

Одномодовый ИАГ:Nd-лазер с самонакачивающимся фазово-сопряженным петлевым резонатором

Т.Т.Басиев **, А.В.Федин *, А.В.Гаврилов *, С.Н.Сметанин *, С.А.Кялбиева *

Предложена схема импульсно-периодического ИАГ:Nd-лазера с самонакачивающимся фазово-сопряженным петлевым резонатором, где в качестве концевого отражателя использован интерферометр Саньяка, а параметрическая обратная связь осуществлена динамическими голографическими решетками в активных элементах и пассивном лазерном затворе LiF:F_2^- . Показано, что дополнительный усилитель и установленная в интерферометр полуволновая пластинка могут существенно увеличивать КПД лазера. Для средней мощности излучения 120 Вт и пиковой мощности отдельного импульса 6.9 МВт экспериментально реализованный КПД лазера составил 2 % при расходимости излучения 0.5 мрад и пространственной яркости 10^{14} Вт/(см²·ср).

Ключевые слова: петлевой резонатор, динамические голографические решетки, обращение волнового фронта, модуляция добротности.

Введение

Качество излучения технологических твердотельных лазеров обычно ограничено значительными термооптическими искажениями, возникающими в активных элементах при мощной ламповой накачке. Для уменьшения температурных искажений амплитудного и фазового профилей пучка излучения и получения одномодовой генерации был применен стационарный неустойчивый лазерный резонатор телескопического типа с пассивной модуляцией добротности кристаллом LiF:F_2^- [1, 2]. Это позволило реализовать импульсно-периодический режим одномодового излучения с пиковой мощностью до 100 кВт и пространственной яркостью $2 \cdot 10^9$ Вт/(см²·ср) при расходимости 2 мрад и длине когерентности 10 см.

В [3, 4] уменьшение оптического искажения фазы волнового фронта было достигнуто при использовании связанного лазерного резонатора специальной геометрии с пассивным лазерным затвором и двумя активными элементами (АЭ) ИАГ:Nd, помещенными в различные плечи резонатора. Затравочный импульс формировался в первом плече, где был установлен пассивный лазерный затвор (ПЛЗ), а затем усиливался в АЭ, находящемся во втором плече. Это позволило увеличить пиковую мощность одномодового излучения до 500 кВт и пространственную яркость до $3 \cdot 10^{10}$ Вт/(см²·ср) при увеличении длины когерентности до 17 см и уменьшении расходимости до 0.8 мрад. Однако компенсация aberrаций волнового фронта была неидеальной, что значительно ограничи-

вало энергетические и пространственные характеристики лазерного излучения.

В настоящей работе мы предлагаем лазерную систему, в которой в процессе развития генерации происходит включение дифракционно-связанного динамического петлевого резонатора с пассивной модуляцией добротности фототропным кристаллом LiF:F_2^- и самоОВФ в активной (усиливающей) среде [5] и в ПЛЗ [6].

1. Одномодовый ИАГ:Nd-лазер с самообращением волнового фронта

Оптическая схема лазера представлена на рис.1. Лазер состоит из двух АЭ 1 и 2 размером $\varnothing 6.3 \times 100$ мм, пассивного лазерного затвора 3, четырех поворотных зеркал 4 и концевого отражателя на базе интерферометра Саньяка, образованного светоделительным (6) и поворотными (5) зеркалами. Генерация начинается с шумового излучения в АЭ 1 и 2, отраженного от концевого отражателя, обеспечивающего пространственно-угловую селекцию затравочного импульса. По мере развития генерации в АЭ внутрирезонаторными пересекающимися пучками записываются динамические голографические

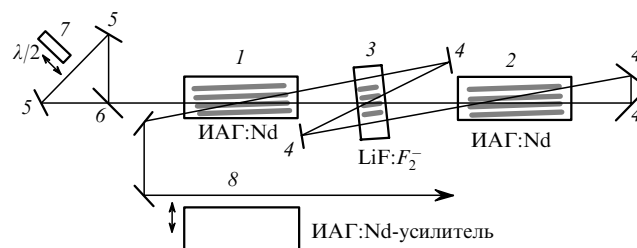


Рис.1. Оптическая схема ИАГ:Nd лазера с самообращением волнового фронта:
1, 2 – АЭ; 3 – кристалл LiF:F_2^- ; 4, 5 – поворотные зеркала; 6 – светоделительное зеркало; 7 – полуволновая пластинка; 8 – усилительный АЭ.

