

ИСПЫТАНИЯ БЛОКА ШИРОКОАПЕРТУРНОГО ЛАЗЕРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

TESTING OF THE WIDE-APERTURE LASER AMPLIFIER BLOCK

*С. А. Бельков², В. М. Водовозов¹, И. Н. Воронич², И. В. Галахов², С. Г. Гаранин²,
Д. В. Гетман¹, В. Л. Демидов¹, В. В. Еремкин¹, С. В. Кошечкин², В. А. Кубасов¹, Р. Ф. Курунов¹,
Д. Н. Литвин², Ю. М. Мокрушин¹, А. В. Павленко¹, Е. Б. Пильгун¹, Ю. В. Шагалкин²*

*S. A. Bel'kov², V. M. Vodovozov¹, I. N. Voronich², I. V. Galakhov², S. G. Garanin²,
D. V. Getman¹, V. L. Demidov¹, V. V. Eryomkin¹, S. V. Koshechkin², V. A. Kubasov¹, R. F. Kurunov¹,
D. N. Litvin², Yu. M. Mokrushin¹, A. V. Pavlenko¹, E. B. Pilgun¹, Yu. V. Shagalkin²*

¹НИИЭФА им. Д. В. Ефремова

²ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

¹«D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus» (JSC «NIEFA»)

²Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

Представлены результаты экспериментальной отработки широкоапертурного 8-канального блока усилительного создаваемой лазерной установки нового поколения, состоящего из 7 секций [1]. Активные дисковые элементы изготовлены АО ЛЗОС из неодимового фосфатного стекла КНФС-3 [2]. Световая апертура каждого лазерного канала составляет 425×425 мм². Размер активного элемента – $808,5 \times 458 \times 41$ мм³. Энергозапас системы питания 6,05 МДж при зарядном напряжении 24 кВ. По результатам испытаний определены общие и удельные характеристики усилителя. Получено распределение величины линейного коэффициента усиления g_0 по апертуре лазерного канала, при этом зарегистрированы значения в диапазоне $g_0 = (0,045 \div 0,048)$ см⁻¹. Показано, что g_0 может достигать значения 0,05 см⁻¹. Разработаны и реализованы оригинальные методики измерений, в том числе, с применением широкоугольного акустооптического фильтра, использующего принцип дифракции на ультразвуке. Отмечены надежность и высокий ресурс работы усилителя.

This paper shows the data obtained as a result of testing a wide-aperture 8-channel 7-sections amplifier unit of the new-generation laser facility [1]. The active disk components made of neodymium phosphate glass KNFS-3 [2] were manufactured by JSC «LZOS». The light aperture of each laser channel is 425×425 mm². The active component size is $808.5 \times 458 \times 41$ mm³. The power supply energy storage is 6.05 MJ at 24 kV charging voltage. The amplifier unit general and specific characteristics were determined based on the test data. The distribution of g_0 linear gain factor by the laser channel aperture has been obtained, the values in the range of $g_0 = (0.045 \div 0.048)$ cm⁻¹ were recorded. It is shown that g_0 can reach a value of 0.05 cm⁻¹. The original measuring techniques including those which use a wide-angle acoustic optical filter with ultrasound diffraction were developed and implemented. The amplifier unit reliability and high resource were noted.

В настоящее время в РФ создается мощная лазерная установка нового поколения [1], которая может применяться для изучения физических процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, в исследованиях, связанных с проблемой инерциального УТС. Установка по энергетике превосходит существующие в мире аналоги (NIF в США и LMJ во Франции).

В качестве опытного образца модуля выходного каскада усиления лазерной установки в АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» создан 8-канальный блок усилительный У2 (рис. 1), состоящий из 7 одинаковых секций (СБУ).

Каждая СБУ состоит из двух кассет активных элементов (АЭ), в которых АЭ расположены в четырех уровнях по вертикали и трех ламповых кассет (ЛК): двух боковых и одной центральной с вертикальным расположением импульсных ламп накачки (ЛН) марки FL40000 NIF (длина 2 м, межэлектродное расстояние 1,8 м, наружный диаметр 48 мм, давление газа ~100 торр). Центральные кассеты (8 ламп) имеют ромбовидные отражатели, боковые (6 ламп) – профилированные. Материал отражателей – фольга MIRO-SILVER. Общее количество ламп накачки в блоке усилительном У2 (далее – «усилитель») – 196 штук.

