

Измерения коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с активными элементами из неодимового фосфатного стекла

И.Н.Воронич, И.В.Галахов, С.Г.Гаранин, В.А.Ерошенко, А.И.Зарецкий, Б.Г.Зималин, И.В.Игнатъев, М.Ю.Кирдяшкин, Г.А.Кириллов, В.А.Осин, Н.Н.Рукавишников, С.А.Сухарев, О.А.Шаров, А.В.Чарухчев

Описана методика измерений и представлены результаты исследований зависимости коэффициента усиления слабого сигнала от энергии накачки с временным разрешением в дисковом усилительном каскаде с активными элементами из неодимового фосфатного стекла установки «Луч». Измерено распределение коэффициента усиления по апертуре усилителя в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: лазер на неодимовом стекле, коэффициент усиления, дисковый активный элемент.

1. Введение

В 90-х годах прошлого века в ряде ведущих лазерных лабораторий было начато создание мощных лазерных систем нового поколения с энергией излучения ~ 2 МДж на третьей гармонике излучения лазера ($\lambda = 351$ нм) с активной средой из неодимового стекла. В США это 192-пучковая установка NIF, разрабатываемая в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса [1], во Франции – 240-пучковая установка LMJ (Лаборатория Комиссариата по атомной энергии, Бордо) [2]. В России во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) разработана концепция 128-пучковой установки «Искра-6» с энергией излучения 300 кДж [3] и начато создание её модуля – 4-пучковой установки «Луч» [4, 5]. Все установки предназначены для проведения экспериментальных исследований в области физики высоких плотностей энергии в фундаментальных и прикладных целях.

Основу данных лазерных систем составляют многопроходные усилители на дисковых элементах (ДЭ) (слэбах) из неодимового фосфатного стекла. Плотность выходной энергии лазерного канала ограничена лучевой прочностью оптических элементов на его выходе и значением B -интеграла [6], которое, по данным американских исследователей, не должно превышать 1.8 [7]. Для установок NIF, LMJ и «Луч» это означает, что средняя плотность выходной энергии ϵ_{out} будет составлять ~ 10 Дж/см² при длительности лазерного импульса в диапазоне ~ 3 –5 нс.

Возможность получения такой плотности во многом обусловлена линейным коэффициентом усиления слабо-

го сигнала g_0 в силовых усилительных каскадах, а также входным сигналом. Значение g_0 определяется эффективностью работы осветителя. Расчёты показывают, что получение средней плотности выходной энергии $\epsilon_{out} \approx 10$ Дж/см² возможно при $g_0 \approx 0.04$ – 0.05 см⁻¹ [3, 4]. На прототипе модуля установки NIF – установке BEAM-LET – получено $g_0 \approx 0.05$ см⁻¹ [8].

В настоящей работе приведены методика и результаты измерений коэффициента усиления слабого сигнала в усилительном модуле установки «Луч».

2. Силовые усилительные каскады установки «Луч»

Основным назначением установки «Луч» является проверка и отработка технических решений, ключевых для проектируемой установки «Искра-6». Схема, иллюстрирующая принцип работы одного канала установки, приведена на рис.1 [4].

Усилительный тракт работает по четырёхпроходной схеме и состоит из двух четырёхканальных (геометрия 2×2) усилительных каскадов У1 и У2, разделённых кю-



Рис.1. Схема установки «Луч» (а) и расчёты выходной энергии и B -интеграла (б).

И.Н.Воронич, И.В.Галахов, С.Г.Гаранин, В.А.Ерошенко, А.И.Зарецкий, Б.Г.Зималин, И.В.Игнатъев, М.Ю.Кирдяшкин, Г.А.Кириллов, В.А.Осин, Н.Н.Рукавишников, С.А.Сухарев, О.А.Шаров. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37; e-mail: rukav@otd 13.vniief.ru
А.В.Чарухчев. НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов, Россия, 188540 Сосновый Бор, Ленинградская обл.

Поступила в редакцию 9 декабря 2002 г.

