

УДК 621.378

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ YAG:Nd³⁺-ЛАЗЕР С ОБРАЩЕНИЕМ
ВОЛНОВОГО ФРОНТА В СВЕТОВОДЕ

© 2011 г. С. А. Батище, А. А. Кузьмук, Г. А. Татур

Институт физики НАН Беларуси

Республика Беларусь, 220072, Минск, просп. Независимости, 68

Поступила в редакцию 08.06.2010 г.

Описаны оптическая схема и устройство частотного лазера на YAG:Nd³⁺ с двухпроходным усилителем и зеркалом с обращением волнового фронта на вынужденном рассеянии Мандельштама–Бриллюэна в световоде. Максимальная энергия излучения составляет 1000 мДж на длине волны 1.064 мкм и 500 мДж, 200 мДж, 20 мДж на второй, четвертой и пятой гармониках соответственно при расходимости $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ рад и длительности импульса ~ 4.5 нс.

В [1, 2] показана практическая возможность создания лазеров на YAG:Nd³⁺ с малой расходимостью в схемах, использующих явление обращения волнового фронта (о.в.ф.) [3] на основе вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (в.р.М.Б.) в жидких средах (ацетон, сероводород, четыреххлористый углерод и другие жидкости) для компенсации оптических неоднородностей в двухпроходном усилителе. Построенный по такому принципу YAG:Nd³⁺-лазер с энергией в импульсе до 3.4 Дж на длине волны 1064 нм описан в [4]. В [5, 6] предложены приборные образцы таких лазеров, а в [7–9] продемонстрировано их применение в двухволновых у.ф.–и.к.–системах лазерной очистки античного мрамора и художественных произведений из кожи, бумаги, живописи.

Для ряда применений, требующих высокой надежности лазерного оборудования, существенным шагом вперед является создание лазерной системы, использующей твердотельное о.в.ф.–в.р.М.Б.-зеркало. В данной работе приводятся результаты исследований, направленных на создание мощного YAG:Nd³⁺-лазера с о.в.ф. при в.р.М.Б. в кварцевом световоде.

Оптическая схема лазера приведена на рис. 1. В лазерную систему входят задающий лазер *A*, генерирующий излучение со структурой поля TEM_{00} , двухпроходный усилитель с обращающим в.р.М.Б.-зеркалом *B* и блок преобразования гармоник *B*. В состав задающего лазера *A* входят резонатор длиной ~ 92 см, образованный “глухим” зеркалом *1* и стеклянной пластинкой *6*, активный элемент *5* из YAG:Nd³⁺ размером $\varnothing 4 \times 80$ мм, тонкопленочный поляризатор *3*, пассивный затвор *2* из LiF:F₂⁻ и регулируемая диафрагма *4*.

Активный элемент возбуждается излучением одной импульсной лампы P2066 (производство Heraeus Noblelight Ltd.) с диаметром и длиной

разрядного промежутка $\varnothing 5 \times 60$ мм, установленной вместе с активным элементом в отражателе из молочного стекла. Энергия импульса составляет $\sim 5–7$ мДж. Диаметр пучка 1.5 мм. Двухпроходный усилитель *B* с обращающим в.р.М.Б.-зеркалом состоит из трех активных элементов *12* ($\varnothing 10 \times 100$ мм) со скошенными торцами, кварцевой пластинки $\lambda/4$ *13*, фокусирующей линзы *14* и отрезка кварц-кварцевого световода *15* начальной длиной 12 м со сколотыми под углом $\sim 90^\circ$ входным и выходным торцами.

Каждый активный элемент вместе с импульсной лампой P2067 (Heraeus Noblelight Ltd.) с диаметром и длиной разрядного промежутка $\varnothing 8 \times 80$ мм находится внутри отражателя из молочного стекла. Лазер охлаждается дистиллированной водой. Энергия накачки каждого активного элемента двухпроходного усилителя составляет 75 Дж при длительности свечения лампы $\sim 120–150$ мкс. Все критические к угловым разбюстировкам элементы с целью обеспечения стабильности работы крепятся на каркасе, собранном на инваровых стержнях. Все рабочие поверхности оптических деталей просветлены.

Для ввода излучения в двухпроходный усилитель используется френелевское отражение от клиновидной подложки *11* [10]: при этом коэффициент отражения для выбранной поляризации излучения составляет 10%. Апертуры задающего лазера и двухпроходного усилителя согласовываются двумя телескопами *8* и *10* с общим увеличением $10\times$. Усиленное излучение выходит через ту же клиновидную подложку *11*.