*Ковровская государственная технологическая академия, Россия, 601910 Ковров Владимирской обл., ул. Маяковского, 19; тел.: (09232) 3 28 79, факс: (09232) 3 25 33, эл. почта: kasapr@kc.ru

**Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики РАН, Россия, 117942 Москва, ул. Вавилова, 38; тел.: +7 (095) 135 02 67, факс: 135 02 67, эл. почта: basiev@lst.gpi.ru, basiev@lss.mail.gpi.ru

решетки, образующие самоподстраивающийся адаптивный резонатор лазера. На образовавшихся решетках происходит перераспределение поля излучения и обращение его волнового фронта, что обеспечивает улучшение пространственных и энергетических характеристик излучения.

В режиме свободной генерации при энергии импульсов накачки $W_p = 63.5$ Дж, подводимой к лампе-вспышке каждого квантрона, длительности импульсов 200 мкс и частоте их следования 30 Гц энергия импульсов генерации достигала 1.62 Дж, что соответствует средней мощности одномодового излучения 49 Вт. Расходимость излучения Θ по уровню e^{-2} составила 0.42 мрад, а длина когерентности превышала 10 м, что соответствует ширине спектра менее 0.11 пм.

Для реализации одночастотного режима генерации, увеличения дифракционной эффективности динамических решеток в кристаллах ИАГ:Nd и пассивной модуляции добротности лазера использовался кристалл LiF:F_2^- с начальным пропусканием 58 %. Это позволило получить режим модуляции добротности в виде цугов, состоящих из эквидистантных импульсов. Длительность импульсов излучения, определяемая начальным пропусканием ПЛЗ, составила 50 нс и в пределах погрешности измерения не зависела от энергии импульсов накачки. При этом все импульсы модулированного излучения, которые регистрировались с помощью лавинного фотодиода ЛФД-2А и осциллографа С1-75, имели гладкий временной профиль, что свидетельствует об одномодовом и близком к одночастотному характере излучения [6, 7].

На рис.2 приведены энергетические и временные параметры излучения ИАГ:Nd-лазера без ПЛЗ (кривая 1) и с ПЛЗ (кривые 2–6) в зависимости от энергии импульсов накачки на один квантрон при частоте их следования 30 Гц. Как следует из представленных зависимостей, при увеличении энергии импульсов накачки снижается период следования импульсов в цуге и возрастает не только их число, но и энергия отдельного импульса, а также его мощность. Максимальная энергия импульсов накачки на каждый квантрон $W_p^{\text{max}} = 63.5$ Дж, а энергия отдельного импульса генерации $W_i = 200$ мДж при мощности 4 МВт. Увеличение энергии отдельных импульсов и числа их в цуге согласуется с увеличением полной энергии цуга импульсов (рис.2, кривая 2), которая во всем диапазоне изменения энергии накачки превышает энергию импульса свободной генерации (рис.2, кривая 1).

При $W_p^{\text{max}} = 63.5$ Дж энергия цуга импульсов превысила 1.8 Дж, а средняя мощность излучения составила 55 Вт, т.е. при использовании ПЛЗ эффективность генерации возросла на 12 %. Это обусловлено тем, что в момент просветления ПЛЗ и генерации гигантского импульса в кристалле LiF:F_2^- возбуждается дополнительное ОВФ-зеркало, повышающее общую эффективность режима самообращения волнового фронта, происходит сужение спектра генерации и рост пиковой мощности лазерных импульсов. Все это позволяет улучшить самокомпенсацию оптических aberrаций волнового фронта в АЭ, уменьшить дифракционные потери и увеличить КПД генерации.

При предельной энергии накачки $W_p^{\text{max}} = 63.5$ Дж расходимость $\Theta = 0.34$ мрад, что соответствует параметру качества излучения $M^2 = 1.16$, близкому к таковому для одномодового излучения. Длина когерентности лазерного излучения, определенная с помощью интерферо-