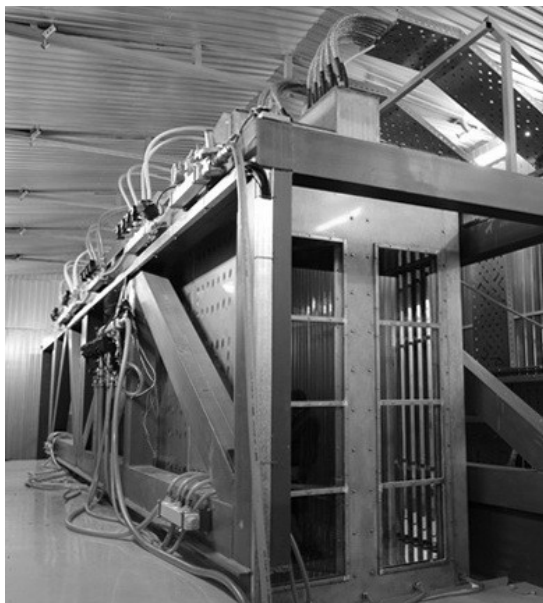


Рис. 1. Блок усилительный У2

Активные дисковые элементы из неодимового фосфатного стекла КНФС-3 [2], изготовленные АО ЛЗОС, имеют размеры $808,5 \times 458 \times 41$ мм³. Расположенные под углом Брюстера, они позволяют иметь световую апертуру канала усиления 425×425 мм². Количество активных элементов – 56.

Усилитель имеет симметричную конструкцию относительно вертикальной и горизонтальной осей, две его половины имеют общую центральную ЛК. Ламповые кассеты отделены от кассет с АЭ защитными стеклами без просветляющего покрытия. ЛК имеют разъемное электрическое соединение с корпусом усилителя. Все кассеты загружаются в усилитель снизу, с технологического этажа стенда. Питание ЛН усилителя обеспечивает система накопления и коммутации электрической энергии (СНКЭЭ), через силовые высоковольтные кабельные линии. Полный энергозапас (СНКЭЭ) при номинальном напряжении 24 кВ – 6,05 МДж. Стенд снабжен системами газообеспечения и кондиционирования. В рабочем положении усилитель заполнялся азотом.

Первоначально испытания проводились при заполнении активными элементами 4-х каналов одной половины усилителя. При этом рабочий канал (второй снизу) содержал 7 АЭ с кладдингом, остальные – без кладдинга. Для накачки АЭ использовалось излучение 7 боковых и часть излучения 7 центральных ламповых кассет.

На рис. 2 показана схема компоновки усилителя. Стрелкой показано направление луча диагностического лазера.

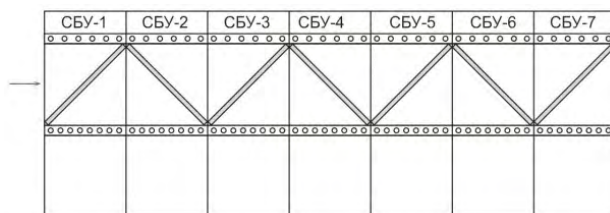


Рис. 2. Схема компоновки усилителя У2 (вид сверху)

Разряд СНКЭЭ на ЛН формировался подачей импульса предварительной ионизации амплитудой до ~ 40 кВ длительностью менее 15 мкс и последующего за ним основного импульса с регулируемой задержкой между ними. Во время импульса предыонизации оценивалось состояние электрических цепей питания ЛК для возможности подачи основного импульса.

Важнейшими характеристиками усилителя является линейный коэффициент усиления слабого сигнала g_0 и его распределение по апертуре активных элементов [3]. Исследование этих характеристик проводилось в несколько этапов с применением различных режимов работы измерительного лазера (ИЛ), ряда методик и оптических схем.

Измерение распределения коэффициента усиления по апертуре АЭ

Оптическая схема измерения коэффициента усиления g_0 приведена на рис. 3. Она включает в себя ИЛ, систему поворотных и светоделительных зеркал, спектральные приборы (МДР-23, МДР-2) и фотоприемные устройства (фотодиоды). Для получения распределения g_0 зеркала М3 и М4 смещаются по горизонтальной оси усилителя. В измерениях использовался лазер на кристалле YLF: Nd³⁺. Рабочая длина волны ($1,053 \pm 0,0005$) мкм соответствует максимуму люминесценции АЭ. Длительность импульса генерации ИЛ ($1 \div 2$) мс, выходная энергия ~ 20 мДж.

Приемная система состоит из двух идентичных каналов транспортировки и регистрации лазерного излучения: рабочего и опорного. В рабочем канале излучение проходит через 7 АЭ, в опорном – через торцевые окна блока усилительного, минуя АЭ. Создание опорного канала потребовалось для определения коэффициента усиления при наличии помех в виде релаксационных колебаний, присутствующих в выходном излучении измерительного лазера [4].

