз лазеров, и при этом обладает лучшей расходимостью излучения и имеет встроенную систему охлаждения.

А.А.Крылов, В.А.Бученков. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: kril67@mail.ru

А.В.Усков. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: alexusk@lebedev.ru

Поступила в редакцию 26 января 2018 г., после доработки – 15 мая 2018 г.

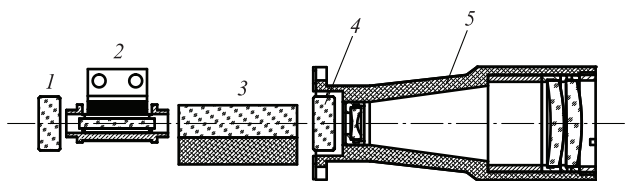


Рис.1. Оптическая схема лазерного излучателя на основе Yb:Er-стекла:

1 – глухое зеркало; 2 – квантрон; 3 – акустооптический модулятор добротности; 4 – выходное зеркало; 5 – формирующая оптическая система (объектив).

2. Конструкция лазера

Оптическая схема компактного лазерного излучателя на Yb:Er-стекле с диодной накачкой, работающего в режиме модуляции добротности, представлена на рис.1.

Оптический резонатор лазера длиной 40 мм образован глухим зеркалом 1 и выходным зеркалом 4. Коэффициент отражения выходного зеркала и радиус кривизны глухого зеркала были подобраны экспериментально для максимизации выходной энергии при работе лазера с активной модуляцией добротности при частоте следования импульсов 10 Гц и накачке импульсами лазерных диодов с суммарной энергией 750 мДж. Сначала при фиксированном значении радиуса кривизны глухого зеркала 2000 мм было подобрано оптимальное значение коэффициента отражения выходного зеркала, составившее 82% (рис.2,*а*). Затем был проведен эксперимент, в котором использовалось выходное зеркало с оптимальным коэффициентом отражения, а радиус кривизны глухого зеркала

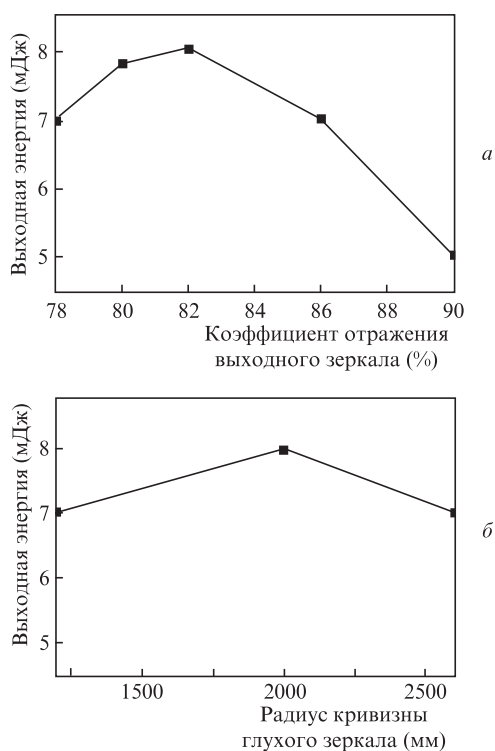


Рис.2. Экспериментальные результаты определения оптимальных параметров зеркал резонатора в режиме активной модуляции добротности с частотой следования 10 Гц и при накачке импульсами с энергией 750 мДж: зависимости выходной энергии лазера от коэффициента отражения выходного зеркала при радиусе кривизны глухого зеркала 2000 мм (*а*), а также от радиуса кривизны глухого зеркала при коэффициенте отражения выходного зеркала 82% (*б*).

варьировался. Оказалось, что оптимальным значением радиуса является выбранное ранее – 2000 мм (рис.2,*б*).

Для реализации высокоэффективного компактного лазера без значительного увеличения его габаритов и усложнения конструкции и для однородной прокачки активной среды был разработан квантрон с трехсторонней системой накачки, представленный на рис.3. При разработке квантрона использовались подходы и методы, описанные в работе [13].

В качестве источника оптической накачки используются три линейки лазерных диодов (ЛЛД) 1 (рис.3) с центральной длиной волны излучения 940 нм при комнатной температуре. Накачка линейки осуществляется импульсами тока длительностью 5 мс. Для поддержания рабочей температуры ЛЛД установлены на медный теплоотвод 2, охлаждаемый с помощью термоэлектрического модуля (на рис.3 не показан). На термоэлектрический модуль установлен игольчатый радиатор, обеспечивающий стабильную работу ЛЛД с частотой следования импульсов 10 Гц при пассивно конвективном охлаждении для энергий накачки до 750 мДж в импульсе и до 1230 мДж при использовании вентилятора.