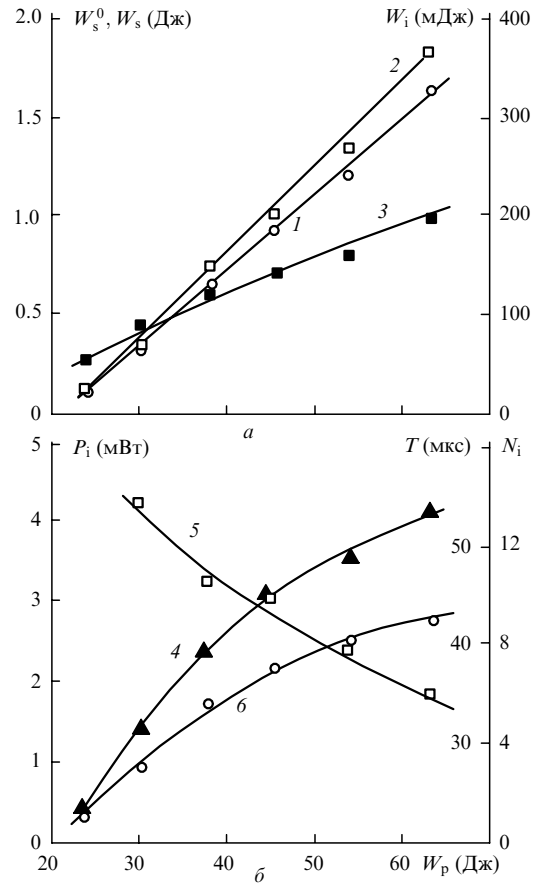


Рис.2. Зависимости энергетических и временных параметров излучения ИАГ:Nd-лазера от энергии импульсов накачки на каждый квантрон W_p при частоте их следования 30 Гц:

1 – энергия импульса свободной генерации W_s^0 ; 2 – энергия цуга импульсов W_s ; 3 – энергия отдельного импульса W_i ; 4 – пиковая мощность P_i ; 5 – период следования импульсов в цуге T ; 6 – число импульсов в цуге N_i .

метра Майкельсона, составила более 15 м (ширина спектра генерации 0.07 пм), а пространственная яркость достигла $8.8 \cdot 10^{13}$ Вт/(см²·ср).

2. Оптимизация режимов генерации

Исследование поляризации лазерного излучения показало, что оно является s-поляризованным со степенью поляризации более 90 %. Это позволило управлять ориентацией вектора напряженности излучения, для чего использовали фазовую пластинку 7 (рис.1), которую устанавливали в интерферометр Саньяка.

На рис.3 (кривая 1) представлена зависимость энергии цуга импульсов излучения от угла поворота фазовой пластинки $\lambda/2$ при $W_p = 63.5$ Дж. Штриховой линией показаны энергии излучения в отсутствие фазовой пластинки. Приведенная зависимость показывает, что установка пластинки $\lambda/2$ под углом 45° позволяет увеличить энергию выходного излучения W_s на 20 % и довести ее до 2.18 Дж в цуге. При этом число импульсов в цуге не менялось, а энергия отдельного импульса и его мощность выросли до 240 мДж и 4.8 МВт. Заметим, что характер зависимости выходных характеристик от угла поворота пластинки остается постоянным при изменении энергии накачки как при использовании ПЛЗ, так и без него.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Во-первых, применение фазовой пластин-

ки обеспечивает поляризационную развязку между встречными волнами, взаимодействующими в АЭ и ПЛЗ, что практически исключает образование стоячих волн в петлевой схеме динамического резонатора, приводящих к пространственному выгоранию инверсии.

Во-вторых, поляризационная развязка встречных волн при четырехволновом смешении исключает распад (самовоздействие) опорных волн [8] и обуславливает в зависимости от угла между взаимодействующими пучками запись преимущественно пропускающих (в АЭ), или отражательных (в кристалле LiF:F_2^-) решеток [9]. В результате этого перераспределяются вклады различных голографических решеток в формирование поля внутри резонатора, и преобладающими становятся решетки, обеспечивающие в целом большую положительную обратную связь, например пропускающие решетки в АЭ 1 (рис.1).

При этом в процессе взаимодействия волн практически полностью устраняются межмодовые биения, что увеличивает контрастность записываемых решеток и мощность одночастотного лазерного излучения. Визуально об этом можно судить по гладкой форме импульсов излучения.

