

Режимы генерации импульсного Nd-YAG-лазера с поперечной полупроводниковой накачкой и многопетлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором

© В.Ф. Лебедев,^{1,2} А.П. Погода,^{1,2} С.Н. Сметанин,³ А.С. Борейшо,^{1,2} А.В. Федин³

¹ Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, 190005 Санкт-Петербург, Россия

² ООО «НПП „Лазерные системы“», 190005, Санкт-Петербург, Россия

³ Ковровская государственная технологическая академия, 601910 Ковров, Владимирская область, Россия
e-mail: lebedev@lsystems.ru

(Поступило в Редакцию 22 ноября 2013 г. В окончательной редакции 9 апреля 2014 г.)

Проведены исследования режимов генерации импульсного Nd-YAG-лазера с поперечной полупроводниковой накачкой и многопетлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором на решетках коэффициента усиления. В режиме свободной генерации с энергией в импульсе до 1 J при параметре качества пучка M^2 не выше 1.5 дифференциальный КПД лазера составил 27%. В режиме пассивной модуляции добротности при сохранении качества пучка энергия в импульсе генерации составила не менее 60% от режима свободной генерации. Продемонстрирована возможность генерации узкополосного лазерного излучения. Обнаружено, что в режиме свободной генерации, в условиях самомодуляции добротности на решетках коэффициента усиления, первичному одночастотному мощному лазерному импульсу соответствует ширина полосы генерации не более 1.2 GHz. При введении в оптическую схему ОВФ-резонатора дополнительных элементов, кристаллов $F_2 : LiF$ или $Cr^{4+} : YAG$ аналогичная узкополосная одномодовая генерация наблюдалась уже в режиме пассивной модуляции добротности как в виде цуга импульсов, так и в виде моноимпульса. Мощность излучения в импульсе генерации длительностью 20 ns достигала 2 MW.

В настоящее время благодаря развитию технологии мульткиловаттной диодной лазерной накачки вновь проявляется интерес к лазерам с четырехволновой дифракционной связью, в которых твердотельная лазерная среда является не только усилителем лазерного излучения, но и элементом оптической связи при обращении волнового фронта в результате четырехволнового взаимодействия [1–16]. В основе четырехволнового взаимодействия лежит принцип записи и считывания динамических голограмм (в настоящей работе это решетки коэффициента усиления), которые записываются и стираются в процессе развития лазерной генерации, выполняя таким образом функцию динамического ОВФ-зеркала. Использование описанных выше принципов позволяет разрабатывать адаптивные лазерные системы на самонакачивающихся ОВФ-зеркалах [1–8], осуществляющих самокомпенсацию искажений генерируемого лазерного излучения, а также обеспечивать когерентное сложение излучения наборов таких лазеров [10–12]. Подобные лазеры или лазерные системы отличает как высокие энергетические и пространственные характеристики, так и достаточно узкая ширина полосы генерации, что позволяет рассматривать их в качестве перспективных источников для технологических применений, лидаров, в том числе космического базирования, дистанционного мониторинга атмосферы или объектов различного агрегатного состояния методом лазерно-искровой спектроскопии.

Осуществление четырехволновой дифракционной связи непосредственно в лазерной среде требует нали-

чия достаточно высокого уровня коэффициента усиления [17], что, в частности, может быть реализовано применением высокоинтенсивной узкополосной диодной накачки.

В работе [5] для накачки лазерного кристалла Nd-YAG длиной 5 mm в схеме лазера с самонакачивающимся ОВФ-резонатором впервые использовалась продольная накачка киловаттной матрицей лазерных диодов. Однако интенсивность накачки уменьшалась при заглублении в активный элемент (АЭ) из-за поглощения и расходимости излучения накачки. Усиление слабого сигнала за два прохода АЭ не превышало 20, поэтому в схеме лазера с петлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором было использовано три таких АЭ.

В работах [6–8] для Nd-YVO₄ и Nd-YAG лазеров с петлевыми самонакачивающимися ОВФ-резонаторами использовалась поперечная накачка типа „bounce geometry“ [9] диодной линейкой мощностью от 30 W для Nd-YVO₄ [6,8] до 300 W для Nd-YAG [7]. Излучение диодной линейки фокусировалось цилиндрической линзой в узкую линию (0.1 × 15 mm) вдоль длины кристалла Nd-YVO₄. Это обеспечивало сверхвысокое усиление слабого сигнала за проход АЭ (более 10⁴ для лазерного кристалла Nd-YVO₄ [6]), поэтому в схеме лазера использовался только один АЭ.