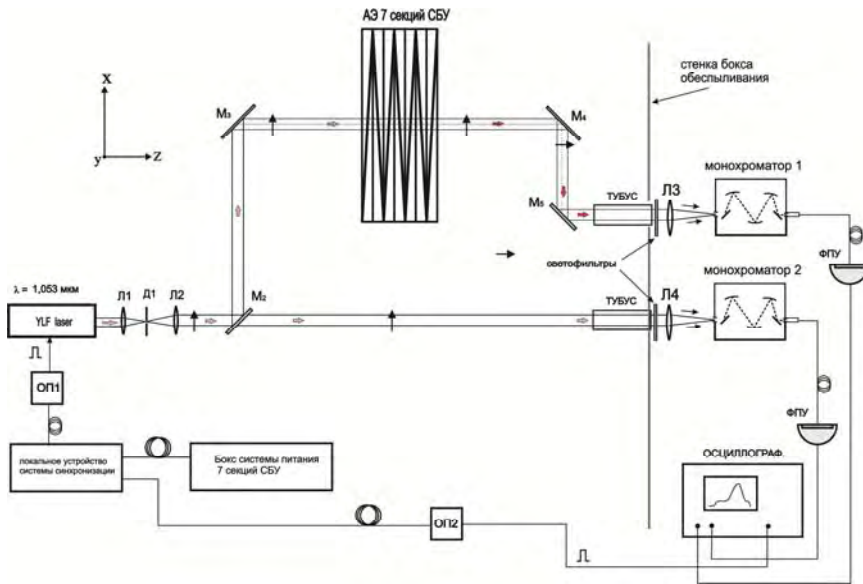


Рис. 3. Оптическая схема измерения коэффициента усиления

Первые же измерения g_0 в описанной конфигурации дали значение $\sim 0,04 \text{ см}^{-1}$. Получение g_0 на нижнем ожидаемом пределе объясняется наличием спонтанного некогерентного шума (люминесценции) и усиленного спонтанного шума (суперлюминесценции) в активных элементах без кладинга, которые эффективно подсвечивали рабочие АЭ с кладингом, обедняя инверсную заселенность в них. Кроме того, при испытаниях применялись непросветленные защитные стекла, расчетные френелевские потери в которых с учетом углового распределения световых потоков составляли $\sim 14,5\%$. Оптические расчеты в программе ZEMAX показали, что при удалении из усилителя АЭ без кладинга облученность остав-

шихся рабочих АЭ лампы накачки возрастет как минимум на 13% и будет соответствовать по величине и распределению режиму засветки при полной сборке усилителя. Однако при этом изменится объемное распределение плотности инверсионных центров и, соответственно, возрастут потери от суперлюминесценции, т. е. получаемые значения g_0 могут оказаться заниженными.

Ниже приведены результаты измерения g_0 в рабочем канале усилителя, укомплектованного 7 АЭ с кладингом, при отсутствии АЭ в остальных каналах.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы сигналов усиленного и опорного излучений. При вычитании опорного сигнала из усиленного

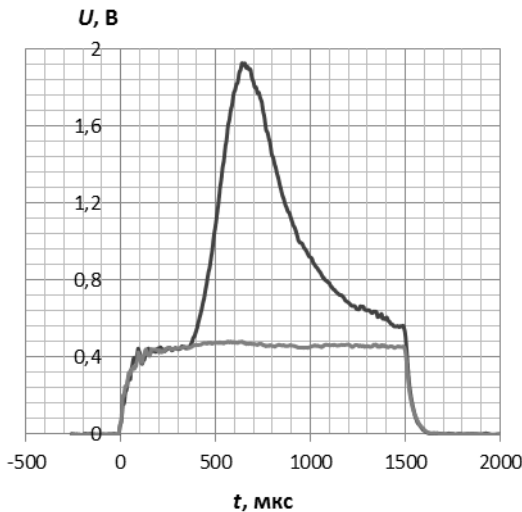


Рис. 4. Осциллограммы сигналов усиленного и опорного излучений

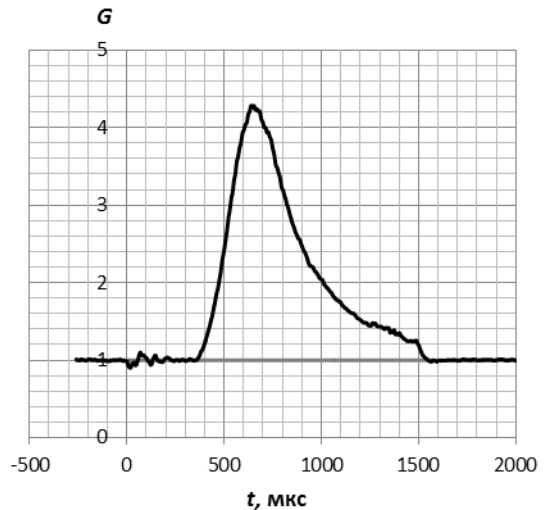


Рис. 5. График изменения общего коэффициента усиления во времени

компенсируются колебания помех и погрешности формы исходного импульса. Нормируя эту разность на средний уровень опорного сигнала и увеличивая на единицу: $[u_y(t) - u_{\text{ОП}}(t)] / U_{\text{ОП}} + 1$ – получаем график временного хода общего коэффициента усиления $G(t)$, из которого определяется линейный коэффициент усиления слабого сигнала g_0 , представленный на рис. 5.

