

# Петлевые лазерные резонаторы на самонакачивающихся ОВФ-зеркалах в слабо усиливающих активных средах для сфазированных многоканальных лазерных систем

Т.Т.Басиев, А.В.Гаврилов, М.Н.Ершков, С.Н.Сметанин, А.В.Федин,  
К.А.Бельков, А.С.Борейшо, В.Ф.Лебедев

*Обоснована возможность генерации лазеров с различными петлевыми резонаторами на самонакачивающихся ОВФ-зеркалах в слабо усиливающих активных средах при инжекции внешнего лазерного излучения применительно к разработке сфазированных многоканальных неодимовых лазерных систем с диодной накачкой и генерацией не только на основном лазерном переходе с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм, но и на неосновном переходе с  $\lambda = 1.34$  мкм. Определены пороги ОВФ-генерации при инжекции внешнего сигнала для многопетлевой конфигурации резонатора и увеличенного числа активных элементов в петлевом резонаторе. Показано, что ОВФ-генерация может происходить даже при одностороннем усилении активного элемента, равном всего лишь  $\sim 2$ . При мощной поперечной диодной накачке получена одномодовая генерация в многопетлевом ИАГ: Nd-лазере на  $\lambda = 1.064$  мкм с энергией импульсов до 0.75 Дж при частоте их повторения до 25 Гц, со средней мощностью до 18.3 Вт и с КПД генерации до 20%. Реализована одномодовая генерация в петлевом ИАГ: Nd-лазере на  $\lambda = 1.34$  мкм с энергией импульсов до 0.96 Дж при частоте их повторения до 10 Гц и со средней мощностью до 8.5 Вт при использовании трех активных элементов внутри резонатора.*

**Ключевые слова:** многоканальная лазерная система, петлевой резонатор, самонакачивающееся ОВФ-зеркало, голографическая решетка усиления.

## 1. Введение

Многоканальные лазерные системы представляют большой интерес благодаря возможности увеличения энергетических характеристик лазерного излучения при суммировании выходных лазерных пучков. Когерентное сложение излучений отдельных оптически связанных лазерных генераторов позволяет не только увеличивать энергию и мощность генерации, но и существенно повышать интенсивность и улучшать направленность составного лазерного излучения. Для этого требуются одномодовый режим генерации и точная подстройка длин лазерных резонаторов для выравнивания резонансных частот [1]. В работах [2–5] для решения данных проблем мы использовали в качестве отдельных каналов многоканальной лазерной системы петлевые резонаторы с самонакачивающимися ОВФ-зеркалами в активных лазерных средах [6–12], что позволило реализовать фазовую синхронизацию и когерентное сложение всех каналов генерации. Отличительной особенностью таких лазерных резонаторов является зависимость добротности резонатора от коэффициента усиления активной среды, т. е. дифракционная эффективность ОВФ-зеркала, записан-

ного в активной среде, зависит от коэффициента усиления. Это сильно увеличивает порог генерации лазерной системы и ограничивает возможность применения слабо усиливающих лазерных активных сред.

В настоящей работе исследованы возможности использования слабо усиливающих активных лазерных элементов в различных схемах петлевых резонаторов применительно к разработке сфазированных многоканальных неодимовых лазерных систем с диодной накачкой и генерацией не только на основном лазерном переходе с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм, но и на неосновном переходе с  $\lambda = 1.34$  мкм.

## 2. Порог генерации для лазерного резонатора с самонакачивающимися ОВФ-зеркалами при инжекции внешнего сигнала от задающего генератора

Определим необходимый для преодоления порога генерации в петлевом резонаторе коэффициент усиления активного элемента (АЭ). Наиболее низкий порог генерации ОВФ-генератора наблюдается при инжекции внешнего излучения от задающего лазерного канала в многоканальной схеме. Инжектированное излучение записывает наиболее эффективное ОВФ-зеркало, на котором быстро развивается собственная генерация данного лазерного канала. При этом максимальная дифракционная эффективность решетки усиления, записанной внешним лазерным излучением, оценивается по формуле [5, 10]

$$\eta \approx G(bLV)^2, \quad (1)$$

где  $G = \exp(\alpha L)$  – ненасыщенное усиление АЭ за проход;  $\alpha L$  – инкремент ненасыщенного усиления;  $\alpha$  – коэффи-