В работе [13] нами впервые использована поперечная накачка длинного (110 mm) лазерного Nd-YAG-кристалла мульткиловаттными диодными матрицами в лазере с самонакачивающимся ОВФ-резонатором. Впоследствии

в ряде работ [14,15] для таких лазеров также была использована поперечная накачка диодными матрицами с суммарной пиковой мощностью до 9.5 kW на АЭ [14]. Излучение накачки распределялось по всей длине АЭ, что обеспечивало высокий уровень лазерного усиления и позволило использовать только два [14] или даже один [15] лазерный кристалл в схеме ОВФ-лазера. При этом выходная энергия лазерного излучения составляла 0.1 J [14] и 0.25 J [15].

В настоящей работе экспериментально исследованы режимы генерации импульсного Nd-YAG-лазера с поперечной накачкой мощными матрицами лазерных диодов и многопетлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором на решетках коэффициента усиления. Одномодовое излучение с параметром качества пучка M^2 не более 1.5 реализовано как в режимах свободной генерации, так и пассивной модуляции добротности при дополнительном введении в оптическую схему резонатора кристаллов $F_2^-:LiF$ или $Cr^{4+}:YAG$. Обнаружены и исследованы условия узкополосной лазерной генерации, которые наблюдаются при генерации первого мощного пика в режиме свободной генерации и в режимах с пассивной модуляцией добротности.

Для исследований лазерной генерации при мультикиловаттной диодной накачке нами был разработан и создан квантрон с лазерным кристаллом Nd-YAG (0.6 at.% Nd^{3+}) размером $\varnothing 0.63 \times 110$ mm [13]. Поперечная импульсно-периодическая накачка АЭ осуществлялась шестью лазерными диодными матрицами типа СЛМ-3-2 (НПП „Инжект“, Саратов) с размером излучающей площадки 5×25 mm и пиковой мощностью излучения до 2.1 kW каждая. Три пары диодных матриц располагались вдоль активного элемента, причем матрицы каждой пары располагались с противоположных сторон АЭ и излучали навстречу друг другу. Как показали расчеты, при такой геометрии накачки обеспечивается снижение до значений меньше минимально необходимой пространственной неоднородности коэффициента усиления по поперечному сечению АЭ с концентрацией ионов неодима до 0.6 at.% для реализации генерации при четырехволновом смещении [16].

Оптическая схема многопетлевого лазера с одним АЭ представлена на рис. 1. Ранее [13,17] экспериментально исследовалось несколько ее вариантов, но в приведенной схеме лазера (рис. 1) эффективность генерации была наибольшей, а число используемых оптических элементов наименьшим. Также была оптимизирована характеристическая длина X (рис. 1), оптимальное значение которой составило $X = 0.55$ m при частоте повторения импульсов накачки 10 Hz, а при ее увеличении до 25 Hz оптимальная характеристическая длина резонатора незначительно уменьшалась до $X = 0.5$ m [17].

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости энергии выходного лазерного излучения и оптического КПД генерации от энергии и пиковой мощности импульсов накачки при их длительности 300 μ s и частоте повторения 10 Hz.

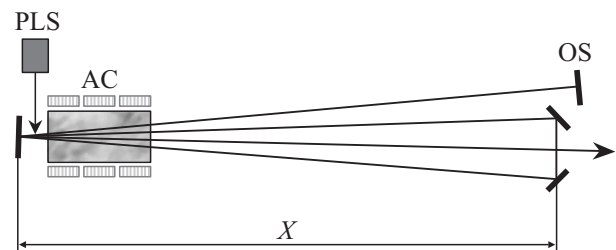


Рис. 1. Оптическая схема многопетлевого лазера с одним АЭ.