Амплитудное значение $G = U_y / U_{\text{ОП}}$ используется в выражении для коэффициента усиления, полученной из интегральной формулы Франца-Нодвига в приближении слабого сигнала:

$$g_0 = \frac{\ln G \times \sin \theta_B}{NL} \quad (1)$$

где $\theta_B \approx 56,9^\circ$ – угол Брюстера для неодимового фосфатного стекла; $L = 41$ мм – толщина АЭ; N – количество АЭ в усилителе.

При этом $l = \frac{NL}{\sin \theta_B}$ – длина пути излучения

ИЛ в АЭ.

На рис. 6 представлено распределение коэффициента усиления слабого сигнала g_0 в трех сечениях по апертуре усилителя при зарядном напряжении 24 кВ.

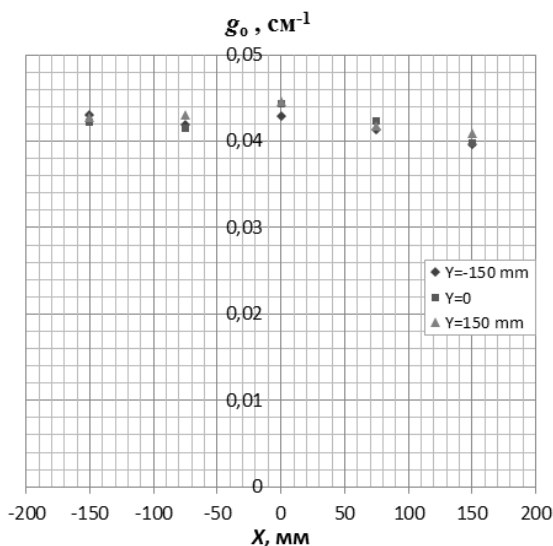


Рис. 6. Распределение коэффициента усиления по апертуре АЭ

Из рисунка видно, что коэффициент усиления достигает значения $g_0 \approx 0,044$ см⁻¹ в центральной области апертуры АЭ. Характерным для распределения является спад значения g_0 на краях АЭ, где распределение инверсии, а следовательно, и люминесценции, по толщине более неоднородно, чем в центре. Кроме того, это может быть связано с

возрастанием френелевских потерь на АЭ, обусловленных магнитооптическими эффектами, возникающими за счет больших значений квазистационарного магнитного поля от тока в ЛН на краях АЭ. Картина силовых линий магнитного поля для двух секций усилителя представлена на рис. 7.

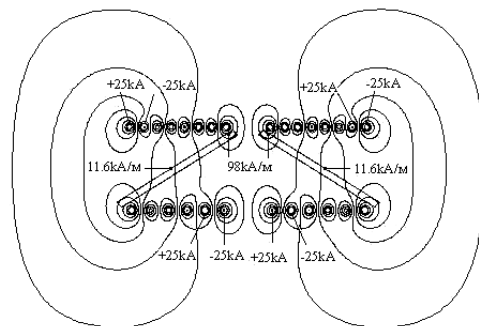


Рис. 7. Картина магнитного поля ламп накачки для двух секций усилителя

Максимальная напряженность магнитного поля в областях АЭ, расположенных вблизи ЛК, в момент пуска ИЛ достигает значений ~ 50 кА/м. При таких значениях могут проявляться как линейный по полю эффект двойного кругового лучепреломления (эффект Фарадея), так и квадратичный по полю сдвиг фаз в волнах различной поляризации (эффект Коттона – Мутона).

Необходимо отметить, что с использованием выражения (1) определяется усредненное значение g_0 по 7 АЭ, поскольку в крайних секциях (СБУ-1 и СБУ-7 на рис. 2), как установлено экспериментально, освещенность АЭ на $\sim 11,5\%$ меньше, чем в остальных АЭ. С учетом этого для усредненного коэффициента усиления g_0 , определяемого по суммарному пути луча для всех семи секций, справедливо выражение:

$$g_0 \times 7L = \sigma N_0 [5L + 2L \times (1 - 0,115)] \quad (\sigma - \text{сечение индуцированных переходов; } N_0 - \text{инверсия в АЭ к моменту пуска ИЛ}).$$

Таким образом, реальный коэффициент усиления пяти внутренних секций: $g_0^{(2-6)} = \sigma N_0 = 1,034 g_0$, а двух крайних – $g_0^{(1,7)} = \sigma N_0 (1 - 0,115) = 0,915 g_0$. Тем не менее,

далее под g_0 , как и раньше, будет подразумеваться его усредненное значение. На рис. 8 показана зависимость коэффициента усиления от запасаемой энергии в СНКЭЭ (величина энергии питания ЛН центральных кассет уменьшена наполовину).

