

УДК 535.337

## ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ С КОМБИНИРОВАННОЙ АКТИВНОЙ СРЕДОЙ

М. В. Осипов, В. Н. Пузырев, А. Н. Стародуб, С. И. Федотов, А. А. Фроня

*Предложен метод получения широкой 30–100 Å линии излучения в оптических квантовых генераторах на неодимовом стекле, основанный на использовании составного активного элемента. Активная среда при этом является комбинацией двух разных стеклянных матриц, легированных ионами  $Nd^{3+}$ : силикатной и фосфатной. Проведены эксперименты по изучению структуры и ширины спектра генерации таких ОКГ в зависимости от свойств активного элемента, типа резонатора и уровня накачки. Зарегистрирована ширина спектра излучения, уширенная более чем в два раза по сравнению с ОКГ на силикатном стекле.*

В экспериментах на лазерной установке “Канал-2” [1] было показано, что уменьшение степени пространственной когерентности лазерного пучка до  $\gamma_{12} = \frac{\lambda}{\alpha D} = 0.018$  (здесь  $\lambda$  – длина волны излучения,  $\alpha$  – угол расходимости излучения,  $D$  – апертура пучка) приводит к подавлению мелкомасштабной самофокусировки излучения в оптической среде лазера при плотностях энергий вплоть до 10 Дж/см<sup>2</sup>. Кроме того, временная когерентность существенно влияет на коэффициент усиления сигнала, распространяющегося в активной среде. Последнее означает, что если ширину линии генерации приблизить к величине ширины линии люминесценции стекла, используемого в усилителях, то можно ожидать увеличения эффективности съема запасенной в усилителе энергии.

Известно, что для управления спектральными характеристиками лазера может быть использована схема с комбинированной активной средой. В работах [2–4], например,

для получения спектральной полосы усиления высокоинтенсивных фемтосекундных импульсов (100 фс соответствует ширина спектральной полосы усиления  $\sim 370 \text{ \AA}$ ) использовалась комбинация из усилителей на основе фосфатного и силикатного стекла, легированного ионами  $\text{Nd}^{3+}$ .

В работе [5] исследовался спектр генерации в случае использования комбинированного рабочего тела в зависимости от энергии накачки. В один резонатор помещались стекла с узким и широким спектрами генерации. В качестве комбинированной активной среды использовали комбинации простых кристаллов ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} - \text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{CaWO}_4 - \text{Nd}^{3+}$ ) и кристаллов смешанного типа ( $\text{CaF}_2 - \text{YF}_3 - \text{Nd}^{3+}$ ) и стекла (ЛГС-6). Активные среды размещались в резонаторе последовательно друг за другом, каждая в своей осветительной камере.

Для получения широкой линии генерации порядка  $100 \text{ \AA}$  в лазере на Nd-стекле в данной работе предлагается использовать комбинированную активную среду: две разные стеклянные матрицы, легированные ионами  $\text{Nd}^{3+}$ . Возможность уширения спектра генерации связана с тем, что спектры люминесценции силикатного и фосфатного стекол, легированных ионами  $\text{Nd}^{3+}$ , лежат рядом друг с другом и имеют области перекрытия между собой (рис. 1). Максимумы полосы люминесценции этих стекол расположены на расстоянии друг от друга  $35 \text{ см}^{-1}$ , а частоты генерации – на  $70 \text{ см}^{-1}$  [6].

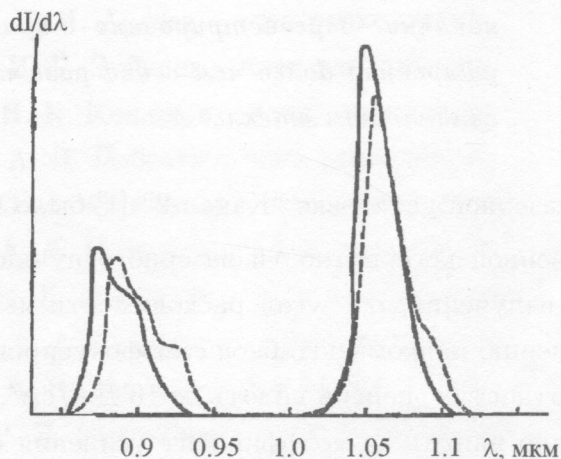


Рис. 1. Спектры люминесценции ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в силикатном стекле (штриховые линии) и в фосфатном стекле (сплошные линии) [7].

