

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ УСТАНОВКИ «ЛУЧ» С АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ НЕОДИМОВОГО ФОСФАТНОГО СТЕКЛА КНФС И ОТРАЖАТЕЛЯМИ ИЗ ФОЛЬГИ MIRO SILVER

*И. А. Белов, С. А. Бельков, И. Н. Воронич, С. Г. Гаранин, В. Н. Деркач, С. В. Кошечкин,  
М. И. Лысов, С. С. Марков, С. В. Савкин*

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

## 1. Введение

В 2013 году на установке «Луч» [1–2] были проведены работы по модернизации усилителей, которые включали в себя замену защитных стекол усилителей из материала ФЛОАТ на стекла марки К-8 с просветляющим покрытием, замену плоских отражателей из фольги MIRO на отражатели, выполненные из фольги MIRO Silver [3]. Измерения коэффициента усиления [4], выполненные по окончании данных работ, показали, что модернизация элементов усилителя позволила заметно повысить величину запасенной энергии активной среды усилителей: увеличение линейного коэффициента усиления составило от 6,4 % до 7,0 % [4]. В результате достигнутого роста запасенной энергии, в полномасштабных экспериментах на установке «Луч» удалось реализовать получение прежнего уровня коэффициента усиления силового усилителя при сниженном факторе загрузки ламп накачки  $f_x = 0,2$  (зарядное напряжение на накопителе  $U_{\text{зар}} = 20$  кВ) вместо 0,25 ( $U_{\text{зар}} = 22$  кВ) [4].

В продолжение работы [4], в 2015 году на установке «Луч» в ходе плановой переборки усилителей проведено дооснащение канала 1 (нижнего) усилителей У1 и У2 активными элементами из стекла марки КНФС (КНФС-1 и КНФС-3). Канал 2 (верхний) обоих усилителей был переоснащен активными элементами из стекла КГСС-0180/35 из числа использовавшихся ранее. Всего в канале 1 и канале 2 усилителей были установлены 8 шт. активных элементов из стекла КНФС-1, 8 шт. – из стекла КНФС-3, и 20 шт. – из стекла КГСС-0180/35. При установке активных элементов в усилители руководствовались следующими принципами. Во-первых, в канал 1 устанавливались активные элементы из нового стекла КНФС-1 и КНФС-3. Во-вторых, среди слэбов, отобранных для каналов 1 и 2, элементы с лучшими оптическими характеристиками устанавливались в усилитель У1, где плотность энергии лазерного излучения максимальна; остальные – в усилитель У2.

В результате перекомпоновки активных элементов, активная среда в канале 1 усилителя У1 была сформирована из активных элементов из стекла марки КНФС, преимущественно КНФС-3 (7 шт. – КНФС-3 и 2 шт. – КНФС-1). Активную среду в канале 1 усилителя У2 составили 6 активных элементов из стекла КНФС-1, один – из стекла КНФС-3 и два из стекла КГСС-0180/35. В канале 2 усилителей У1 и У2 были установлены активные элементы, выполненные из стекла марки КГСС-0180/35.

Помимо дооснащения усилителей установки активными элементами из стекла марки КНФС, в ходе переборки усилителей проведена полная замена ромбических отражателей ламповых каскадов, выполненных из фольги MIRO, на ромбические отражатели из фольги MIRO Silver [3].

После перекомпоновки активных элементов и замены ромбических отражателей, проведены экспериментальные исследования коэффициента усиления активной среды усилителей установки, результатам которых посвящена данная работа.

## 2. Постановка экспериментов по измерению коэффициента усиления

Измерения коэффициента усиления проводились при усилении излучения штатного юстировочного лазера в канале 1 (нижнем) и канале 2 (верхнем) усилителя У1, в канале 1 усилителя У2 установки «Луч». При измерении использовались девять активных элементов. Схема проведения экспериментов в усилителях У1 и У2 аналогична использованной ранее и описанной в работах [2, 4–6]. Принципиальная схема измерения коэффициента усиления в усилителе У1 представлена на рис. 1.