Там же приведена кривая, аппроксимирующая точки, рассчитанные по экспериментальным данным.

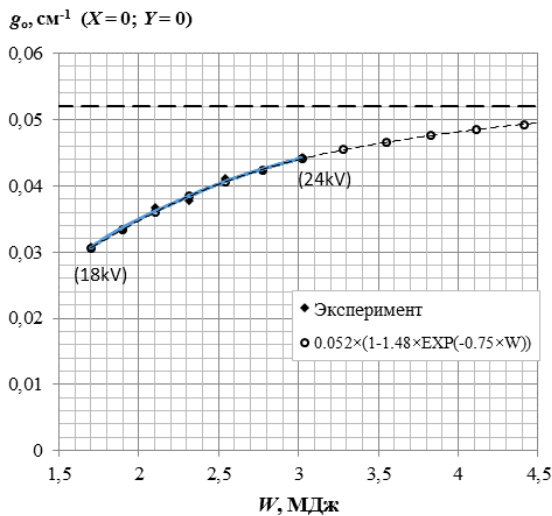


Рис. 8. Аппроксимация зависимости коэффициента усиления от запасенной энергии

Поведение функции $g_0 = f(W)$ показывает, что при изменении зарядного напряжения от 18 кВ до 24 кВ ее производная при сохранении роста функции уменьшилась в ~ 2 раза, следовательно, усилитель не находится в стадии насыщения и имеются пути повышения g_0 .

Отработка методики многоканальной регистрации

Получение распределения g_0 по всей апертуре АЭ с достаточно высоким пространственным разрешением в одноканальной схеме регистрации требует большого числа рабочих циклов, которое ограничено ресурсом установки. Поэтому возникла необходимость применения многоканальной схемы, позволяющей получать распределение коэффициента усиления g_0 по одной из координат (в пяти точках) в одном рабочем цикле. В этом случае в оптической схеме целесообразно использовать ИЛ в режиме с модулированной добротностью при длительности импульса наносекундного диапазона и фоторегистратор на основе ПЗС-матрицы.

С целью уменьшения погрешности была принята следующая методика определения коэффициента усиления. Перед каждым рабочим пуском на осциллографе регистрировались 10 ÷ 20 пар сигналов (рабочего и опорного), вычислялось среднее значение отношения их амплитуд ($U_{\text{Л}}/U_{\text{ОП}}$) и величина отклонения от среднего значения. Затем

производился пуск установки с регистрацией усиленного и опорного сигналов. Величина G рассчитывалась с учетом амплитуд усиленного $U_{\text{У}}$ и опорного $U_{\text{ОП}}^{(\text{У})}$ сигналов по формуле:

$$G = \frac{U_{\text{У}}}{U_{\text{ОП}}^{(\text{У})}} \frac{U_{\text{ОП}}}{U_{\text{Л}}}. \quad (2)$$

Из предварительных экспериментов, проведенных для одноканальной схемы, были определены значения g_0 в диапазоне (0,041 ÷ 0,044) см⁻¹. Эти результаты соответствуют приведенным на рис. 6 в режиме работы ИЛ с импульсом генерации (1 ÷ 2) мс.

Перевод измерительного лазера в режим с модулированной добротностью дал возможность реализовать многоканальную схему с применением в качестве фоторегистратора ССД-камеры. Это позволило визуализировать непосредственно на мониторе компьютера энергетические изображения усиленных световых пучков с поверхности ПЗС-матрицы.

На рис. 9 представлены две проекции многоканальной оптической схемы регистрации.

В этой схеме применена новая методика измерения, основанная на широкоугольной анизотропной дифракции усиленного излучения ИЛ на длине волны 1,053 мкм в акустооптическом фильтре (АОФ) на кристалле парателлурита (TeO₂) [5].

Усиленное излучение направляется на АОФ, где взаимодействует с ультразвуковой волной на частоте 68,5 МГц и в результате дифракции отклоняется на угол 6°. Прямое излучение пространственно разделяется от дифрагированного и поглощается оптической заслонкой.

Тестирование многоканальной системы регистрации усиленного излучения позволило определить предварительные значения коэффициента усиления g_0 . На рис. 10 представлены величины g_0 для среднего сечения АЭ по координате X .

Эксперименты проводились в одном рабочем канале широкоапертурного усилителя с 7 СБУ при зарядном напряжении 24 кВ с предыонизацией газа в лампах накачки. Во всех секциях усилителя были сняты непросветленные защитные стекло-свето-фильтры, чтобы уменьшить потери на френелевские отражения.

Из рисунка видно, что все значения коэффициента усиления укладываются в интервал (0,042 ÷ 0,05) см⁻¹, при этом диапазон наиболее вероятных значений: $g_0 = (0,044 \div 0,048)$ см⁻¹.