Усиление активной среды, помещенной в резонатор, определяется формулой [8]

$$\alpha(\nu) = 2l\alpha^*(\nu), \quad (1)$$

где  $l$  – длина активной среды, а  $\alpha^*(\nu) = (N_2 - N_1)\sigma_{21}(\nu)/V$  – коэффициент усиления активной среды. Здесь  $N_2$  и  $N_1$  – общее число возбуждений, соответственно, на верхнем и нижнем рабочих уровнях лазера,  $\sigma_{21}$  – поперечное сечение вынужденного перехода,  $V$  – объем, занимаемый активной средой.

Чтобы усиление излучения происходило равномерно по всей ширине ожидаемого спектра, необходимо выполнение условия равенства усиления сред  $\alpha_c(\nu) = \alpha_\phi(\nu)$ , где индекс  $c$  соответствует силикатному неодимовому стеклу, а  $\phi$  – фосфатному. Из этого условия определялось отношение длин стержней, из которых был изготовлен составной активный элемент. Для этого по известным сечениям взаимодействия рассчитывались коэффициенты усиления излучения, основываясь на предположении, что нижний лазерный уровень в четырехуровневой схеме генерации практически пуст, а концентрация возбужденных состояний одинакова для обоих стекол. Сечения взаимодействия отличаются приблизительно в 2 раза,  $\sigma_c = 1.7 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> для силикатного стекла и  $\sigma_\phi = 3.2 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> для фосфатного стекла [7, 9], а так как диаметры силикатного и фосфатного стержней выбираются одинаковыми (10 мм), то, соответственно, отношение их длин должно быть равно приблизительно 2, т.е. длина силикатного стержня должна быть приблизительно в 2 раза больше, чем длина фосфатного стержня.

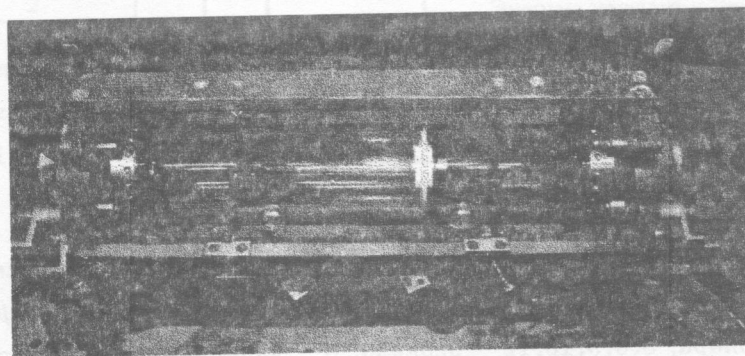


Рис. 2. Конфигурация осветителя задающего генератора.

В одном осветителе стержни располагаются последовательно друг за другом (рис. 2). Стыковое соединение закрепляется муфтой. Для того чтобы в месте соединения составной стержень не прогибался, была изготовлена и установлена поверх муфты специальная шайба из тефлона. Между торцами стержней заливается глицерин. Глицерин проверялся на поглощение излучения для разных длин волн, и было обнаружено, что для  $\lambda = 1.06$  мкм поглощение фактически отсутствует. Осветитель задающего генератора имеет стандартную четырехламповую конфигурацию.



Для проверки работоспособности предложенного метода получения широкой линии генерации исследуемый генератор первоначально был запущен в режиме свободной генерации. Для этого осветитель с составным активным элементом помещался в плоскопараллельный резонатор с коэффициентами пропускания зеркал 20% и 100%. Было установлено, что для данной конфигурации и размеров осветителя режим свободной генерации осуществим. Порог свободной генерации для составного стержня был получен при энергии накачки 2.9 кДж.

В режиме свободной генерации был изучен спектральный состав излучения генератора с комбинированной активной средой, определена ширина линии генерации и было проведено сравнение ее с шириной линии генерации задающего генератора установки "Канал 2". В этих целях использовался монохроматор МДР-12 [10], со сменной дифракционной решеткой с числом штрихов  $600 \text{ мм}^{-1}$ .