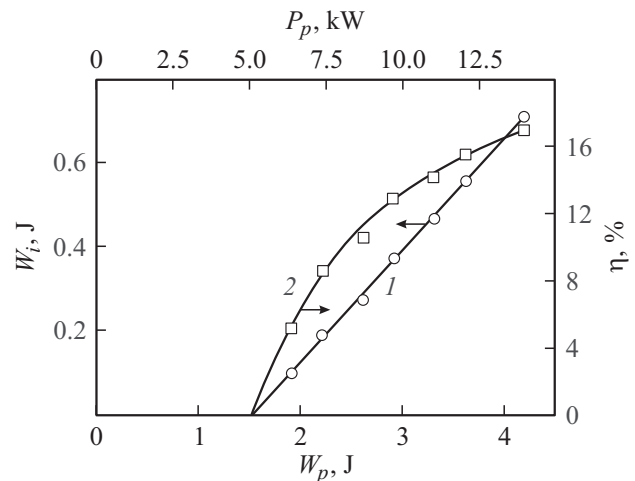


Рис. 2. Экспериментальные зависимости энергии W_i (1) выходного лазерного излучения и оптического КПД генерации η (2) от энергии W_p и пиковой мощности P_p импульсов излучения накачки при длительности импульсов накачки $t_p = 300 \mu$ s ($W_p = P_p t_p$) и частоте их повторения 10 Hz.

Из рис. 2 видно, что выходная энергия лазера растет линейно и при максимальной энергии накачки 4.14 J (соответствует пиковой мощности 13.8 kW, т. е. по 2.3 kW с каждой из шести диодных матриц) достигает 0.71 J, что соответствует величине оптического КПД генерации 17.2%. Дифференциальный КПД генерации лазера составляет 27%.

Увеличение длительности импульсов накачки при фиксированной мощности накачки приводило к увеличению выходной энергии лазера. Так, при максимальной мощности накачки 13.8 kW увеличение длительности импульса накачки до 475 μ s (технический предел) мы получили энергию выходного лазерного излучения 1.1 J при оптическом КПД генерации 16.8%. В проведенных экспериментах наблюдался линейный рост энергии лазерного излучения при увеличении длительности импульса накачки, поэтому очевидно, что существует возможность существенного увеличения эффективности лазерной генерации за счет увеличения мощности накачки, например, путем увеличения числа диодных матриц. Снизить порог и повысить эффективность генерации может помочь также и фокусировка излучения накачки в АЭ (увеличение плотности мощности накачки). Например, в работе [15] для фокусировки излучения аналогичных мультикиловаттных диодных матриц использовалась ци-

линдрическая линза с фокусным расстоянием 15 mm, что позволило уменьшить пятно накачки до размера 2.5 mm в поперечном к оси АЭ направлении и реализовать лазерную генерацию в схеме резонатора с четырехволновым взаимодействием при использовании всего лишь двух диодных матриц на один АЭ (кристалл Nd-YAG).

При увеличении частоты повторения импульсов накачки до 25 Hz значения энергии выходного излучения почти не изменялись, поэтому при максимальной энергии импульса накачки 4.14 J средняя мощность лазерного излучения достигала 17 W. Качество пучка при этом также заметно не ухудшалось.

Необходимо отметить, что в проведенных экспериментах на развитие генерации могла оказывать влияние „паразитная“ генерация вспомогательного линейного резонатора, возникавшего между торцом активного элемента и одним из зеркал оптической схемы [18]. На возможную роль дополнительного линейного резонатора при самостарте генерации в петлевом резонаторе указывалось и ранее, но количественных оценок его влияния на характеристики лазера произведено не было [19,20]. Ранее [18] были проведены оценки уровня „паразитной“ генерации для нескольких активных элементов, в том числе и цилиндрического АЭ, использовавшегося в настоящей работе, в составе разработанного квантрона. Наблюдавшаяся существенно более значительная (в несколько раз) „паразитная“ генерация в лазере с резонатором Фабри–Перо для исследовавшихся АЭ, однако, не сказалась заметным образом на величине энергии импульса генерации [18].

На рис. 3 представлены осциллограмма (рис. 3, *a*), профиль пучка (рис. 3, *b*) и интерферограмма (рис. 3, *c*) выходного лазерного излучения при энергии импульсов накачки