Вследствие поворота поляризации на 90° в результате двойного прохода через кварцевую пластинку $\lambda/4$ коэффициент отражения для обращенной усиленной волны составляет $\sim 1\%$. При появлении под действием излучения накачки наведенного двулучепреломления в активных эле-

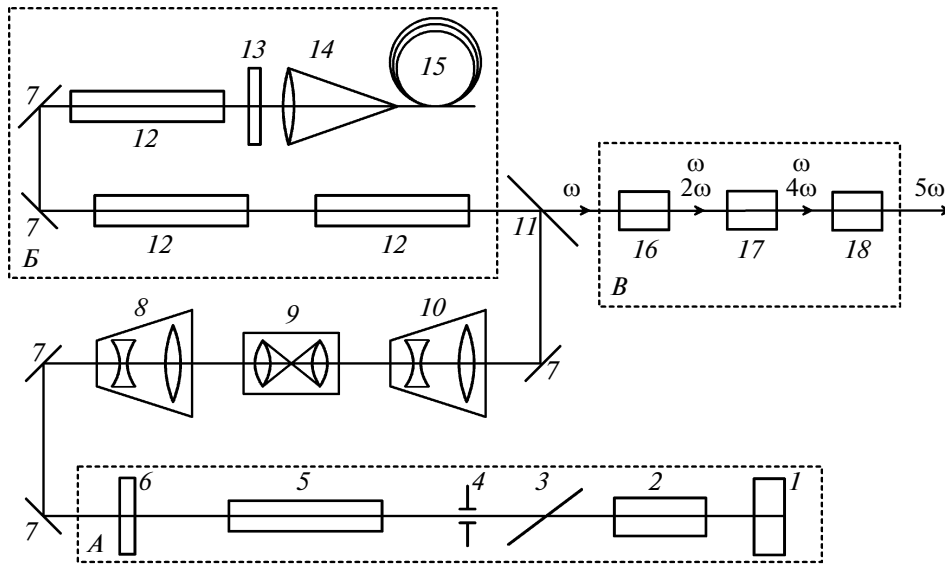


Рис. 1. Оптическая схема лазера. *A* – задающий лазер, *B* – двухпроходовой усилитель, *B* – блок преобразования гармоник. 1 – “глухое” зеркало резонатора; 2 – пассивный затвор LiF:F_2^- ; 3 – поляризатор; 4 – регулируемая диафрагма; 5 – активный элемент YAG:Nd^{3+} типоразмера $\varnothing 4 \times 80$ мм; 6 – стеклянная пластинка; 7 – поворотные зеркала ($\lambda = 1.06$ мкм); 8 – расширяющий телескоп с увеличением $5\times$; 9 – телескоп-развязка с увеличением $1\times$; 10 – расширяющий телескоп с увеличением $2\times$; 11 – клиновидная подложка; 12 – активные элементы типоразмера $\varnothing 10 \times 100$ мм; 13 – кварцевая пластинка $\lambda/4$; 14 – линза ($f = +15$ см); 15 – отрезок кварц-кварцевого световода (апертура 0.22); 16, 17, 18 – генераторы второй, четвертой, пятой гармоник, соответственно.

ментах доля обратной волны, проходящей в задающий генератор, возрастает.

Для защиты оптических элементов задающего генератора от повреждения излучением обратной волны, возникающим вследствие наведенного излучением импульсных ламп двулучепреломления, между телескопами 8 и 10 установлен одно-

кратный телескоп Кеплера 9, играющий роль плазменной оптической развязки. Фокусное расстояние его линз подобрано таким, чтобы излучение задающего лазера проходило беспрепятственно, а излучение обратной волны с энергией 30–40 мДж вызывало оптический пробой в фокусе линзы; при этом избыток лазерного излучения обратной волны поглощался в плазме.