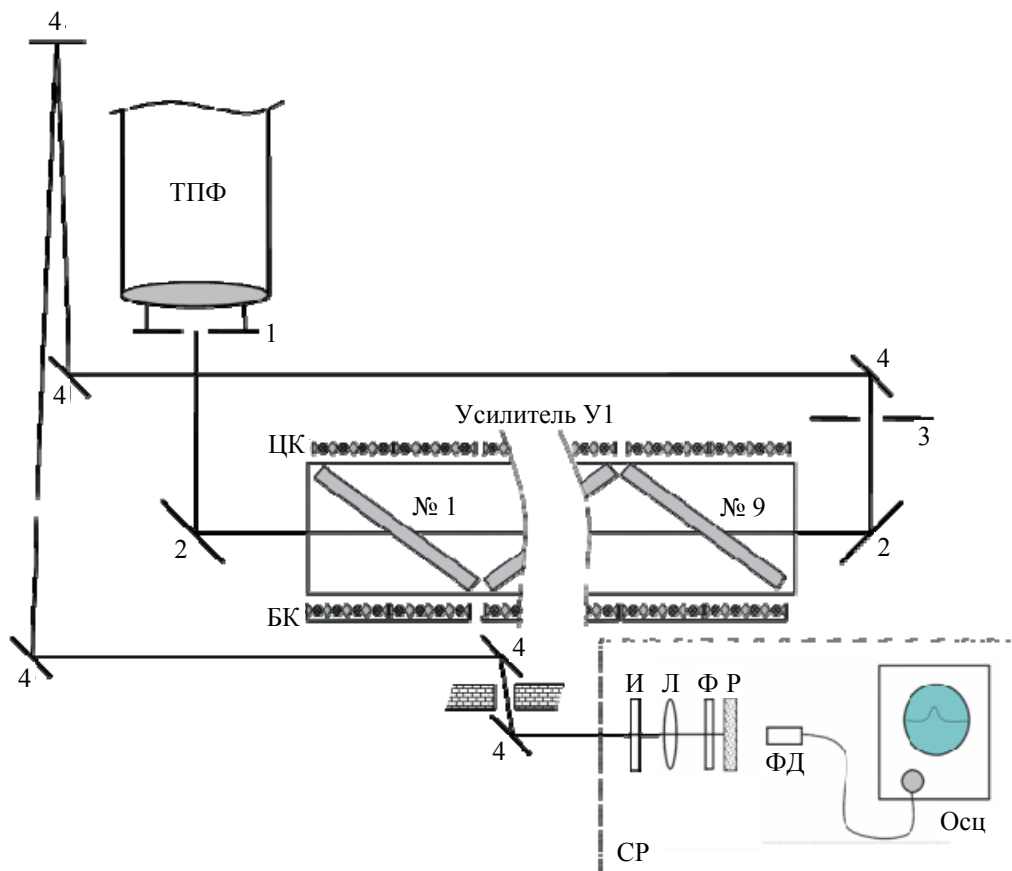


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1: 1 – апертурная диафрагма, 2 – штатные поворотные зеркала, 3 – зондирующая диафрагма, 4 – диэлектрические зеркала, БК и ЦК – боковая и центральная ламповые кассеты, СР – схема регистрации, И – интерференционный фильтр, Л – линза, Ф – светофильтр, Р – диффузный рассеиватель, ФД – фотодиод ФД256, Осц – осциллограф TDS-3052B

Излучение штатного юстировочного лазера с длиной волны  $\lambda = 1053$  нм и размером пучка  $\approx 205 \times 205$  мм<sup>2</sup> заводилось в усилитель. На выходе усилителя в оптическом тракте устанавливалась диафрагма (3) диаметром  $\varnothing = 15$  мм, выделявшая область зондирования на апертуре усилителя. Она также ограничивала попадание излучения накачки в схему регистрации и выполняла роль селективирующей диафрагмы. Пройдя через диафрагму (3), пучок диаметром  $\varnothing = 15$  мм и мощностью  $P \approx 1$  мВт (что соответствовало сигналу на осциллографе  $U \approx 20$  мВ) при помощи диэлектрических зеркал (4) доводился до схемы регистрации (СР), находившейся в отдельной от зала установки комнате (в пультовой СФОИ). На входе усилителя, соосно с диафрагмой (3), располагалась апертурная диафрагма (1) диаметром  $\varnothing = 20$  мм. В схеме регистрации, излучение при помощи линзы (Л) фокусировалось на фотодиод (ФД). Перед линзой располагался интерференционный фильтр (И) ( $\lambda = 1,053$  мкм,  $\Delta\lambda_{0,5} = 0,05$  мкм), который обеспечивал отсечение паразитного излучения. Светофильтр ИКС-7 (Ф) ослаблял рабочее излучение до необходимого уровня. Перед фотодиодом устанавли-

ливался диффузный рассеиватель (Р) из матированного стекла. Элементы схемы регистрации были закрыты от внешней засветки непрозрачным тубусом. Регистрация осуществлялась по схеме с временным разрешением  $\sim 30$  нс на базе кремниевого фотодиода ФД256 и осциллографа TDS-3052В.