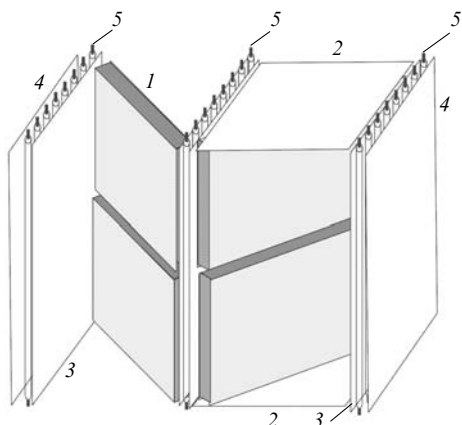


Рис.2. Общий вид силового усилительного модуля: 1 – ДЭ из Nd-фосфатного стекла; 2, 4 – отражатели; 3 – защитное стекло; 5 – лампы накачки.

ветным пространственным фильтром. Ввод излучения в усилительный тракт, возврат излучения для третьего прохода и вывод его после четвертого прохода осуществляются через транспортный пространственный фильтр с реверсером. В фокальной плоскости линз обоих пространственных фильтров расположены диафрагмы с четырьмя отверстиями. Излучение проходит через «свое» отверстие на каждом из четырёх проходов.

Четырёхканальные силовые каскады усиления U1 и U2 выполнены из унифицированных модулей. Общий вид усилительного модуля установки показан на рис.2 [5]. Четыре лазерных ДЭ, изготовленных из неодимового фосфатного стекла марки КГСС0180, находятся в общем герметичном объеме (два ряда по два элемента в каждом ряду). Рабочие поверхности ДЭ расположены вертикально под углом Брюстера к направлению излучения, их накачка осуществляется тремя блоками импульсных ксеноновых ламп – центральным и двумя боковыми. В каждом блоке находится по восемь ламп, расположенных вертикально. Для поглощения жесткого УФ излучения колба лампы выполнена из легированного кварца, лампы отделены от ДЭ защитным стеклом.

При разработке конструкции силовых усилительных каскадов лазера оптимизировались линейные размеры активных элементов и их число в каждом усилителе. Для установки «Луч» сечение лазерного пучка было выбрано равным 200 × 200 мм, соответственно объем дискового активного элемента составил 260 × 490 × 40 мм [3].

Активный элемент по торцам обклеен слоем стекла толщиной 1 см (кладдинг) марки КГСС0180 с добавлением оксида меди с коэффициентом поглощения ~2 см⁻¹ на длине волны λ = 1053 нм, назначение которого – подавление паразитной генерации в объеме активного элемента [9, 10]. Основные характеристики активных элементов представлены ниже.

Концентрация ионов Nd ³⁺	3.3 × 10 ²⁰ см ⁻³
Показатель неактивного поглощения	0.001 см ⁻¹
Нелинейный показатель преломления	1.2 × 10 ⁻¹³ ед. СГСЭ
Коэффициент двулучепреломления	≤ 5 нм/см
Лучевая прочность	≥ 30 Дж/см ² (τ _p = 3 нс)
Клиновидность	≤ 5''
Коэффициент поглощения кладдинга	≥ 2 см ⁻¹

С помощью специально разработанной программы были проведены расчёты четырёхпроходного усиления

импульса заданной временной формы; в программе учитывались насыщение усиления, неоднородное уширение лазерного перехода и релаксация нижнего уровня [3, 4]. Основная цель расчетов заключалась в нахождении оптимальных способов получения на выходе установки выходной энергии ~4 кДж с учётом ограничений по лучевой нагрузке (менее 10 Дж/см² на любом элементе) и по *B*-интегралу (не более 1.8 на любом проходе).

Расчёты, проведенные для разного числа усилительных модулей (U1 = 7, 9, 9, 11 и U2 = 7, 7, 7, 9, 7) при среднем коэффициенте усиления слабого сигнала 0.03 – 0.05 см⁻¹, показали, что оптимальной является конфигурация 9 + 9 ДЭ в канале, поэтому именно она и была реализована (рис.1). Такой подход позволяет получить при входной энергии ~0.3 Дж энергию на выходе одного канала ~4 кДж, для достижения которой необходимо обеспечить коэффициент усиления g₀ ≥ 0.04 см⁻¹ (рис.1,б).