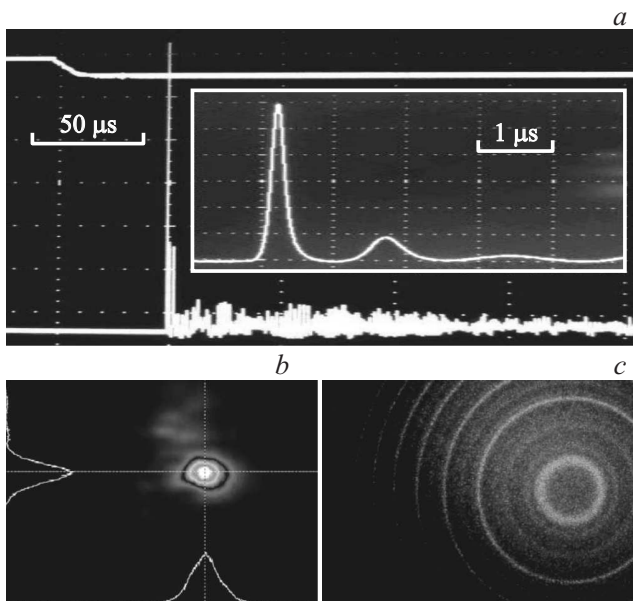


Рис. 3. Осциллограмма (*a*), профиль пучка (*b*) и Фабри–Перо-интерферограмма (*c*) выходного лазерного излучения при энергии импульсов накачки 3.6 J и частоте их повторения 10 Hz.

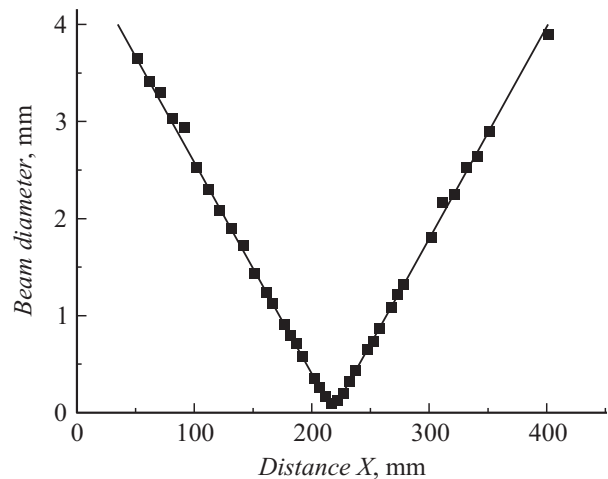


Рис. 4. Зависимость диаметра пучка за фокусирующей линзой от расстояния.

накачки 3.6 J и частоте их повторения 10 Hz. Осциллограмма получена с помощью двухлучевого осциллографа LeCroy WaveJet 352A (500 MHz), где первый (верхний) канал регистрировал форму импульса накачки, а второй (нижний) канал — импульс лазерного излучения. Профиль выходного лазерного пучка регистрировался с помощью камеры BeamGage (Ophir-Spiricon). Интерферограмма получена с помощью эталона Фабри–Перо с интервалом свободной дисперсии $\Delta\lambda = 0.028$ nm.

Из рис. 3, *a* видно, что в начале каждого импульса генерации наблюдается высокоинтенсивный лазерный пик длительностью 200 ns, за которым следует ряд слабых хаотических пучков. Причем при высокой величине энергии накачки (3.6 J) сохраняется высокое пространственное качество пучка, близкое к дифракционному (рис. 3, *b*). Наблюдающийся на рисунке ореол вокруг основного лазерного пятна принадлежит упоминавшейся выше паразитной генерации. Измеренное методом ножа в двух ортогональных направлениях значение параметра качества пучка находилось в диапазоне $M^2 = 1.4–1.5$. Характерная зависимость диаметра лазерного пучка от расстояния для одного из направлений представлена на рис. 4.

Анализируя интерферограмму, приведенную на рис. 3, *c*, можно сделать следующие выводы. Узкие яркие кольца порождаются первым мощным одночастотным пиком в импульсе генерации (вставка на рис. 3, *a*), так как при сокращении длительности импульса накачки до значения, при котором на генерацию успевает выйти только первый пик, остальные кольца не наблюдаются. Следовательно, широкие неяркие кольца на интерферограмме соответствуют многочисленным пучкам свободной генерации, следующим за первоначальным пиком высокой интенсивности. Большая ширина неярких колец указывает на генерацию многих продольных мод в отличие от одной продольной моды в первоначальном лазерном пике импульса. Таким образом, можно сделать вывод, что начальный мощный одночастотный пик в

импульсе лазерной генерации формируется в условиях режима самомодуляции добротности петлевого резонатора при записи и стирании решеток усиления. В последующих пучках импульса на генерацию выходят многие продольные моды, что нарушает режим самомодуляции добротности и переводит его в режим свободной генерации. Подобная картина генерации наблюдалась в петлевом лазере с маломощной диодной накачкой в работе [7].