Измерения коэффициента усиления проводились в зависимости от величины накачки при зарядных напряжениях на накопителе 18, 20, 22 и 24 кВ в центральной точке апертуры в каналах 1 и 2 усилителя У1, в канале 1 усилителя У2. За центральную точку апертуры усилителя был принят центр 5-го активного элемента. При проведении измерений на усилителе У1 осуществлялась накачка активных элементов только У1, при измерениях на У2 – только активных элементов усилителя У2.

На рис. 2 представлена характерная осциллограмма формы импульса усиленного излучения юстировочного лазера  $U(t)$ , зарегистрированного в ходе экспериментов, и осциллограмма «нулевого» сигнала  $U_0(t)$ , записанная за минуту до опыта при перекрытом излучении юстировочного лазера и в отсутствии накачки.

В процессе обработки, форму импульса усиленного сигнала  $U'(t)$  получали, вычитая

$$U'(t) = U(t) - U_0(t). \quad (1)$$

Для получения зависимости коэффициента усиления от времени  $K(t)$ , в распределении  $U'(t)$  выделяли участок до момента начала накачки, по среднему значению которого определяли уровень опорного сигнала  $U_{\text{опорн}}$ . Временная зависимость коэффициента усиления представлена на рис. 3 и рассчитана по формуле:

$$K(t) = \frac{U'(t)}{U_{\text{опорн}}}. \quad (2)$$

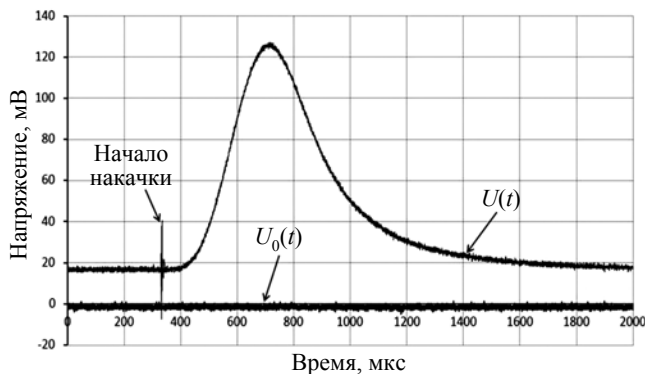


Рис. 2. Характерная осциллограмма временной формы импульса усиленного излучения юстировочного лазера  $U(t)$ , и «нулевой» сигнал на осциллографе  $U_0(t)$

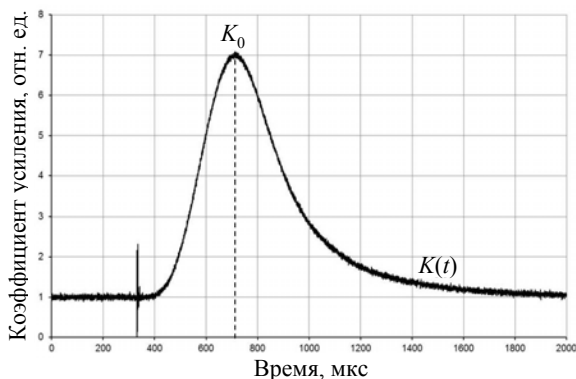


Рис. 3. Распределение коэффициента усиления по времени

Значение коэффициента усиления слабого сигнала  $K_0$  соответствует максимуму распределения  $K(t)$ , и достигается через  $\approx 370$  мкс после начала накачки (что примерно соответствует времени прихода моноимпульса в полномасштабных экспериментах). Погрешность определения  $K_0$  составляла  $\pm 5\%$ . Коэффициент усиления слабого сигнала  $g_0$  вычислялся по формуле:

$$g_0 = \frac{1}{L} \ln(K_0), \quad (3)$$

где  $L = 43,2$  см – длина активной среды (9 слэбов под углом Брюстера). Относительная погрешность определения линейного коэффициента усиления  $g_0$  оценивалась по формуле:

$$\frac{\Delta g_0}{g_0} = \frac{\Delta K_0}{K_0 \ln(K_0)} \approx \pm 2,5\%. \quad (4)$$