3. Измерения коэффициента усиления слабого сигнала

Коэффициент усиления слабого сигнала неодимового усилителя измерялся при усилении непрерывного излучения юстировочного лазера на рабочей длине волны λ = 1053 нм.

Принципиальная оптическая схема измерения коэффициента усиления представлена на рис.3. Излучение непрерывного тест-лазера 1 (λ = 1053 нм) с мощностью P = 20 – 200 мВт, расходимостью θ ≈ 0.1 мрад и диаметром пучка 15 мм заводилось в усилитель 2 параллельно оптической оси. Пройдя через усилитель, оно при помощи диэлектрических зеркал 4 доводилось до схемы регистрации 7. На выходе усилителя в оптическом тракте устанавливалась диафрагма 3, ограничивающая попадание излучения накачки в схему регистрации. Она также выполняла роль селективирующей диафрагмы для суперлюминесценции, которая могла возникнуть при накачке усилителя. При помощи линзы 8 излучение фокусировалось на фотодиод 11. Светофильтры 9 типа ИКС-1, ФС-6 отсекали паразитное излучение и ослабляли рабочее излучение (λ = 1053 нм) до необходимого уровня. Перед фотодиодом устанавливался диффузный рассеиватель 10 из матированного стекла. Регистрация осуществлялась по схеме с временным разрешением ~30 нс на

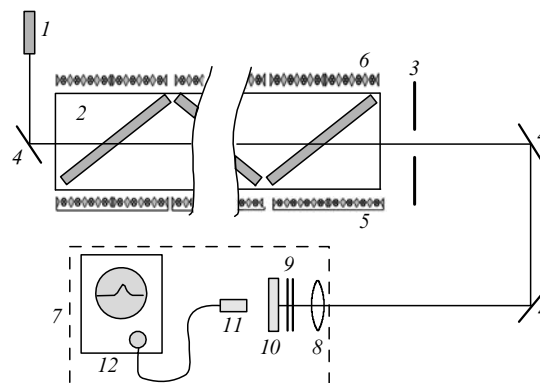


Рис.3. Принципиальная оптическая схема измерения коэффициента усиления: 1 – тест-лазер; 2 – усилитель; 3 – диафрагма; 4 – диэлектрические зеркала; 5, 6 – боковая и центральная ламповые кассеты; 7 – схема регистрации; 8 – линза; 9 – светофильтры; 10 – диффузный рассеиватель; 11 – фотодиод ФД256; 12 – осциллограф ТДС3052В.

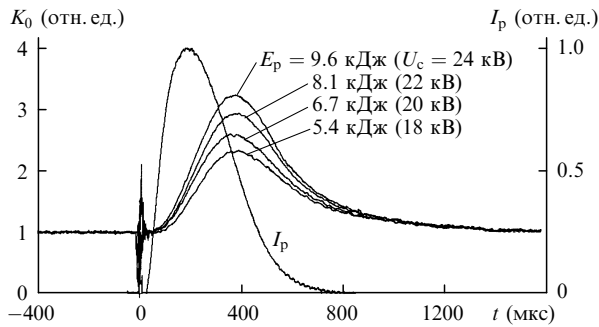


Рис.4. Зависимость коэффициента усиления слабого сигнала K_0 от времени при разных энергиях накачки; I_p – импульс тока накачки.

базе кремниевого фотодиода ФД256 и осциллографа TDS-3052B. Без накачки усилителя сигнал излучения тестового лазера на осциллографе составлял ~ 40 мВ. Путем изменения мощности тестового лазера от 20 до 200 мВт была проверена линейность работы схемы регистрации. При перекрытом излучении тестового лазера и при накачке усилителя в рабочем диапазоне зарядных напряжений накопителя $U_c = 18 - 24$ кВ отклонения луча на осциллографе от нулевой линии не наблюдались.