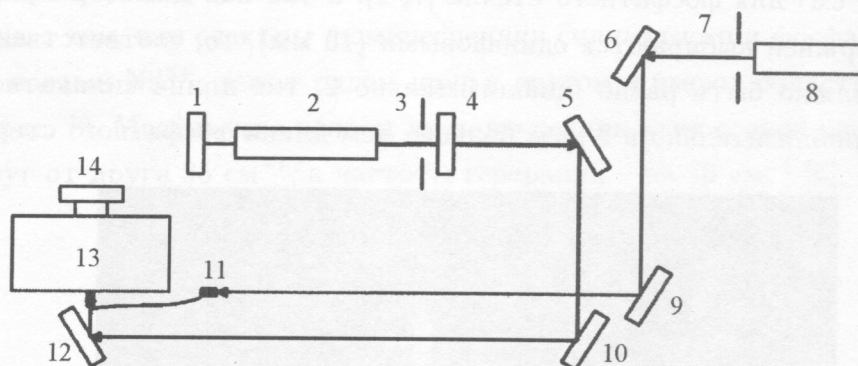


Рис. 3. Оптическая схема регистрации спектра излучения задающего генератора и YAG:Nd лазера. 1 – “глухое” зеркало резонатора, 2 – активный элемент, 3, 7 – диафрагмы, 4 – выходное зеркало резонатора, 5, 6, 9, 10, 12 – зеркала, 8 – юстировочный лазер YAG:Nd, 11 – световод, 13 – монохроматор, 14 – фотоаппарат.

Оптическая схема, представленная на рис. 3, позволила одновременно регистрировать спектры излучения задающего генератора (рис. 4.2) и юстировочного лазера YAG:Nd ( $\lambda = 10640 \text{ \AA}$ ) (рис. 4.1), который использовался для формирования реперного излучения. Излучение с выхода монохроматора МДР-12 с помощью объектива проецировалось на матрицу цифрового фотоаппарата размером  $15 \times 22 \text{ мм}^2$ . Дисперсия в рабочем дифракционном порядке ( $\lambda = 10600 \text{ \AA}$ ) составляет  $17.1 \text{ \AA/мм}$ . Дисперсия не изменялась для всей серии экспериментов.

Был изучен спектральный состав излучения генератора в зависимости от энергии накачки. Как и ожидалось, увеличение энергии накачки вызвало уширение спектрального интервала. Минимальное значение ширины спектра излучения составило  $30 \text{ \AA}$  при накачке  $3.75 \text{ кДж}$ , а максимальное составило  $72 \text{ \AA}$  при накачке в  $12.15 \text{ кДж}$  (рис. 4, 5).

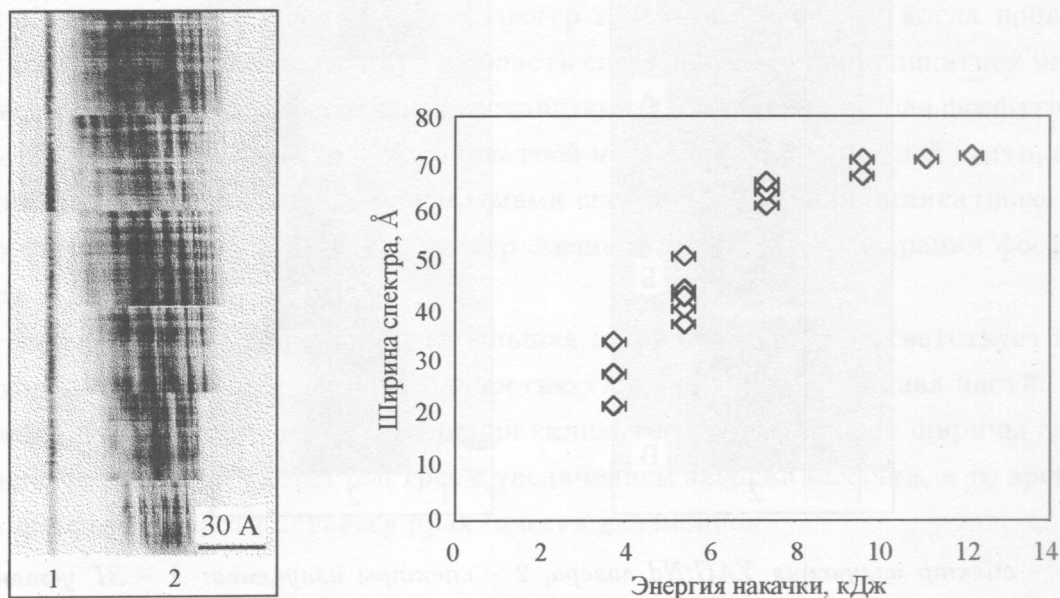


Рис. 4. 1 – спектр излучения YAG:Nd лазера, 2 – спектр излучения исследуемого генератора в зависимости от энергии накачки, энергия накачки увеличивается снизу вверх  $3.75; 5.4; 7.35; 9.6; 11.09; 12.15 \text{ кДж}$  (резонатор плоскопараллельный, режим свободной генерации).