### 3. Экспериментальные исследования коэффициента усиления

Проведены измерения коэффициента усиления после переборки усилителей в канале 1 усилителя У1, содержащего активные элементы из стекла КНФС, при зарядных напряжениях на накопители  $U_{зар} = 18, 20, 22$  и  $24$  кВ.

На рис. 4 приведены полученные в канале 1 усилителя У1 зависимости коэффициента усиления сигнала от времени при зарядных напряжениях на накопителе  $U_{зар} = 18, 20, 22$  и  $24$  кВ. Для иллюстрации, на рис. 5 показаны характерный импульс тока накачки, осциллограмма светового импульса накачки, зарегистрированная в одном из опытов в красной области спектра (за фильтром КС-13), и зависимость коэффициента усиления от времени.

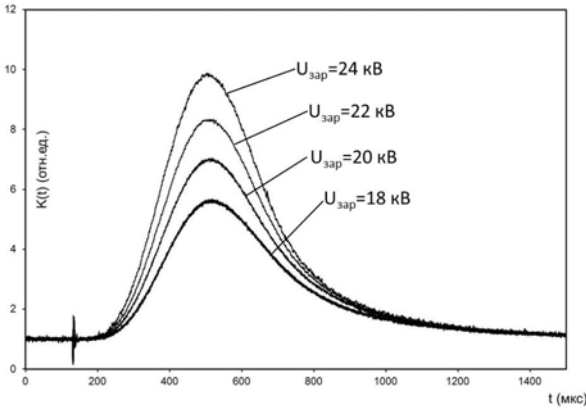


Рис. 4. Зависимости коэффициента усиления от времени при различных зарядных напряжениях на накопителе

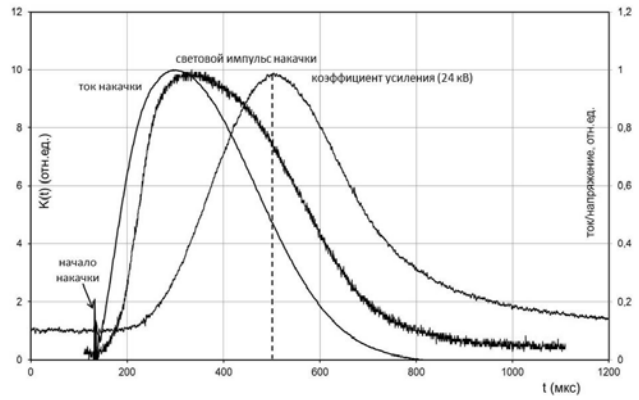


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от времени, осциллограмма светового импульса ( $\lambda \geq 600$  нм) и ток накачки

Результаты измерений коэффициента усиления в центральной точке в канале 1 усилителя У1 представлены в табл. 1. В табл. 1 приведены задаваемые зарядные напряжения на накопителе, электрическая энергия, введенная в лампу накачки, измеренные значения коэффициентов усиления слабого сигнала  $K_0$ , и вычисленные по ним значения линейного коэффициента усиления  $g_0$ . Электрическая энергия, введенная в лампу, рассчитывалась как:

$$E_{л} = \frac{T}{N} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\left( \sum_{j=1}^m C_{ji} \right) U_i^2}{2} \right], \quad (5)$$

где  $N = 144$  – количество ламп накачки в девяти модулях усилителя,  $n = 9$  – количество модулей усилителя,  $m = 4$  – количество конденсаторов, питающих лампы накачки одного модуля,  $C$  – емкость конденсатора, питающего цепочку из четырех последовательно соединенных ламп (паспортное значение),  $U$  – зарядное напряжение на батарее в момент пуска ламп,  $T \approx 0,8$  [6] – коэффициент передачи электрической энергии от батареи лампам.