Активный элемент 3 изготовлен в виде цилиндрического стержня диаметром 2.2 мм и длиной 12 мм из фосфатного Yb:Er-стекла с концентрацией эрбия $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и иттербия $2.4 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Он вклеен в осветитель 7 с помощью специального оптически прозрачного кремнийорганического состава 8. Использование такого состава позволяет не только обеспечить отведение тепла от АЭ (что особенно важно при работе на частоте 10 Гц), но и компенсировать разность теплового расширения между АЭ и светоотражателем. Сам осветитель представляет собой трубку из сапфира, на внешнюю поверхность которой нанесено серебряное отражающее покрытие 5. Дальнейшее охлаждение АЭ и осветителя обеспечивает медный теплоотвод 4, прикрепленный к основному корпусу лазера.

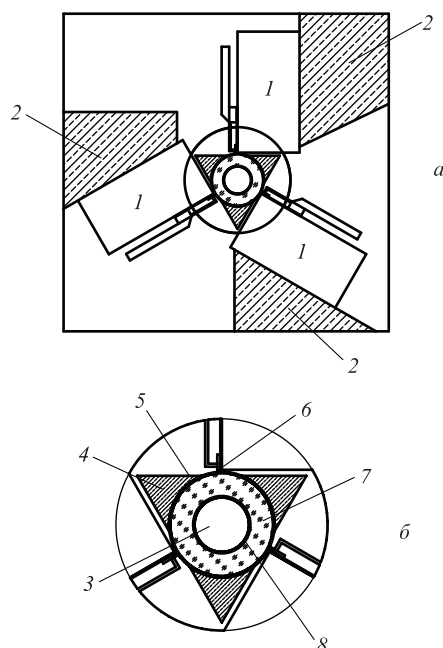


Рис.3. Схема системы накачки квантрона (*а*) и осветителя (в увеличенном масштабе) (*б*):

1 – линейки лазерных диодов; 2 – теплоотвод для линеек лазерных диодов; 3 – АЭ; 4 – теплоотвод для АЭ; 5 – отражающее покрытие; 6 – излучающая поверхность; 7 – осветитель; 8 – кремнийорганический теплопроводящий состав.

Теоретическая эффективность использованной трехсторонней системы накачки η_{theor} , вычисляемая как отношение мощности излучения, поглощенного в объеме активной среды, к мощности излучения накачки, была определена по методике, описанной в работе [14], и составляла $\sim 78\%$.

Активным модулятором добротности 3 служит акустооптический затвор нового поколения, изготовленный из кристаллического кварца и отличающийся малыми габаритами по сравнению со стандартными затворами [8–11]. Управление модуляцией добротности осуществляется электрическим сигналом с амплитудой 30 В и частотой 80 МГц, подаваемым на пьезопреобразователь. Оптимальная для взаимодействия с лазерным излучением область апертуры затвора выбрана на основе результатов исследований, выполненных в работе [15].

Для коллимации излучения лазера, а также для компенсации геометрической расходимости выходного излучения используется разработанный десятикратный трехлинзовый объектив 5.

3. Эксперимент

Для оценки эффективности предложенной системы накачки была определена зависимость выходной энергии лазера в отсутствие модуляции добротности от энергии накачки, приведенная на рис.4. Видно, что пороговое условие генерации достигается при энергии импульса накачки 360 мДж. Эффективность системы накачки, оцененная по отношению энергии свободной генерации к энергии накачки с учетом пропускания выходного зеркала, стоксовых потерь и потерь на релаксацию населенности верхнего рабочего уровня, может быть определена по формуле [16]:

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{E_{\text{out}} r}{E_{\text{pump}} (1 - r)} \frac{\tau_{\text{decay}}}{\tau_{\text{pump}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_{\text{pump}}}{\tau_{\text{decay}}}\right) \right] \left(1 - \frac{\lambda_{\text{pump}}}{\lambda_{\text{laser}}} \right),$$

где r – коэффициент отражения выходного зеркала; $\tau_{\text{decay}} = 8$ мс – время жизни верхнего рабочего лазерного уровня; $\tau_{\text{pump}} = 5$ мс – длительность импульса накачки; $\lambda_{\text{pump}} = 940$ нм – длина волны излучения накачки; $\lambda_{\text{laser}} = 1535$ нм – длина волны лазерного излучения.