Т.Т.Басиев. Институт общей физики им А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: basiev@lst.gpi.ru  
А.В.Гаврилов, М.Н.Ершков, С.Н.Сметанин, А.В.Федин. Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, Россия, Владимирская обл., 601910 Ковров, ул. Маяковского, 19; e-mail: ssmetanin@bk.ru  
К.А.Бельков, А.С.Борейшо, В.Ф.Лебедев. НПП «Лазерные системы», Россия, 190005 С.-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1; e-mail: Boreysho@lsystems.ru

Поступила в редакцию 19 ноября 2010 г., после доработки – 2 февраля 2011 г.

ент ненасыщенного усиления;  $L$  – длина АЭ;  $b = \alpha/4$  – максимальный коэффициент дифракционной связи [13], который достигается при записи внешним мощным излучением;  $V$  – контраст интерференции записывающих пучков, который в петлевом резонаторе меньше единицы из-за различия интенсивностей интерферирующих пучков. Отметим, что данная оценка учитывает механизм четырехволнового смешения на нелинейности насыщения коэффициента усиления в пренебрежении другими более слабыми типами нелинейности.

Ранее [2–5] нами исследовались многоканальные лазерные системы, в которых каждый канал представлял собой петлевой резонатор, собранный по схеме, приведенной на рис.1,а, где в голографическом АЭ (АЭГ) записывается самонакачивающееся ОВФ-зеркало, а внутри петли резонатора для увеличения мощности генерации может устанавливаться дополнительный усилительный АЭ (АЭУ). В многоканальной лазерной системе задающий лазерный канал инжектирует излучение в остальные каналы со стороны опорного зеркала ОЗ с помощью светоделительных зеркал [2–5]. Инжектированное излучение с интенсивностью  $I_0$  единожды самопересекается в среде АЭГ и записывает в нем голографическую решетку усиления с контрастом интерференции

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} = \frac{2\sqrt{G}}{1 + G} \quad (2)$$

в отсутствие элемента АЭУ или

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} = \frac{2\sqrt{G}}{1 + G^2} \quad (3)$$

при его наличии, где  $I_1$  и  $I_2$  – зависящие от усиления АЭ интенсивности волн, записывающих голографическую решетку ( $I_1 = I_0$ ,  $I_2 = I_0 G$  в отсутствие АЭУ и  $I_0 G^2$  при его наличии). Выражения (2), (3) подставляются в формулу (1). При этом условие порога генерации для схемы на рис.1,а в отсутствие АЭУ может быть записано в виде

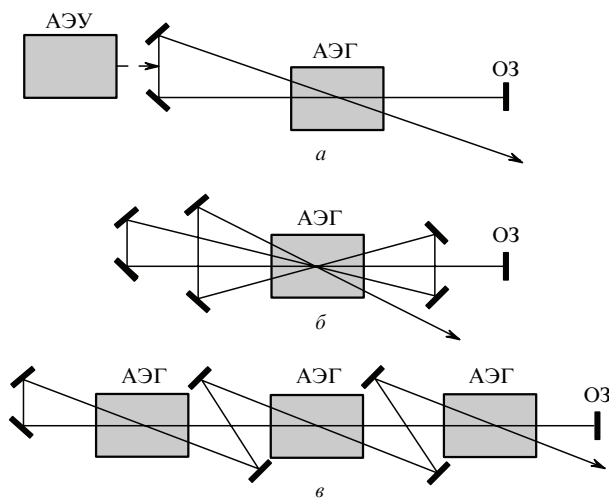


Рис.1. Три варианта оптических схем петлевых лазерных резонаторов: АЭГ – голографический активный элемент; АЭУ – усилительный активный элемент; ОЗ – опорное зеркало ОВФ-резонатора.