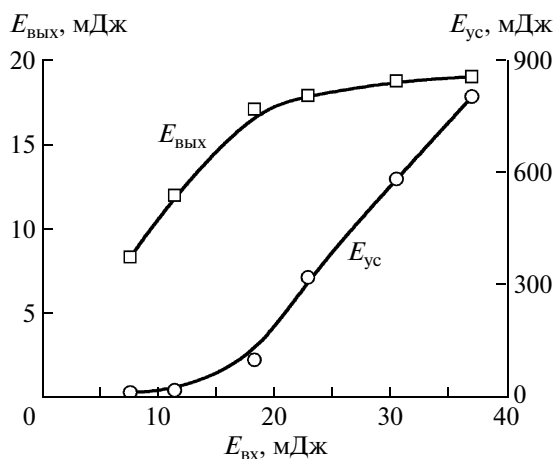


Рис. 2. Зависимости энергии выходного излучения двухпроходового усилителя $E_{\text{ус}}$ и энергии импульса излучения на выходе световода $E_{\text{вых}}$ от энергии излучения $E_{\text{вх}}$ световода, входящего в отрезок длиной 12 м и с центральной жилой $\varnothing 400$ мкм.

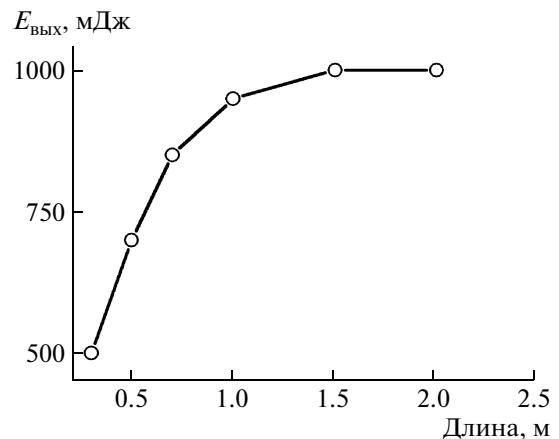


Рис. 3. Зависимость максимальной энергии излучения двухпроходового усилителя $E_{\text{ус}}$ от длины отрезка кварц-кварцевого световода с центральной жилой $\varnothing 600$ мкм.

Достоинством данной схемы ввода-вывода излучения и оптической развязки являются простота и надежность работы. Условие ее применения – высокое предельное однопроходовое усиление, обеспечивающее насыщение двухпроходового усилителя при малой плотности мощности входного сигнала. Однопроходовое усиление для слабого сигнала, при котором еще не происходило самовозбуждение, достигало $\sim 10^4$.

На рис. 2 приводятся зависимости энергии выходного излучения усилителя и энергии импульса излучения на выходе световода от энергии входящего в световод излучения. Видно, что энергия излучения на выходном торце световода насыщается и достигает ~ 19 мДж при энергии входного излучения ~ 37 мДж, что соответствует с учетом френелевского отражения от торцов световода коэффициенту отражения в р.М.Б.-зеркала $\sim 40\%$. Максимальные значения в этих зависимостях соответствуют уровню энергии излучения, входящего в световод, непосредственно перед разрушением последнего вследствие оптического пробоя за его входным торцом, и зависят от диаметра центральной жилы световода (таблица).

На рис. 3 показана зависимость энергии выходного излучения усилителя от длины световода. Уменьшение длины световода производилось удалением фрагментов, начиная с его выходного торца. Видно, что энергия усилителя насыщается уже при длине отрезка 1.5 м.

На рис. 4 представлены осциллограммы выходного излучения усилителя для двух значений длины световода и, для сравнения, когда вместо световода установлена кювета с ацетоном. Видно, что в случае применения световода импульс излу-

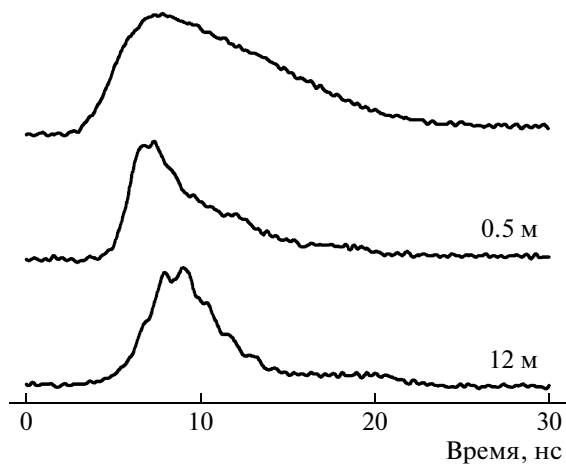


Рис. 4. Осциллограммы выходного излучения усилителя в случае, когда в качестве в.р.М.Б.-зеркала использовался отрезок кварц-кварцевого световода с центральной жилой $\varnothing 800$ мкм и длиной 12 и 0.5 м; верхняя кривая для случая, когда вместо световода – кювета с ацетоном.