Рис. 5. Зависимость ширины спектра генерации от энергии накачки (случай плоскопараллельного резонатора).

Для сравнения был зарегистрирован спектр задающего генератора установки “Канал-2” [1], переведенного в режим свободной генерации. В качестве активного элемента в этом ЗГ использовался стержень из силикатного стекла марки ГЛС-1. Спектр ЗГ установки “Канал-2” представлен на рис. 6А, характерная ширина спектра  $46 \text{ \AA}$  при энергии накачки  $8.66 \text{ кДж}$ . В спектре не наблюдается линейчатая структура, что объясняется оптической схемой резонатора [1]. Также на рис. 6 представлены спектры излучения генератора с составным активным элементом в режиме свободной генерации с полуконфокальным (рис. 6Б) и плоскопараллельным резонатором (рис. 6В). Как видно из рис. 6Б, 6В, количество и спектральное положение генерируемых линий несколько

изменяется от импульса к импульсу, а спектр генерации состоит из нескольких десятков линий. Это связано с тем, что внутри таких резонаторов образуются интерферометрические системы.

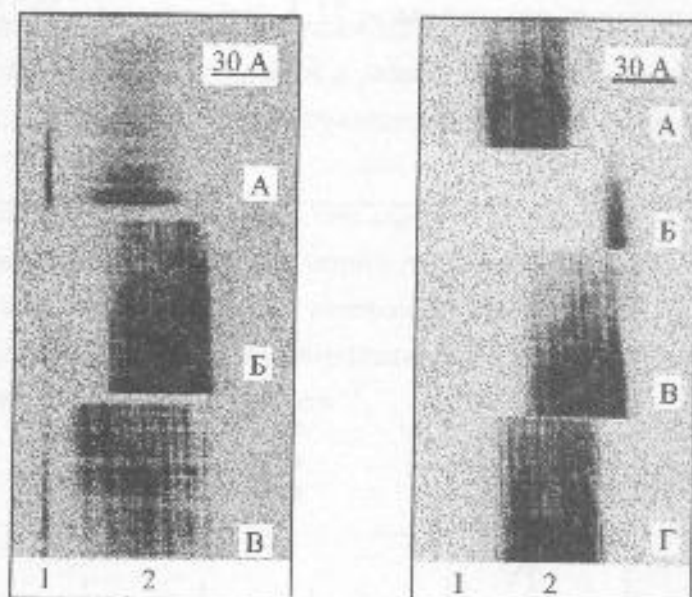


Рис. 6. 1 – спектр излучения  $YAG:Nd$  лазера, 2 – спектры излучения: А – ЗГ установки “Канал-2”, Б – генератора с составным активным элементом с полуконфокальным резонатором, В – генератора с составным активным элементом с плоскопараллельным резонатором (режим свободной генерации, энергия накачки 9,6 кДж).

Рис. 7. 1 – спектр излучения  $YAG:Nd$  лазера, 2 – спектры излучения генератора: А – открыта силикатная часть, Б – открыта фосфатная часть, В – открыто 35% силикатной части и 100% фосфатной части, Г – составной стержень открыт полностью. Энергия накачки для всех комбинаций экранирования активного элемента, кроме случая, когда открыта только фосфатная часть, составляла 11,09 кДж. Для фосфатной части энергия накачки была равна 9,6 кДж.

Для изучения вклада в общий спектр генерации обеих составляющих активного элемента исследуемого генератора был проделан следующий эксперимент. С помощью металлической фольги была экранирована от светового излучения ламп накачки фосфатная часть составного стержня, а потом силикатная часть. При этом осветитель располагался в полуконфокальном резонаторе. Были получены пороговые значения энергии накачки для фосфатной и силикатной частей, которые составили 5,4 и 3,75 кДж, соответственно. Когда был открыт для накачки весь составной стержень, порог генерации



составил 2.9 кДж, что меньше порога для силикатной части стержня.

Кроме того, была изучена зависимость ширины спектра генерации от энергии накачки для различных вариантов экранирования составного стержня: открыта для накачки только фосфатная часть; открыта только силикатная часть; открыт весь составной стержень; открыто 35% силикатной части и 100% фосфатной части (рис. 7, 8). Результаты экспериментов показали, что спектр генерации в случае, когда полностью открыт составной стержень, сдвинут в область спектра генерации силикатной части, и фактически отсутствует спектральная составляющая, соответствующая фосфатной части (рис. 7). Когда же открыто 35% силикатной части и 100% фосфатной части, спектр генерации располагается между максимумами спектров генерации силикатного и фосфатного стержня, и соответственно спектр смещается к спектру генерации фосфатной матрицы.