$$\eta = 1, \quad (4)$$

а при наличии АЭУ – в виде

$$\eta G = 1. \quad (5)$$

Тогда для этой схемы в отсутствие АЭУ получим пороговый инкремент усиления АЭ

$$\alpha L \approx 2.218, \quad (6)$$

а при наличии АЭУ –

$$\alpha L \approx 2.035. \quad (7)$$

Пороговый инкремент усиления оказался довольно высоким – соответствующее ему однопроходное усиление АЭ должно превышать  $\sim 9.2$ , а использование дополнительного АЭУ лишь на 20 % снижает требуемое усиление АЭ (до  $\sim 7.7$ ). Отметим, что в отсутствие внешнего инжектированного излучения пороговое усиление значительно выше, т. к. начальная решетка записывается очень слабым собственным затравочным излучением.

Существенно уменьшить пороговое усиление можно посредством записи в АЭГ нескольких голографических решеток при многопетлевой конфигурации резонатора, а дополнительный АЭУ, как мы выяснили, можно не использовать, что упрощает лазерную систему. На рис.1,б представлена трехпетлевая схема резонатора, содержащая только один АЭГ, в которой, однако, инжектированный со стороны опорного зеркала пучок излучения с интенсивностью  $I_0$  делает четыре прохода через АЭГ с усилением, интерферируя с самим собой на предыдущих проходах. При этом записываются шесть голографических решеток, из которых нужно выделить три наиболее контрастные, записываемые с участием волны с наибольшей интенсивностью  $I_0 G^3$  (остальные решетки затираются). Для решеток 1, 2, 3, записываемых волнами с интенсивностями  $I_0 G^2$  и  $I_0 G^3$ ,  $I_0 G$  и  $I_0 G^3$ ,  $I_0$  и  $I_0 G^3$  соответственно, имеем контрасты интерференции

$$V_1 = 2G^{1/2}/(1 + G),$$

$$V_2 = 2G/(1 + G^2), \quad (8)$$

$$V_3 = 2G^{3/2}/(1 + G^3),$$

которые подставляются в (1) для нахождения дифракционных эффективностей  $\eta_{1,2,3}$  данных решеток. Условие порога генерации для этих голографических решеток можно записать следующим образом:

$$\eta_1 + \eta_2 G + \eta_3 G^2 = 1, \quad (9)$$

откуда для схемы на рис.1,б получаем пороговый инкремент усиления АЭ

$$\alpha L \approx 1.283, \quad (10)$$

который оказался существенно меньше, чем в предыдущем случае даже при использовании АЭУ (см. формулу (7)), и требуемое однопроходное усиление АЭ здесь уменьшается более чем в два раза (до  $\sim 3.6$ ).

Недостатком схемы на рис.1,б можно считать малую мощность генерации из-за отсутствия АЭУ внутри резо-

натора, хотя это существенно и не сказывается на пороге генерации. Снижение порога генерации с повышением мощности генерации можно осуществить при увеличении длины АЭГ или использовании нескольких АЭГ в схемах на рис.1. На рис.1,б представлена схема с тремя АЭГ, эквивалентная схеме на рис.1,а с АЭГ утроенной длины. При этом пороговое усиление для схемы на рис.1,б определяется выражением (6), где длину АЭ  $L$  нужно заменить утроенной длиной  $3L$ , и тогда для данной схемы получим пороговый инкремент усиления АЭ

$$\alpha L \approx 0.739, \quad (11)$$

который оказывается меньше, чем во всех предыдущих случаях (требуемое однопроходное усиление АЭ составляет  $\sim 2.09$ ).