Вычисленная таким образом эффективность системы накачки составила $\eta_{\text{exp}} \approx 66\%$, что меньше значения

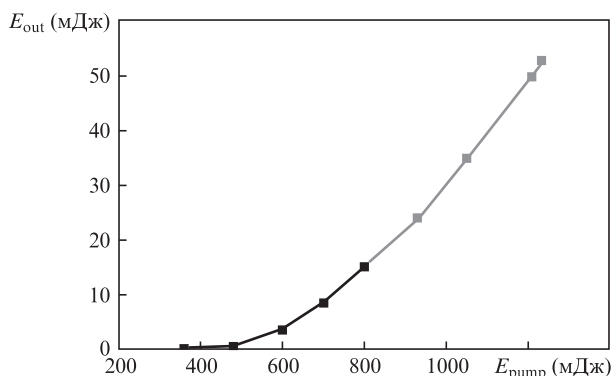


Рис.4. Зависимость энергии свободной генерации E_{out} от энергии накачки E_{pump} при частоте следования импульсов 10 Гц. Черным цветом показаны значения выходной энергии, полученные при пассивном охлаждении ЛЛД, серым цветом – при обдуве вентилятором игольчатого радиатора.

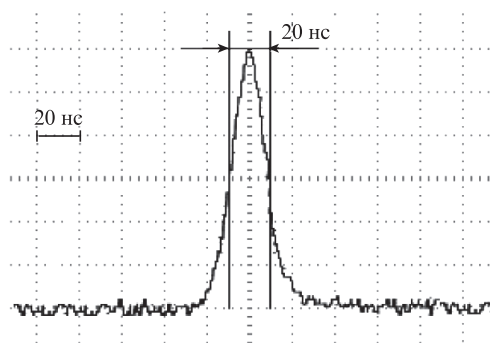


Рис.5. Оциллограмма лазерного импульса при частоте следования импульсов 10 Гц.

$\eta_{\text{theor}} \approx 78\%$, полученного выше в результате теоретического моделирования. Расхождение между экспериментальным значением и теоретической оценкой может быть объяснено наличием паразитных потерь в резонаторе лазера, которые не были учтены при моделировании.

Использование модулятора добротности позволило обеспечить стабильность работы лазера с частотой следования импульсов до 10 Гц в широком температурном диапазоне. Энергия импульса на выходе лазера при этом стабильно составляла 8 мДж в стационарном режиме. Данный режим соответствовал энергиям импульсов накачки 750 мДж и свободной генерации 13.5 мДж. При этом эффективность преобразования выходной энергии лазера при переходе от режима свободной генерации к моноимпульсному режиму составляла 60%. Длительность импульса при выходной энергии 8 мДж была 20 нс. Ограничивающим фактором, не позволяющим получать импульсы излучения с энергией большей 8 мДж при частоте их следования 10 Гц, в конструкции разработанного излучателя стала система охлаждения, не рассчитанная на такую тепловую нагрузку при пассивном охлаждении. Оциллограмма импульса излучения лазера, работающего с частотой следования импульсов 10 Гц, представлена на рис.5.

Использование формирующей оптической системы с десятикратным увеличением позволяет добиться расходимости лазерного излучения 1 мрад.

Лазер в корпусе с системой охлаждения, обеспечивающей его непрерывную работу, имеет габариты 110×30×30 мм. Он прошел климатические и ресурсные испытания, в ходе которых продемонстрировал стабильную работу при температурах от -40°C до $+60^\circ\text{C}$ с сохранением параметров выходного излучения при наработке более 50000 импульсов. Следует отметить, что при повышенной тем-

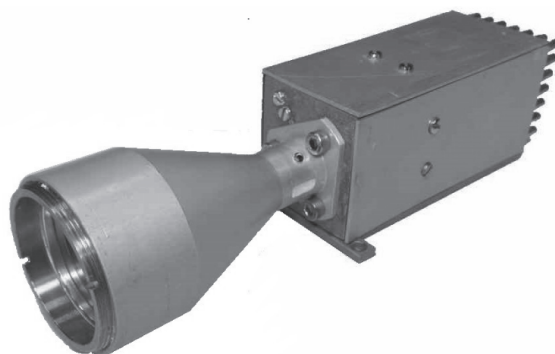


Рис.6. Фотография разработанного лазерного излучателя.