С целью создания условий для перевода петлевого резонатора в режим модуляции добротности использовались пассивные лазерные затворы (ПЛЗ) на основе кристаллов LiF:F_2^- и YAG:Cr^{4+} (рис. 1), которые дополнительно вводились в его оптическую схему.

При применении в качестве ПЛЗ кристалла LiF:F_2^- с высоким начальным пропусканием $T_0 = 68\%$ генерировался цуг из большого числа интенсивных лазерных импульсов с периодом повторения около $6\ \mu\text{s}$ (вставка рис. 5). Длительность импульсов составляла около $170\ \text{ns}$. Энергия в цуге импульсов генерации при сохранении качества пучка составляла не менее 60% от величины энергии в описанном выше режиме свободной генерации (рис. 5, длительность импульса накачки $300\ \mu\text{s}$).

Спектр излучения в этом режиме генерации характеризует интерферограмма в виде серии узких эквидистантных колец интерференции близкого радиуса (рис. 6, *a*). При изменении длительности импульса накачки количество импульсов в цуге варьирует. Поэтому сопоставление количества импульсов и колец интерферограммы, а также наблюдаемая узость колец позволяют заключить, что каждый отдельный мощный лазерный импульс генерации в цуге происходит на одной продольной моде. При этом частота генерации может меняться от импульса к импульсу в пределах полосы усиления.

Установка ПЛЗ на кристалле LiF:F_2^- с малым начальным пропусканием $T_0 = 30\%$ обеспечивала увеличение времени развития генерации, что приводило не только к увеличению интенсивности генерируемых мощных лазерных импульсов, но и к уменьшению их количества. В результате длительность отдельного гигантского импульса составляла $20\ \text{ns}$ при периоде их следования около $50\ \mu\text{s}$. В качестве ПЛЗ также использовались и кристаллы YAG:Cr^{4+} с начальным пропусканием в диапазоне $18\text{--}47\%$. При использовании затвора с оптимальным коэффициентом пропускания 38% длительность гигантского импульса составила $20\ \text{ns}$, а период следования импульсов — $30\text{--}40\ \mu\text{s}$.

Поскольку в проведенных экспериментах наиболее устойчивая узкополосная генерация исследуемого лазера с многопетлевым резонатором наблюдалась для отдельных импульсов, а не цугов импульсов, то представляло интерес исследование ширины полосы генерации в таком режиме пассивной модуляции добротности [21]. Моноимпульсный режим генерации обеспечивался выбором начального пропускания затвора, тока накачки матриц диодов и длительности импульса накачки.

Наилучшие результаты были получены с использованием затвора с начальным пропусканием 38% при длительности импульса около $100\ \mu\text{s}$. Энергия в импульсе в

этом режиме составила $40\ \text{mJ}$, при пиковой мощности излучения $2\ \text{MW}$. В этом случае на интерферограмме регистрировалась только одна система узких колец, что соответствовало одной продольной моде с шириной полосы не более $1.2\ \text{GHz}$ (рис. 6, *b*), более точное измерение которой было ограничено разрешающей способностью эталона Фабри–Перо.

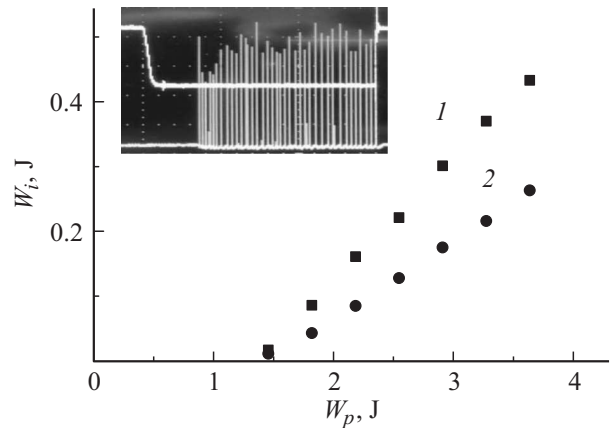


Рис. 5. Экспериментальные зависимости энергии W_i выходного лазерного излучения от энергии W_p импульсов излучения накачки при длительности импульсов накачки $t_p = 300\ \mu\text{s}$ и частоте их повторения $10\ \text{Hz}$. Длина резонатора $400\ \text{mm}$: 1 — свободная генерация, 2 — пассивная модуляция добротности с ПЛЗ на кристалле LiF:F_2^- , $T_0 = 67\%$.