### 3. Экспериментальные исследования генерации многопетлевого ИАГ: Nd-лазера с поперечной диодной накачкой

Обычно при диодной накачке высокого усиления АЭ добиваются путем острой фокусировки излучения накачки [14], что существенно ограничивает объем активной среды, участвующий в генерации, и снижает мощность генерируемого излучения. В работе [12] описан лазер с петлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором при накачке линейкой лазерных диодов, излучение которой остро фокусировалось в АЭ для увеличения его усиления, что обуславливало ОВФ-генерацию в очень малом объеме активной среды с энергией импульсов менее 1 мДж. Для увеличения выходной энергии и накачиваемого объема АЭ при поддержании высокого коэффициента усиления необходимо существенно увеличивать энергию импульсов излучения накачки. Мы разработали квантрон для АЭ из ИАГ: Nd (1 ат. % Nd<sup>3+</sup>) размером  $5 \times 6 \times 110$  мм с импульсно-периодической накачкой через противоположные поперечные грани АЭ ( $6 \times 110$  мм) шестью лазерными диодными матрицами типа СЛМ-3 размером  $5 \times 25$  мм с пиковой мощностью 2.1 кВт каждая. Измеренное ненасыщенное усиление за проход АЭ при энергии импульса накачки 3.7 Дж и его длительности 300 мкс составило  $\sim 5$ , что превышает требуемое пороговое значение для обеспечения ОВФ-генерации в схеме на рис.1,б ( $G \approx 3.6$ ).

Экспериментальные исследования лазерной генерации проводились для резонатора, собранного согласно схеме на рис.1,б на базе созданного квантрона с диодной накачкой. Вместо внешнего инжектора лазерного излучения использовался вспомогательный резонатор в этом же лазерном канале, генерирующий лазерное излучение для предварительной записи ОВФ-зеркала в АЭ, что обеспечивало последующую ОВФ-генерацию. При этом на выходе лазера в качестве выходного зеркала устанавливался оптический клин с отражением 4%. Для сравнения собирался также компактный линейный двухзеркальный резонатор Фабри–Перо с использованием того же квантрона и выходного зеркала с отражением 62%.

Излучение петлевого лазерного резонатора имело высокую направленность и гауссово поперечное распределение интенсивности, сохраняющееся как в ближней, так и в дальней зоне. При диодной накачке с энергией импульса 2.9 Дж и его длительностью 300 мкс измеренная угловая расходимость выходного лазерного пучка составила 0.34 мрад по горизонтали и 0.29 мрад по вер-

тикали, что не более чем на 30% превышает дифракционный предел. Это обусловлено самокомпенсацией искажений и неоднородности коэффициента усиления под действием поперечной диодной накачки при ОВФ. При этом расходимость выходного излучения компактного резонатора Фабри–Перо превышала 4 мрад, а поперечное распределение интенсивности излучения существенно изменялось при его распространении, т.е. мы получили существенно многомодовый пучок. Энергия выходного излучения была равна 0.51 Дж для петлевого резонатора и 0.72 Дж для резонатора Фабри–Перо, т.е. различалась всего лишь на 40% (хотя длина петлевого резонатора на порядок превышала длину резонатора Фабри–Перо), что также объясняется адаптивными свойствами петлевого резонатора. Также нужно отметить неизменность пространственных параметров излучения петлевого лазерного резонатора при увеличении частоты повторения импульсов накачки с 7 до 25 Гц в отличие от таковых для резонатора Фабри–Перо, где наблюдалось увеличение расходимости лазерного излучения до 6 мрад.

На рис.2 представлены зависимости энергии  $W_L$  выходного излучения петлевого ИАГ: Nd-лазера от энергии  $W_p$  импульса накачки при его длительности  $\tau = 300$  мкс и различных частотах повторения импульсов накачки. Видно, что при увеличении энергии импульса накачки энергия выходного лазерного излучения растет линейно с большим углом наклона, определяющим дифференциальный КПД генерации (более 30%). Зависимости, соответствующие различным частотам повторения импульсов накачки, практически накладываются друг на друга, т.е. энергетические (как и пространственные) параметры лазерного излучения не зависят от частоты повторения импульсов накачки. При максимальной энергии импульсов накачки 3.63 Дж энергия выходного одномодового лазерного излучения достигает 0.73 Дж, а его максимальная средняя мощность – 18.3 Вт при частоте повторения импульсов накачки 25 Гц, что соответствует оптическому КПД генерации 20%.