Из графика (рис. 8) видно, что наибольшая ширина спектра соответствует комбинации, когда открыты для накачки полностью силикатная и фосфатная части. Кроме того, видно, что ширина спектра генерации силикатной части больше ширины спектра фосфатной части, и она растет быстрее с увеличением энергии накачки, в то время как ширина фосфатной части остается практически неизменной.

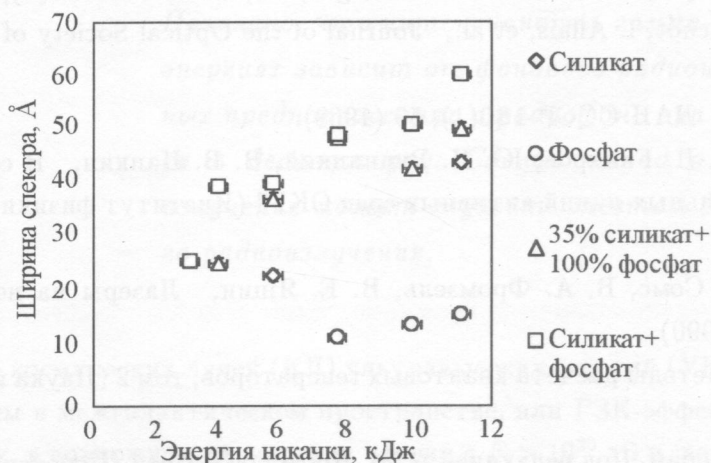


Рис. 8. Зависимость ширины спектра от энергии накачки для различных вариантов накачек составного стержня.

Порог генерации силикатной матрицы, легированной ионами  $Nd^{3+}$ , меньше порога фосфатной. Поэтому при развитии генерации в составном стержне генерация возникает в первую очередь на длинах волн, соответствующих силикатной матрице, что приводит

к съему инверсии в фосфатной матрице. Этот съем инверсии, по-видимому, и является причиной смещения спектра генерации составного активного элемента в длинноволновую область, и именно по этой причине в спектре его излучения подавляются крылья в коротковолновой области, соответствующие фосфатной части активного элемента.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов были изучены ширина и спектральное положение излучения, генерируемого в ОКГ с комбинированной активной средой. При этом изменялись такие параметры генератора, как резонатор, уровень энергии накачки, активная среда. Используя предложенный метод получения широкой линии излучения в ОКГ на неодимовом стекле, удалось получить ширину спектра генерации  $72 \text{ \AA}$ .

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант N 07-02-01407.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. I. Fedotov, L. P. Feoktistov, M. V. Osipov, and A. N. Starodub, *Journal of Russian Laser Research* **25**, 1 (2004); Препринт ФИАН N 35 (ФИАН, Москва, 2002).
- [2] Michael D. Perry and Gerard Mourou, *Science* **264**, 917 (1994).
- [3] N. Blanchot, C. Rouyer, C. Sauteret and A. Migus, *Optics Letters* **20**(4), 395 (1995).
- [4] C. Rouyer, N. Blanchot, I. Allais, et al., *Journal of the Optical Society of America B* **13**(1), 55 (1996).
- [5] А. А. Каминский, *ДАН СССР* **180**(1), 59 (1968).
- [6] Н. Е. Алексеев, О. Н. Гиляров, Ю. П. Рудницкий, В. В. Цапкин, В сб. "Неоднородное уширение спектральных линий активных сред ОКГ" (Институт физики АН УССР, Киев, 1969), с. 127.
- [7] А. А. Мак, Л. Н. Сомс, В. А. Фромзель, В. Е. Яшин, *Лазеры на неодимовом стекле* (Наука, Москва, 1990).
- [8] Б. И. Степанов, *Методы расчета квантовых генераторов*, том 2 (Наука и техника, Минск, 1968).
- [9] *Справочник по лазерам*. Под редакцией А. М. Прохорова, том 1 (Советское радио, Москва, 1978).
- [10] И. М. Нагибина, В. К. Прокофьев, *Спектральные приборы и техника спектроскопии* (изд-во "Машиностроение", Ленинград, 1967).

Поступила в редакцию 26 июля 2007 г.