В экспериментах по измерению коэффициента усиления накачивались семь модулей усилителя. Эффективность передачи электрической энергии батареи лампам накачки составляла $\sim 80\%$. Коэффициент усиления измерялся в зависимости от поперечной координаты (по отношению к боковому и центральному блокам ламп накачки) и от величины зарядного напряжения (энергии, вкачиваемой в одну лампу накачки).

На рис.4 приведены характерные осциллограммы зависимости коэффициента усиления сигнала ($K_0 = U(t) \times U_0^{-1}$, где U_0 – уровень сигнала непрерывного лазера до начала накачки) от времени при разных энергиях накачки для центра ДЭ. Здесь же приведен импульс тока накачки. Максимальное усиление достигается на спаде тока накачки (при $I \sim I_{p\max}/2$), что соответствует ~ 400 мкс от начала тока накачки. При этом с увеличением энергии накачки максимальное усиление немного смещается в сторону максимума тока накачки.

Результаты обработки осциллограмм приведены в табл.1 и 2.

Табл.1. Результаты измерений коэффициента усиления в центре ДЭ при разных энергиях накачки.

Зарядное напряжение (кВ)	Электрическая энергия, введённая в лампу (кДж)	g_0 (см $^{-1}$)
18	5.4	0.026
20	6.7	0.029
22	8.1	0.032
24	9.6	0.036

Табл.2. Результаты измерений коэффициента усиления по апертуре ДЭ при зарядном напряжении 22 кВ ($E_p = 8.1$ кДж).

Расстояние от центра ДЭ (мм)	g_0 (см $^{-1}$)
10	0.033
30	0.032
50	0.032
70	0.033
90	0.032

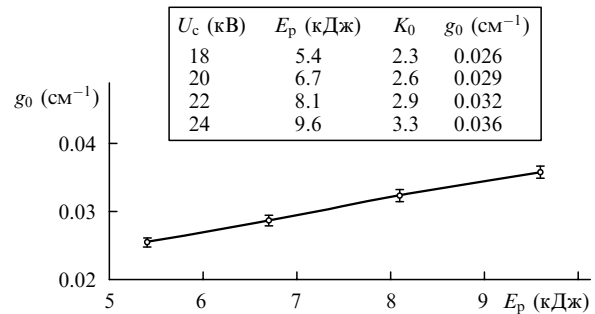


Рис.5. Зависимость линейного коэффициента усиления g_0 для центра ДЭ от электрической энергии, введённой в лампу. Приведенные на врезке данные соответствуют зарядному напряжению, электрической энергии, введённой в лампу, коэффициенту усиления слабого сигнала и линейному коэффициенту усиления.

При вычислении K_0 относительная погрешность компьютерной обработки осциллограмм $\Delta K_0/K_0$ составляет $\sim 2\%$. Относительная погрешность определения линейного коэффициента усиления g_0 в центре ДЭ есть $\Delta g_0/g_0 = \Delta K_0/(K_0 \ln K_0) \approx 2.5\%$.

На рис.5 представлена зависимость коэффициента усиления g_0 от E_p – электрической энергии, введённой в лампу. В диапазоне рабочих энергий накачки 5.4–9.6 кДж наблюдается линейная зависимость $g_0(E_p)$, и максимальный коэффициент усиления составляет 0.036 см $^{-1}$. Линейная зависимость $g_0(E_p)$ позволяет в дальнейшем ожидать увеличения g_0 до 0.04–0.045 см $^{-1}$ при повышении эффективности системы накачки за счет оптимизации конструкции осветителя и изготовления отражателей из материала с большим коэффициентом отражения в полосе накачки неодимового фосфатного стекла.

Были выполнены измерения коэффициента усиления по сечению по горизонтальной координате в пяти «точках» от центра ДЭ до края с шагом $\Delta = 20$ мм при введённой в лампу энергии 8.1 кДж ($U_c = 22$ кВ, фактор загрузки $\eta = E_p/E_{p\lim} = 0.22$).