На рис.3 приведены зависимости энергии лазерного излучения  $W_L$  от длительности импульса накачки  $\tau$  при частоте повторения импульсов накачки 10 Гц и различных пиковых мощностях  $P$  накачки. Видно, что при увеличении  $\tau$  в 2.7 раза (от 150 до 400 мкс), что соответствует

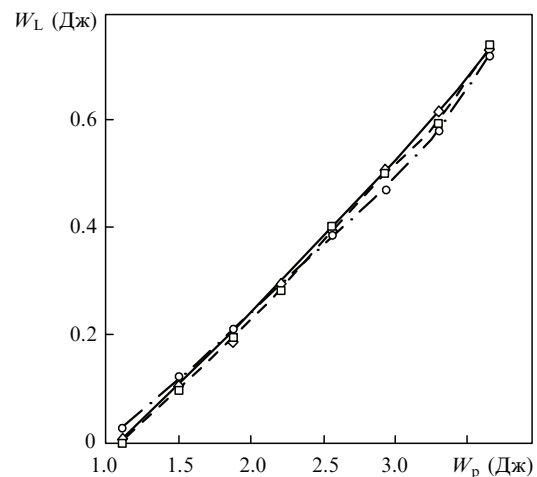


Рис.2. Зависимости энергии  $W_L$  выходного излучения многопетлевого ИАГ: Nd-лазера с диодной накачкой от энергии  $W_p$  импульса накачки при его длительности 300 мкс и частотах повторения импульсов накачки 7 ( $\diamond$ ), 10 ( $\square$ ) и 25 Гц ( $\circ$ ).

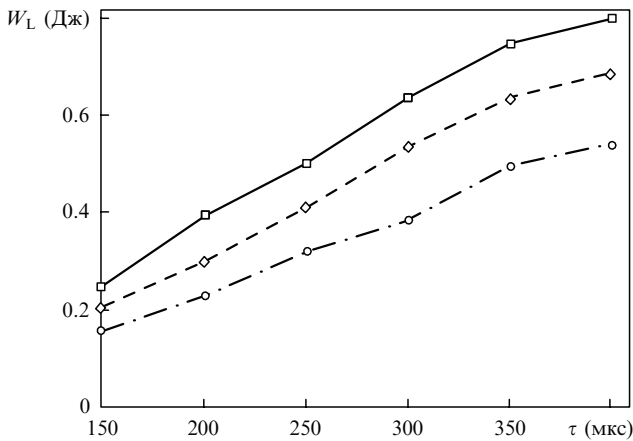


Рис.3. Зависимости энергии  $W_L$  выходного излучения многопетлевого ИАГ: Nd-лазера с диодной накачкой от длительности  $\tau$  импульса накачки при частоте повторения импульсов накачки 10 Гц и пиковых мощностях накачки  $P = 11$  ( $\diamond$ ), 9.7 ( $\square$ ) и 8.5 кВт ( $\circ$ ).

увеличению энергии  $W_p$  импульса накачки также в 2.7 раза ( $W_p = P\tau$ ), энергия импульса выходного лазерного излучения линейно возрастает в 3.3 раза (быстрее, чем энергия накачки), т.е. КПД генерации увеличивается в 1.22 раза. Это может быть обусловлено повышением дифракционной эффективности ОВФ-зеркала из-за увеличения коэффициента усиления АЭ при возрастании длительности импульса накачки, что приводит к увеличению энергии генерируемого лазерного излучения. Подобный эффект повышения энергетической эффективности генерации при увеличении длительности импульса накачки мы наблюдали ранее в петлевом лазере с ламповой накачкой [11].