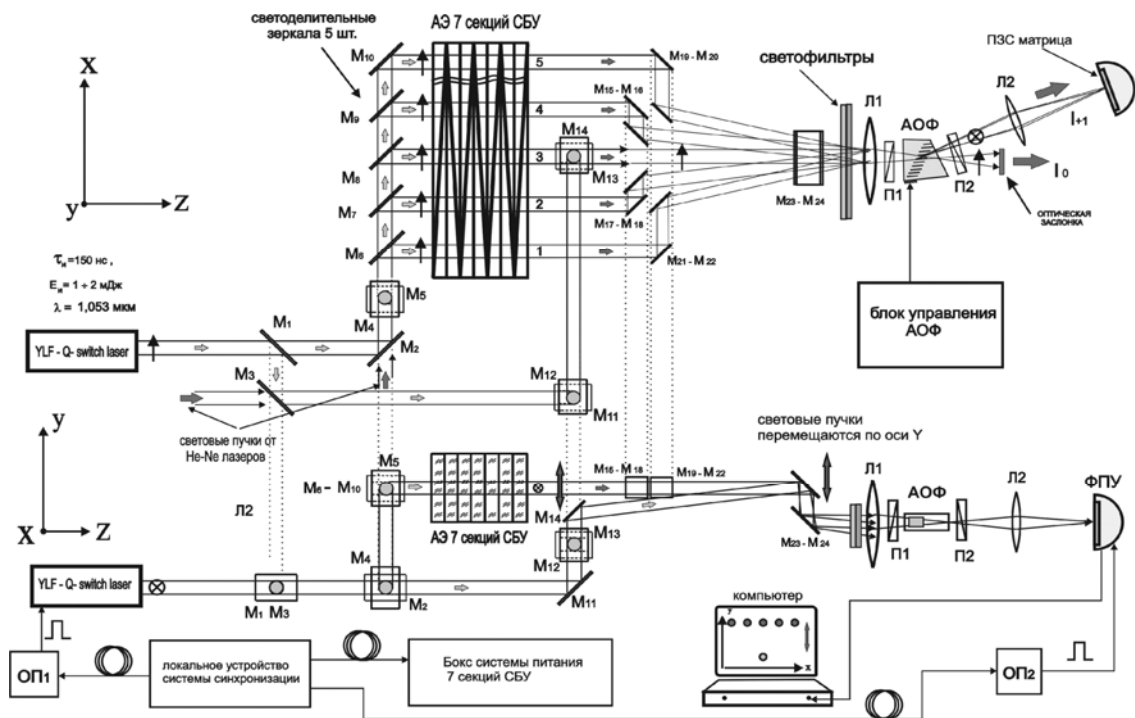


Рис. 9. Многоканальная оптическая схема измерения коэффициента усиления

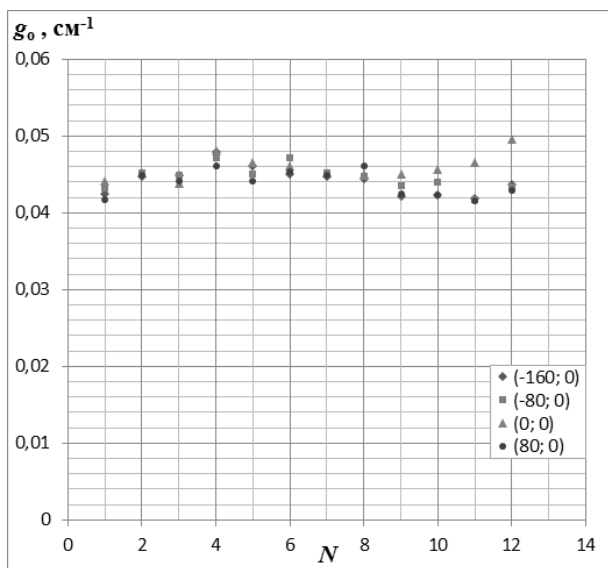


Рис. 10. Коэффициент усиления в различных точках апертуры АЭ

Определение коэффициента усиления одного АЭ

Соединение нескольких СБУ в многокаскадном усилителе ограничивает эффективность сема инверсии в АЭ. При работе всего усилителя соседние АЭ оказывают взаимное влияние, которое состоит в обеднении населенности лазерного уровня одного АЭ из-за люминесценции в другом.

В связи с этим представляют интерес определение g_0 отдельного АЭ в рабочем режиме освещенности.