Следует отметить, что при смещении кристалла LiF:F_2^- из среднего положения (рис.1) вдоль оптической оси ближе к одному из АЭ на расстояние 1.5–2 см длина взаимодействия пучков излучения в среде ПЛЗ становилась малой. Если полуволновая пластинка отсутствовала, энергия пуга импульсов W_s уменьшалась от 1.8 до 0.85 Дж (штриховая линия 4, рис.3). При установке фазовой пластинки под углом 45° в интерферометре Саньяка энергия излучения W_s почти восстанавливалась и достигала 1.7 Дж (кривая 3, рис.3). В последнем случае число импульсов уменьшалось от 13 до 10, а их энергия W_i и пиковая мощность P_i увеличивались от 65 мДж и 1.3 МВт до 170 мДж и 3.4 МВт соответственно.

Полученные результаты показывают, что в отсутствие полуволновой пластинки уменьшение длины взаимодействия пучков в кристалле LiF:F_2^- снижает положительную обратную связь в ОВФ-резонаторе и приводит к уменьшению энергетических параметров излучения. Увеличение последних при поляризационной развязке объясняется увеличением положительной обратной связи на пропускающих решетках в АЭ, что подтверждает правильность приведенных выше рассуждений.

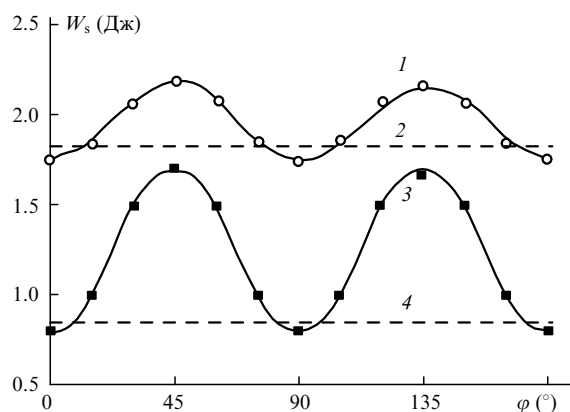


Рис.3. Зависимости энергии пуга импульсов W_s от угла поворота ϕ пластинки $\lambda/2$ при суммарной энергии импульсов накачки 127 Дж: 1 – ПЛЗ установлен в пересечении пучков; 2 – то же, но без пластинки $\lambda/2$; 3 – ПЛЗ смещен из перекрестья; 4 – то же, но без пластинки $\lambda/2$.

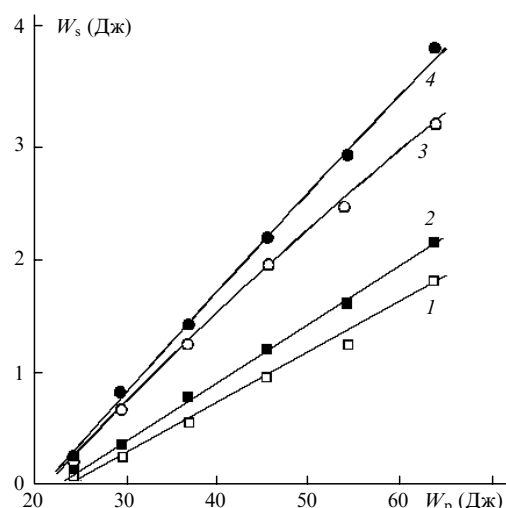


Рис.4. Зависимости энергии пуга импульсов W_s от энергии импульса накачки на каждый квантрон W_p в схемах без усилителя и полуволновой пластинки (1), без усилителя с полуволновой пластинкой (2), с усилителем без полуволновой пластинки (3) и с усилителем и полуволновой пластинкой (4).

Для повышения энергетических параметров лазерной системы число АЭ в схеме увеличили до трех. При этом дополнительный АЭ размером $\varnothing 6.3 \times 100$ мм использовали как в петлевой схеме лазера, так и для усиления выходного излучения. Наиболее высокие энергетические параметры были получены в случае применения дополнительного АЭ 8 (рис.1) в качестве однопроходного усилителя. Зависимость энергии пуга импульсов от энергии накачки на каждый квантрон при использовании полуволновой пластинки и без нее приведены на рис.4. Видно, что применение усилителя при установленной пластинке $\lambda/2$ в интерферометре Саньяка позволяет увеличить W_s от 2.18 до 3.79 Дж, т. е. в 1.7 раза. Длительность импульса излучения в пределах погрешности измерений осталась неизменной, но заметно увеличилось их число и частота следования в пуге. При $W_p^{\max} = 63.5$ Дж пуг состоял из 11 импульсов, которые следовали с частотой 77 кГц. При этом энергия отдельного импульса составляла 345 мДж, а пиковая мощность – 6.9 МВт. Увеличение числа импульсов в пуге можно объяснить тем, что развитие генерации, по-видимому, начинается с участием шумового излучения усилителя. Инжекция предварительно усиленного излучения в петлевой резонатор позволяет снизить порог формирования динамического генератора, что приводит к уменьшению времени достижения пороговой инверсии населенности и обуславливает возрастание числа импульсов в пуге.