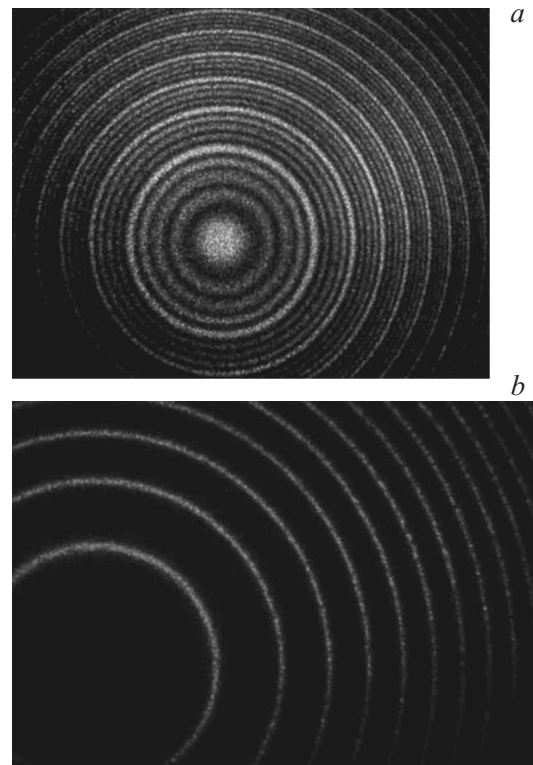


Рис. 6. Режим пассивной модуляции добротности: *a* — интерферограмма при ПЛЗ на кристалле LiF:F_2^- с $T_0 = 67\%$; *b* — интерферограмма при ПЛЗ на кристалле $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ с $T_0 = 38\%$.

Недостаточно высокое значение энергетических параметров отдельных импульсов модулированного излучения может быть обусловлено короткой длительностью импульса накачки, а значит, и его энергии. Кроме того, при таких низких энергиях накачки ухудшалась термостабилизация матриц накачки до температур, обеспечивающих наилучшее согласование спектра их излучения со спектром поглощения активного элемента. Вероятно, что именно по этим причинам оптический КПД лазера в режиме генерации моноимпульса в нашем случае оказался ниже данных работы [14] (5.1 и 8.5%, соответственно), в которой исследовалась похожая, но отличающаяся по ряду важных параметров лазерная установка. В схеме резонатора лазера присутствовали дополнительный усилитель также на кристалле Nd-YAG и невзаимный элемент (вентиль Фарадея), длительность импульса накачки была в полтора раза больше, чем в наших экспериментах, а качество лазерного пучка ниже ($M^2 = 1.7$) [14].

Таким образом, продемонстрирована высокая эффективность голографического Nd-YAG-лазера с поперечной полупроводниковой накачкой и многопетлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором при работе как в режимах свободной генерации, так и в режимах с пассивной модуляцией добротности. В режиме свободной генерации энергия в импульсе достигала 1.1 J и составляла не менее 60% от этой величины в режиме пассивной модуляции при параметре качества пучка M^2 в обоих случаях не превышающем 1.5. Узкополосная лазерная генерация с шириной полосы не выше 1.2 GHz наблюдается для интенсивного первого пика в импульсе при работе лазера в режиме свободной генерации (в условиях самомодуляции добротности резонатора на решетках усиления), а также в моноимпульсном режиме генерации при пассивной модуляции добротности резонатора, реализуемой введением в оптическую схему дополнительного пассивного затвора.

Полученные в результате проведенных исследований энергетические, пространственные и спектральные свойства Nd-YAG лазера с мощной импульсной полупроводниковой накачкой и компактным многопетлевым резонатором позволяют рассматривать его в качестве источника излучения в лазерных системах, имеющих ряд важных практических применений. В частности, для применений в технологических процессах обработки материалов могут быть разработаны эффективные компактные лазерные системы для замены уже апробированных систем с ламповой накачкой и петлевым ОВФ-резонатором, включая и системы с когерентным сложением наборов подобных лазерных усилителей [22,23]. Узкополосная генерация в режиме моноимпульсов имеет практический интерес для лидарных применений. Лазерная генерация в режимах моноимпульса или цуга импульсов с энергией от десятков до сотен миллджоулей, с качеством излучения близким к дифракционному пределу представляет интерес в мобильных установках мониторинга окружающей среды с использованием метода лазерной искровой спектроскопии.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке проектной частью государственного задания № 9.1354.2014/К Минобрнауки России.