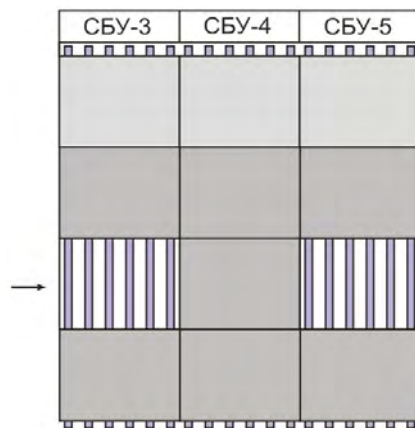


Рис. 11. Компонка усилителя для измерения g_0 одного АЭ

Максимально приближенной к реальным условиям работы АЭ в усилителе является компоновка, показанная на рис. 11, в которой АЭ в секциях 3, 4, 5 установлены как снизу, так и сверху относительно рабочего уровня, на котором проводились измерения. Здесь рабочий АЭ (средний на рис. 2) облучается не только лампами своей секции (СБУ-4), но и светом двух соседних (СБУ-3 и СБУ-5). По такой схеме в усилителе при полной сборке облучаются все АЭ, кроме крайних.

Для повышения уровня усиленного сигнала и точности измерений при работе с одним АЭ использовалась трехпроходная оптическая схема.

На рис. 12 приведены значения коэффициента усиления, вычисленные по результатам экспериментов с применением двух методик измерения сигнала усиленного излучения.

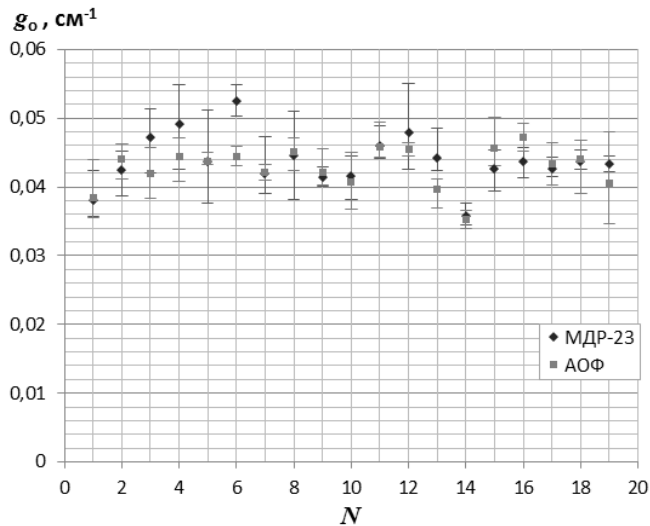


Рис. 12. Коэффициент усиления, определенный двумя методиками измерения

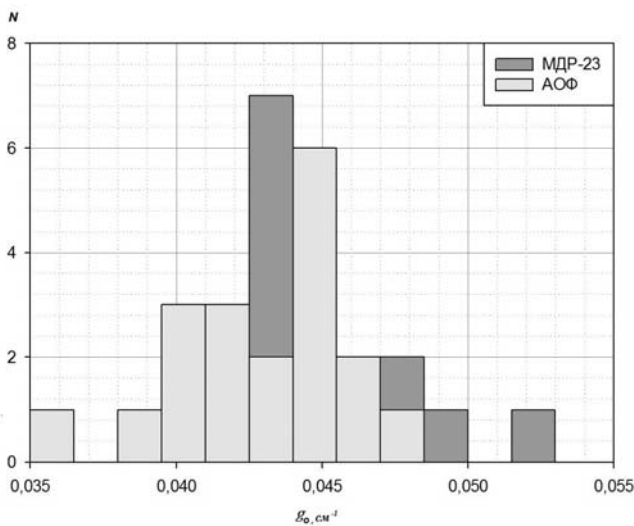


Рис. 13. Гистограммы значений коэффициентов усиления, полученных двумя методиками измерения

Наглядное представление о статистическом разбросе значений коэффициентов усиления, определенных двумя методиками измерения, дает гистограмма, приведенная на рис. 13.

Видно, что среднее значение g_0 находится в интервале $(0,0425 \div 0,045)$.

Проведенные исследования показали, что величина g_0 одиночного АЭ в центре апертуры близ-

ка к g_0 всего усилителя, что указывает на слабую оптическую связь между центральными зонами АЭ, а потери энергии излучения связаны с размерами АЭ и неоднородностью его объемной накачки.

Сравнение результатов измерения коэффициента усиления на усилителях У2 и NIF

Учитывая сходство конструктивных решений усилителя У2 с усилителем установки NIF, представляет интерес сравнение их параметров. В печати имеются данные [6] по удельному коэффициенту усиления так называемого «внутреннего слэба» (АЭ) при его облучении лампами одной средней секции.