#### 4. Реализация генерации петлевого ИАГ: Nd-лазера на $\lambda = 1.34$ мкм

В работах [4, 5] нами предложен многоканальный принцип построения лазерных систем с самонакачивающимися ОВФ-зеркалами на решетках населенности не только основного, но и неосновных лазерных переходов ИАГ: Nd-среды, отличающихся низким коэффициентом усиления. Так, для ИАГ: Nd-среды инкремент ненасыщенного усиления на  $\lambda = 1.34$  мкм находится по формуле  $\alpha_{1.34}L = (\alpha_{1.06}L)\sigma_{1.34}/\sigma_{1.06}$ , где  $\alpha_{1.06}L$  – инкремент ненасыщенного усиления на  $\lambda = 1.06$  мкм, а  $\sigma_{1.34}/\sigma_{1.06} \approx 0.22$  – отношение сечений усиления на  $\lambda = 1.34$  и 1.06 мкм [15]. При инкременте усиления  $\alpha_{1.06}L \approx 4.6$ , который может быть реализован на практике для ИАГ: Nd-стержней длиной  $L = 10 - 13$  см при мощной ламповой накачке, получим  $\alpha_{1.34}L \approx 1.0$ , что превышает требуемое значение (см. формулу (11)) для схемы на рис.1,в. При этом также необходимо ввести селективные потери между соседними АЭ для подавления генерации на  $\lambda = 1.06$  мкм, которая при  $\alpha_{1.06}L \approx 4.6$  завязывается даже за два прохода через АЭ. Это легко достигается при использовании селективно отражающих зеркал в «зигзагообразной» схеме резонатора [16]. Модифицированная таким образом схема представлена на рис.4 и была реализована на практике, где использовались активные ИАГ: Nd-элементы большего размера ( $\varnothing 6.3 \times 130$  мм) при ламповой накачке с энергией импульса 72 Дж и его длительностью 300 мкс.

Вместо внешнего инжектора лазерного излучения опять использовался вспомогательный резонатор в этом

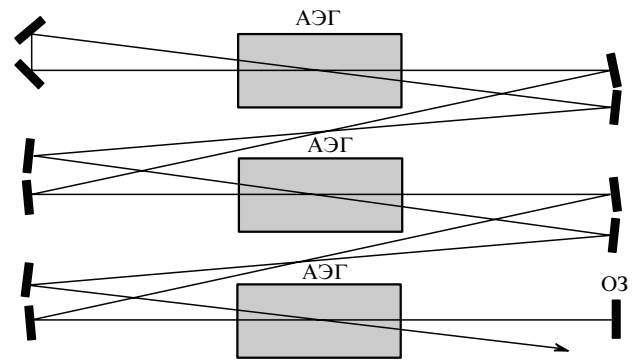


Рис.4. Оптическая схема петлевого ИАГ: Nd-лазера с длиной волны генерации 1.34 мкм.

же лазерном канале, генерирующий излучение для предварительной записи ОВФ-зеркал в АЭ, что обеспечивало последующую ОВФ-генерацию. При этом на выходе лазера в качестве выходного зеркала устанавливалась стеклянная пластина, просветленная на  $\lambda = 1.06$  мкм, с коэффициентом отражения 6 % на  $\lambda = 1.34$  мкм.

Лазер генерировал одномодовое излучение на длине волны 1.34 мкм с малой расходимостью, близкой к дифракционной, и с гауссовым поперечным распределением интенсивности, сохраняющимся как в ближней, так и в дальней зоне при частотах повторения импульсов накачки от 2 до 10 Гц, что подтверждает эффективную работу ОВФ-зеркал резонатора. На рис.5 представлены зависимости энергии  $W_L$  выходного излучения на  $\lambda = 1.34$  мкм от энергии  $W_p$  импульса накачки одного АЭГ при длительности  $\tau = 300$  мкс и частотах повторения 2 и 10 Гц. Видно, что энергия одномодового излучения растет линейно, а увеличение частоты повторения импульсов накачки незначительно замедляет ее рост. При максимальной энергии импульса накачки одного АЭГ 72 Дж энергия выходного лазерного излучения достигала 0.96 Дж, что соответствует КПД генерации 0.45 %. Наибольшая средняя мощность одномодового лазерного излучения на  $\lambda = 1.34$  мкм составила 8.5 Вт при частоте повторения импульсов накачки 10 Гц.