пературе окружающей среды, для предотвращения выхода из строя линеек лазерных диодов из-за общего перегрева, без изменения конструкции системы охлаждения, работа лазера с частотой следования импульсов 10 Гц должна быть организована циклически: одна минута работы, одна минута охлаждения.

Внешний вид разработанного экспериментального образца с формирующей оптической системой представлен на рис.6.

4. Заключение

В работе представлен импульсный лазер на Yb:Ег-стекле, работающий с частотой следования импульсов до 10 Гц. Максимальное значение выходной энергии в моноимпульсном режиме составляет 20 мДж при энергии импульса накачки 1050 мДж (максимальная энергия накачки, которая может быть получена с использованием данных лазерных диодов, составляет 1350 мДж). Это соответствует предельной внутрирезонаторной плотности мощности и может приводить к повреждениям поверхностей оптических компонентов. Кроме того, данный режим в настоящей конструкции может быть реализован только с активным охлаждением излучателя при помощи вентилятора. Поскольку подбор выходного зеркала осуществлялся при меньших уровнях накачки, можно сделать вывод о том, что на основании разработанного излучателя, при увеличении эффективности системы охлаждения и правильном выборе коэффициента пропускания выходного зеркала, может быть разработан лазер на Yb:Ег-стекле, обеспечивающий энергию импульса излучения 20 мДж при энергии импульса накачки 1050 мДж с частотой следования импульсов до 10 Гц. Несмотря на то что теоретически определенная эффективность разработанной системы накачки с оптимизированными параметрами составила $\eta_{\text{theor}} = 78\%$, на практике нам удалось получить лишь $\eta_{\text{exp}} = 66\%$. Такое расхождение, скорее всего, связано с наличием неучтенных паразитных потерь в резонаторе.

Разработанный лазерный излучатель на $\lambda \sim 1.5$ мкм продемонстрировал стабильную работу в широком температурном диапазоне с частотой следования импульсов от 1 до 10 Гц, с выходной энергией 8 мДж, длительностью импульса не более 20 нс и с расходимостью излучения после формирующей оптической системы не более 1 мрад. Лазер имеет малые габариты (110×30×30 мм), что является важным для создания нового поколения систем лазерной дальнометрии. По выходной энергии в импульсе и габаритам лазер сравним с устройствами от компании Kigre [12] – мирового лидера в производстве лазеров этого типа, и при этом обладает лучшей расходимостью излучения.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 08-08).

1. Ставров А.А., Поздняков М.Г. *Доклады БГУИР*, **1** (2), 59 (2003).
2. Stepanov A.I., Nikitichev A.A., Iskandarov M.O. *Proc. SPIE*, **4900**, 1085 (2002).
3. Mierczyk Z. *Proc. SPIE*, **4237**, 177 (2000).
4. Karlsson G. et al. *Appl. Phys. B*, **75** (1), 41 (2002).
5. Georgiou E., Musset O., Boquillon J.P. *Appl. Phys. B*, **70** (6), 755 (2000).
6. Levoshkin A., Petrov A., Montagne J.E. *Opt. Commun.*, **185** (4), 399 (2000).
7. Georgiou E. et al. *Opt. Commun.*, **198** (1), 147 (2001).
8. Kerveyan L. et al. *Proc. SPIE*, **6189**, 61891D (2006).
9. Chen Y. et al. *Opt. Express*, **21** (16), 18919 (2013).
10. Karlsson G. et al. *Opt. Commun.*, **217** (1–6), 317 (2003).
11. Alawsi S.M., Al-Janabi L.A.K., Mahdi S.A. *Opt. Photon. J.*, **8** (04), 98 (2018).
12. http://www.kigre.com/products/laser_transmitters.htm.
13. Гречин С.Г., Николаев П.П. *Квантовая электроника*, **39** (1), 1 (2009) [*Quantum Electron.*, **39** (1), 1 (2009)].
14. Buchenkov V.A. et al. *Proc. SPIE*, **9893**, 98930Y (2016).
15. Magdich L.N. et al. *J. Commun. Technol. Electron.*, **53** (12), 1442 (2008).
16. Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* (Springer, 2013, Vol. 1, pp. 115 – 118).