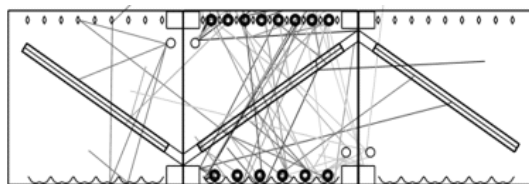


Рис. 14. Освещение АЭ усилителя при работе одной секции

На рис. 14 показан расчетный ход световых лучей в условиях этого эксперимента на установке NIF. Так как условия облученности АЭ в усилителях У2 и NIF близки, то представляется возможным сравнение параметра g_1 , вычисляемого по формуле (1) при $N = 1$. В экспериментах с идентичными условиями на тестируемом усилителе У2 были определены значения g_1 , которые нанесены на график рис. 15. Там же показаны точки, полученные из эксперимента на NIF. Как видно

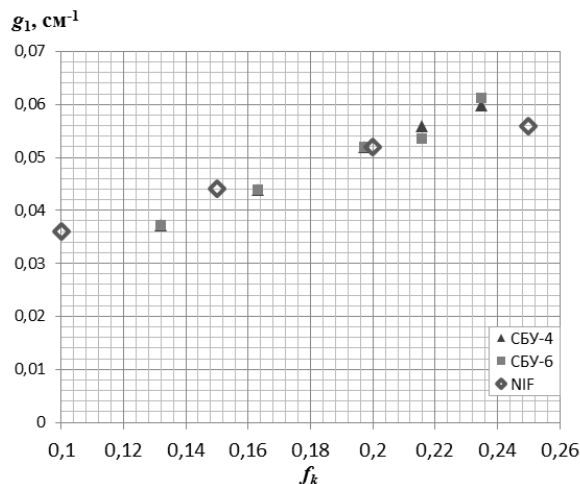


Рис. 15. Зависимость параметра g_1 от коэффициента загрузки для усилителя NIF и секций 4 и 6 усилителя У2

из рисунка, параметры g_1 обоих усилителей совпадают в пределах точности измерений. Отсюда следует вывод, что усилители У2 и NIF при равенстве числа секций должны иметь близкие по значению коэффициенты усиления.

Заключение

Разработаны и реализованы оригинальные методики, основанные на дифракции излучения в АОФ, для измерения коэффициента усиления и его распределения по апертуре активных элементов. В многоканальном варианте оптической схемы в кристалле дифрагируют одновременно 6 лазерных пучков (5 рабочих и 1 – опорный).

Получены распределения коэффициента усиления по апертуре АЭ. Показано, что на краях АЭ коэффициент усиления снижается на $\sim(5-7)\%$.

Получена зависимость коэффициента усиления от запасаемой энергии в СНКЭЭ.

При измерениях двумя методиками (с монохроматором и АОФ) в центральной области АЭ получены близкие значения $g_0 = (0,042 \div 0,044) \text{ см}^{-1}$.

В многоканальном режиме регистрации при отсутствии защитных стекол получены значения коэффициента усиления в диапазоне $g_0 = (0,044 \div 0,048) \text{ см}^{-1}$. Увеличение значений коэффициента усиления объясняется отсутствием потерь на френелевские отражения в защитных стеклах.

Тестирование усилителя показало возможность роста g_0 при увеличении энергии накачки или/и ее распределения по времени. Реализация таких возможностей показана в работе [7]. Другим путем представляется увеличение концентрации ионов Nd^{3+} в фосфатном стекле АЭ.

Испытания показали высокую надежность и большой ресурс усилителя У2, на котором к настоящему времени произведено более 400 импульсов в номинальном режиме.

Список литературы

1. Bel'kov S. A., Garanin S. G. The 15th International conference on Laser Optics «LO-2012», Summaries, St.Petersburg, Russia, June 25–29, 2012, R5-27.

2. Avakyants L. I., Ignatov A. N., Krekhova E. Y. et al. Neodymium-and copper-bearing phosphate glasses for fabricating large rod-shaped and disk-shaped active elements of lasers and heavy-duty high-energy radiation amplifiers // Journal of Optical Technology. 2014, 81 (12). P. 719–722.

3. Воронич И. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Измерение коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с активными элементами из неодимового фосфатного стекла // Квантовая электроника, 33, № 6 (2003). С. 485–488.

4. Головин А. Б., Пешко И. И., Хижняк А. И. Генерация гигантских импульсов с идентичным одночастотным спектром и управляемым интервалом следования лазерами на фосфатном неодимовом стекле // Квантовая Электроника, 18, № 7 (1991). С. 846–851.

5. Колесников А. И., Каплунов И. А., Молчанов В. Я. и др. Перестраиваемый акстооптический фильтр на основе кристаллов парателлурита // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 9. С. 73–77.

6. Rotter M. D., McCracken R., Erlandson A., Guenet M. Gain Measurements on a Prototype NIF/LMJ Amplifier Pump Cavity // UCRL-JC-124518, Preprint, Lawrence Livermore National Laboratory. 1996.

7. Василевский М. А., Водовозов В. М. Энергия в активном элементе лазерного усилителя при его питании от LC генератора или модулятора с трапецеидальной формой импульса // Препринт АО «НИИЭФА» П-605/50, 2018.