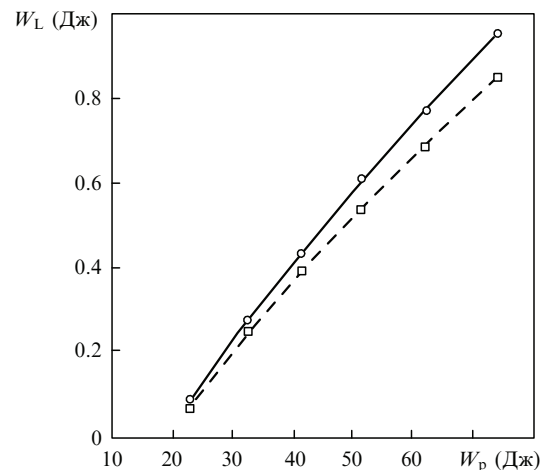


Рис.5. Зависимости энергии  $W_L$  выходного излучения петлевого ИАГ: Nd-лазера с ламповой накачкой и длиной волны генерации 1.34 мкм от энергии  $W_p$  импульса накачки при его длительности 300 мкс и частотах повторения 2 ( $\circ$ ) и 10 Гц ( $\square$ ).

## 5. Заключение

Таким образом, исследованы возможности использования слабо усиливающих активных лазерных элементов в различных схемах петлевых резонаторов применительно к разработке сфазированных многоканальных неодимовых лазерных систем с диодной накачкой и генерацией не только на основном лазерном переходе с  $\lambda = 1.06$  мкм, но и на неосновном переходе с  $\lambda = 1.3$  мкм.

Определены пороги ОВФ-генерации при многопетлевой конфигурации резонатора и при увеличении числа АЭ в петлевом резонаторе. Показано, что ОВФ-генерация при инъекции внешнего сигнала может происходить даже при однопроходном усилении АЭ, равном всего лишь  $\sim 2$ .

При мощной поперечной диодной накачке получена одномодовая генерация в многопетлевом ИАГ: Nd-лазере на  $\lambda = 1.064$  мкм с энергией импульсов до 0.75 Дж при частоте их повторения до 25 Гц, со средней мощностью до 18.3 Вт и с КПД генерации до 20 %. Реализована одномодовая генерация петлевого ИАГ: Nd-лазера на  $\lambda = 1.34$  мкм с энергией импульсов до 0.96 Дж при частоте их повторения до 10 Гц и со средней мощностью до 8.5 Вт при использовании трех АЭ внутри резонатора.

Полученные результаты обуславливают хорошие перспективы создания сфазированных твердотельных многоканальных лазерных систем при мощной диодной накачке и достижения генерации на различных лазерных переходах неодимовой лазерной среды.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой програм-

мы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № РНП.2.1.1/3838), федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракты № 02.740.11.0020 и 02.740.11.0480) и РФФИ (грант № 09-02-99023).

1. Лиханский В.В., Напартович А.П. *УФН*, **160**, 101 (1990).
2. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **33**, 659 (2003).
3. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **37**, 143 (2007).
4. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **39**, 31 (2009).
5. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Докл. РАН*, **430**, 321 (2010).
6. Бельдогин И.М., Галушкин М.Г., Земсков Е.М. *Квантовая электроника*, **11**, 887 (1984).
7. Бельдогин И.М., Беренберг В.А., Васильев А.Е. и др. *Квантовая электроника*, **16**, 1142 (1989).
8. Damzen M.J., Green R.P.M., Syed K.S. *Opt. Lett.*, **20**, 1704 (1995).
9. Fedin A.V., Gavrilov A.V., Basiev T.T., Antipov O.L., Kuzhelev A.S., Smetanin S.N. *Laser Phys.*, **9**, 433 (1999).
10. Basiev T.T., Fedin A.V., Osiko V.V., Smetanin S.N. *Laser Phys.*, **13**, 903 (2003).
11. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Докл. РАН*, **408**, 614 (2006).
12. Smith G., Damzen M.J. *Opt. Express*, **15**, 6458 (2007).
13. Kogelnik H. *Bell Syst. Techn. J.*, **48**, 2909 (1969).
14. Гречин С.Г., Николаев П.П. *Квантовая электроника*, **39**, 1 (2009).
15. Зверев Г.Н., Голяев Ю.Д., Шалаев Е.А., Шокин А.А. *Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом* (М.: Радио и связь, 1985).
16. Басиев Т.Т., Басиева М.Н., Гаврилов А.В., Ершков М.Н., Ивлева Л.И., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **40**, 710 (2010).