Расходимость излучения увеличивалась незначительно и не превышала двух дифракционных пределов. При этом параметр качества излучения $M^2 \leq 1.33$. Длина когерентности осталась неизменной (более 15 м), а пространственная яркость почти не изменилась ($8.6 \cdot 10^{13}$ Вт/(см²·ср)).

Отметим, что в петлевой схеме с интерферометром Саньяка при более высоких энергетических ($W_s = 3.79$ Дж, $W_i = 345$ мДж) и пространственных ($\theta = 0.5$ мрад) параметрах излучения была достигнута высокая эффективность преобразования электрической энергии накачки в энергию лазерного излучения – до 2%. Это превышает эффективность генерации ранее исследованной нами линейной схемы с неустойчивым связанным резона-

тором телескопического типа с тремя АЭ и интерферометром Саньяка [10], которая составляла 1.8 % ($W_s = 3.4$ Дж, $W_i = 60$ мДж, $\theta = 1.1$ мрад).

Заключение

Таким образом, исследованная ИАГ:Nd-лазерная система с динамическим петлевым резонатором, пассивным затвором на кристалле LiF:F_2^- и самообращением волнового фронта позволила получить одночастотное излучение с высокой пространственной яркостью, достигающей 10^{14} Вт/(см²·ср), и расходимостью, близкой к дифракционной. Реализация таких параметров излучения стала возможной благодаря применению петлевой схемы резонатора, пассивного затвора на кристалле LiF:F_2^- и интерферометра Саньяка с полуволновой пластинкой, обеспечивающих пространственно-угловую селекцию и поляризационную развязку пучков, что позволило существенно повысить энергетическую и пространственно-поляризационную эффективность самообращения волнового фронта в лазере на ИАГ:Nd с ПЛЗ на кристалле LiF:F_2^- .

1. Басиев Т.Т., Кравец А.Н., Миров С.В., Федин А.В. *Патент РФ № 1799526* (1992).
2. Basiev T.T., Kravets A. N., Mirov S. B., Fedin A. V. *Proc.SPIE*, **1839**, 2 (1991).

3. Басиев Т.Т., Кравец А.Н., Федин А.В. *Патент РФ № 2038666* (1995).
4. Басиев Т.Т., Кравец А.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **20**, 594 (1993).
5. Бельдюгин И.М., Галушкин М.Г., Земсков Е.М. *Квантовая электроника*, **11**, 887 (1984).
6. Басиев Т.Т., Кравец А.Н., Миров С.Б., Федин А.В., Конюшкин В.А. *Квантовая электроника*, **18**, 223 (1991).
7. Грабовский В.В., Прохоренко В.И., Яцкив Д.Я. *Квантовая электроника*, **22**, 361 (1995).
8. Green R.P.M., Udaiyan D., Crofts G.J., Kim D.H., Damzen M.J. *Phys.Rev.Letts*, **77**, 3533 (1996).
9. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М., Наука, 1985).
10. Kravets A.N., Trifinov I.I., Gavrilov A.V., Shilov I.V., Ruljov A.V. *Proc.SPIE*, **3267**, 307 (1998).

T.T.Basiev, A.V.Fedin, A.V.Gavrilov, S.N.Smetanin, S.A.Kyalbieva.
Single-mode Nd:YAG laser with a self-pumping phase-conjugate loop resonator.

The configuration of a pulse-periodic Nd:YAG laser with a self-pumping phase-conjugate loop resonator is proposed. A Sagnac interferometer is used as the end reflector and the parametric feedback is accomplished by dynamic holographic gratings in the active elements and the passive F_2^- :LiF laser Q-switch. An additional amplifier and a half-wave plate placed in the interferometer were shown to have the capability to notably increase the laser efficiency. For an average output power of 120 W and a peak power of an individual pulse of 6.9 MW, the experimentally achieved laser efficiency amounted to 2% for a beam divergence of 0.5 mrad and a spatial brightness of 10^{14} W cm⁻² sr⁻¹.