Распределение коэффициента усиления g_0 по сечению ДЭ представлено на рис. 6. Видно, что с точностью до погрешности измерения ($\pm 2.5\%$) коэффициент усиления по сечению имеет постоянное значение в рабочей апертуре усилительного модуля и составляет ~ 0.032 см $^{-1}$ (при $U_c = 22$ кВ).

4. Заключение

Таким образом, коэффициент усиления g_0 был измерен в семи усилительных модулях установки «Луч» при

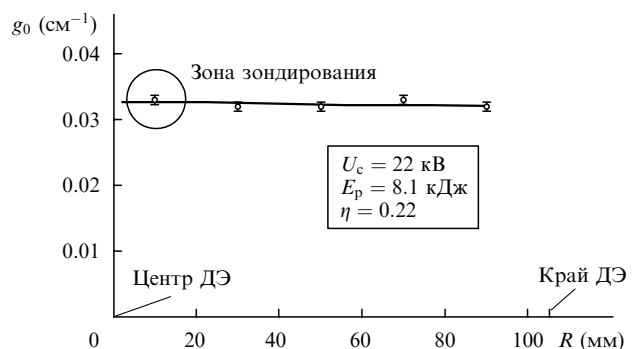


Рис.6. Распределение линейного коэффициента усиления g_0 по сечению ДЭ от центра до края; R – координата зоны зондирования.

различных значениях вкладываемой в лампу электрической энергии накачки E_p и в разных точках световой апертуры. Измерения зависимости K_0 от времени проводились на $\lambda = 1053$ нм с помощью непрерывного тест-лазера.

Максимальное значение g_0 достигалось примерно через 400 мкс после начала накачки и составляло ~ 0.036 см⁻¹ при $E_p = 9.6$ кДж ($U_c = 24$ кВ, $\eta = E_p/E_{p\text{lim}} = 0.26$). При линейной зависимости коэффициента усиления от электрической энергии, введенной в лампу, есть основания для реализации более высоких значений g_0 ($\sim 0.04 - 0.045$ см⁻¹) за счет увеличения эффективности накачки в цепочке лампы – отражатели – ДЭ.

Распределение коэффициента усиления g_0 по апертуре усилителя (по сечению ДЭ) измерено в горизонтальной плоскости – от её центра до края ($U_c = 22$ кВ, $E_p = 8.1$ кДж). Коэффициент усиления по сечению с точностью до погрешности измерения имеет постоянное значение в рабочей апертуре усилительного модуля.

1. LLNL. *ICF Quarterly Report. Special Issue: National Ignition Facility* (Virginia: Springfield, 1997, v.7, No. 3).
2. Andre M.L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3047**, 38 (1997).
3. Galakhov I.V., Garanin S.G., Eroshenko V.A., Kirillov G.A., Kochemasov G.G., Murugov V.M., Rukavishnikov N.N., Sukharev S.A. *Fusion Eng. Design*, **44**, 51 (1999).
4. Sukharev S.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3492**, 12 (1999).
5. Безнасюк Н.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г. и др. В сб. *IV Харитоновские тематические научные чтения* (РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2002, с. 82).
6. Wegner P., Burkhardt S., Murray J., Van Wouterghem B., Widmayer C. *LLNL. ICF Quarterly Report* (Virginia: Springfield, 1995, v. 9, No. 1, p. 43).
7. Vann C.S., Laniesse F., Patton H.G., et al. *LLNL. ICF Quarterly Report* (Virginia: Springfield, 1995, v. 5, No. 2, p. 142).
8. Арбузов В.И., Вахмянин К.П., Волынкин В.М. и др. *Оптич. ж.*, **69** (1), 16 (2001).
9. Вейнберг Т.И. *Труды ГОИ*, **31** (160), 24 (1963).
10. Арбузов В.И., Волынкин В.М., Лунгер С.Г. и др. В сб. *IV Харитоновские тематические научные чтения* (РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2002, с. 59).