Максимальные значения энергии двухпроходового усилителя для различных диаметров центральной жилы кварц-кварцевого световода длиной 12 м

Диаметр центральной жилы, мкм	Максимальная энергия двухпроходового усилителя, мДж
800	1000
600	1000
400	800
200	150

чения на выходе двухпроходового усилителя сокращается до ~ 4.5 нс.

На рис. 5 приведена зависимость доли энергии излучения на выходе двухпроходового усилителя, распространяющейся в угле 0.5 мрад, от частоты следования импульсов. Видно, что при увеличении частоты следования импульсов от 1 до 10 Гц доля энергии излучения в угле 0.5 мрад уменьшается с 80 до 70%. Ухудшение качества обращения фронта при повышении частоты следования импульсов связано прежде всего с наведенным в активных элементах двулучепреломлением, которое в данной схеме о.в.ф. не компенсируется.

В качестве генераторов 2-ой, 4-ой и 5-ой гармоник использовались кристаллы КТР, DKDP и ВВО длиной 5.5 мм, 25 мм, 6 мм, соответственно, и сечением 12×12 мм². Для подстройки и стабилизации угла синхронизма все кристаллы помещены в термостаты с шагом регулировки температуры 0.1°C .

В целом в лазерной системе достигнуты следующие характеристики излучения: энергия излучения на $\lambda = 1064$ нм составляет 1000 мДж, на $\lambda = 532$ нм – 500 мДж, на $\lambda = 266$ нм – 200 мДж, на $\lambda = 213$ нм – 20 мДж; расходимость излучения

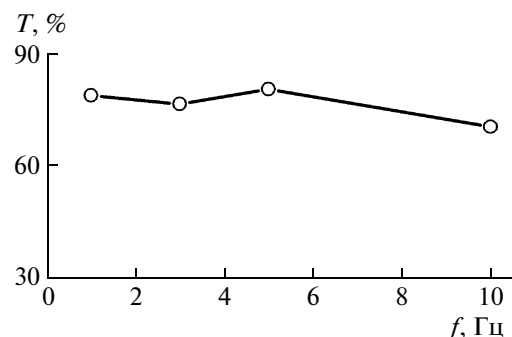


Рис. 5. Зависимость доли энергии излучения T на выходе двухпроходового усилителя, распространяющейся в угле 0.5 мрад, от частоты следования импульсов f при использовании отрезка световода с центральной жилой $\varnothing 800$ мкм длиной 12 м.

$\sim 5 \cdot 10^{-4}$ рад, длительность импульса ~ 4.5 нс, частота следования импульсов 1–10 Гц.

Применение описанного лазера перспективно в системах лазерной очистки художественных произведений и промышленно-технологических объектов, медицине, научных исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубарев И.Г., Миронов А.Б., Михайлов С.И.* // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. № 9. С. 2035.
2. *Нон D.T.* // J. Opt. Soc. Amer. 1980. V. 70. № 6. P. 635.
3. *Зельдович Б.Я., Поповичев В.И., Рагульский В.В., Файзуллоев Ф.С.* // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. № 3. С. 160.
4. *Артемьев Н.М., Батище С.А., Багдасаров Х.С. и др.* // Журн. прикл. спектр. 1987. Т. 47. № 6. С. 920.
5. *Андреев С.П., Батище С.А., Кузьмук А.А. и др.* // ПТЭ. 1991. № 5. С. 158.
6. *Андреев С.П., Батище С.А., Кузьмук А.А. и др.* // ПТЭ. 1992. № 3. С. 183.
7. *Anisimov A., Batishche S., Egglezis A. et al.* // III Intern. Workshop on New Trends in Laser Cleaning. Oct. 3–4 2003. Crete, Greece. Institute of Electronic Structure and Laser–Hellas (FORTH), 2003. P. 60.
8. *Batishche S., Englezis A., Gorovets T. et al.* // Appl. Surf. Scien. 2005. V. 248. №. 1–4. P. 264.
9. *Batishche S., Kouzmouk A., Tatur G. et al.* // Proc. VI Intern. Conf. Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA VI). 20–25 Sept. 2005. Vienna, Austria. 2005. P. 76.
10. *Васильев Ю.П., Резеништейн П.С., Шкловский Е.Н.* // Квантовая электроника. 1985. Т. 2. № 10. С. 2153.