Список литературы

- [1] Бельдюгин И.М., Беренберг В.А., Васильев А.Е., Мочалов И.В., Петникова В.М., Петровский Г.Т., Харченко М.А., Шувалов В.В. // Квант. электрон. 1989. Т. 16. Вып. 6. С. 1142–1145.
- [2] Damzen M.J., Green R.P.M., Syed K.S. // Opt. Lett. 1995. Vol. 20. N 16. P. 1704–1706.
- [3] Antipov O.L., Belyaev S.I., Kuzhelev A.S. // Opt. Commun. 1995. Vol. 117, N. 3–4. P. 290–294.
- [4] Fedin A.V., Gavrilov A.V., Basiev T.T., Antipov O.L., Kuzhelev A.S., Smetanin S.N. // Laser Phys. 1999. Vol. 9. N 2. P. 433–436.
- [5] Sillard P., Brignon A., Huignard J.-P., Pocholle J.-P. // Opt. Lett. 1998. Vol. 23. N. 14. P. 1093–1095.
- [6] Thompson B.A., Minassian A., Damzen M.J. // J. Opt. Soc. Am. B. 2003. Vol. 20. N 5. P. 857–862.
- [7] Antipov O.L., Eremeykin O.N., Ievlev A.V., Savikin A.P. // Opt. Express. 2004. Vol. 12. N. 18. P. 4313–4319.
- [8] Smith G., Damzen M.J. // Opt. Express. 2007. Vol. 15. N 10. P. 6458–6463.
- [9] Bernard J.E., Alcock A.J. // Opt. Lett. 1993. Vol. 18. N 12. P. 968–970.
- [10] Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. // Квант. электрон. 2003. Т. 33. Вып. 8. С. 659–670.
- [11] Basiev T.T., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Smetanin S.N. // Laser Phys. 2006. Vol. 16. N 12. P. 1610–1615.
- [12] Shardlow P.C., Damzen M.J. // Opt. Lett. 2010. Vol. 35. N 7. P. 1082–1084.
- [13] Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Еришков М.Н., Сметанин С.Н., Федин А.В., Бельков К.А., Борейшо А.С., Лебедев В.Ф. // Квант. электрон. 2011. Т. 41. Вып. 3. С. 207–211.
- [14] Souillard R., Brignon A., Raby S., Durand E., Moncorge R. // Appl. Phys. B. 2012. Vol. 106. N 2. P. 295–300.
- [15] Zendzian W., Jabczynski J.K., Kaskow M., Gorajek L., Kwiatkowski J., Kopczynski K. // Opt. Lett. 2012. Vol. 37. N 13. P. 2598–2600.
- [16] Федин А.В., Гаврилов А.В., Еришков М.Н., Сметанин С.Н., Солохин С.А. // Изв. РАН. 2012. Т. 76. Вып. 6. С. 717–722.
- [17] Pogoda A.P., Lebedeva T.B., Yusupov M.R., Liventsov R.A., Lebedev V.F., Boreysko A.S., Gavrilov A.V., Smetanin S.N., Fedin A.V. // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8677. P. 86770Z.
- [18] Ливенцов Р.А., Лебедев В.Ф., Мясников А.А., Бельков К.А. // Сб. докл. 21-й Международной конференции „Лазеры. Измерения. Информация 2011“. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 196–209.
- [19] Antipov O.L., Chausov D.V., Kuzhelev A.S., Vorob'ev V.A., Zinov'ev A.P. // IEEE J. Quant. Electron. 2001. Vol. 37. N 5. P. 716–724.
- [20] Lam S.Y., Damzen M.J. // Appl. Phys. B. 2003. Vol. 76. N 3. P. 237–240.
- [21] Погода А.П., Ермолаев А.А., Лебедев В.Ф., Сметанин С.Н., Борейшо А.С. // НТВ СПбГПУ. 2013. Т. 170. Вып. 2. С. 121–129.
- [22] Басиев Т.Т., Гарнов С.В., Климентов С.М., Пивоваров П.А., Гаврилов А.В., Сметанин С.Н., Солохин С.А., Федин А.В. // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. Вып. 10. С. 956–960.
- [23] Fedin A.V., Gavrilov A.V., Smetanin S.N., Solokhin S.A. // Proc. SPIE 6606, 660609 (2007).