Таблица 1

*Результаты измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 после дооснащения стеклом КНФС и замены ромбических отражателей*

$U_{зар}$ , кВ	18	20	22	24
$E_{л}$ , кДж	5,4	6,6	8,0	9,5
$K_0$	5,65±0,28	7,07±0,35	8,30±0,42	9,72±0,49
$g_0 \cdot 10^2$ , см <sup>-1</sup>	3,99±0,10	4,52±0,11	4,90±0,12	5,29±0,13

На рис. 6 представлены значения коэффициента усиления и зависимости коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 от электрической энергии, введенной в лампу накачки: полученных после переборки усилителей, и полученных в 2013 году после замены защитных стекол [4].

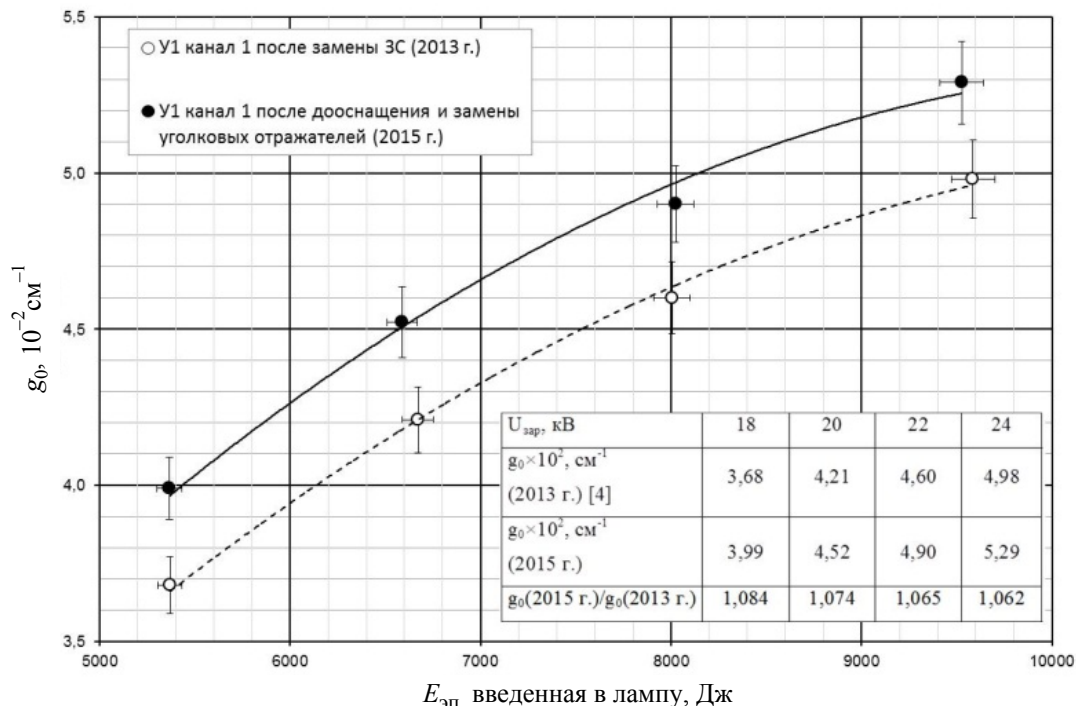


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления в центральной точке апертуры канала 1 усилителя У1 до и после дооснащения усилителей слэбами из стекла КНФС и замены ромбических отражателей

Как видно из рис. 6, в результате дооснащения канала 1 установки активными элементами из стекла КНФС и замены ромбических отражателей в ламповых кассетах, в канале 1 усилителя У1 достигнуто заметное увеличение линейного коэффициента усиления (запасенной энергии). Приращение величины  $g_0$  составило от  $\approx 6,2\%$  до  $\approx 8,4\%$  в зависимости от энергии, введенной в лампу,  $E_{эл}$  от  $\approx 5,4$  кДж до  $\approx 9,6$  кДж (зарядное напряжение от 18 до 24 кВ). Такое значительное приращение величины коэффициента усиления непонятно, так как технические требования на материал активных элементов марок КГСС-0180/35 и КНФС идентичны, а ожидаемое же увеличение потока излучения накачки при замене ромбических отражателей из фольги MIRO на MIRO Silver не превышает 3% (коэффициенты отражения фольг 95% и 98% [3]).

Поэтому было решено провести более тщательные исследования коэффициента усиления, которые позволили бы напрямую сравнить значения коэффициента усиления, получаемые на активных элементах из стекла КНФС и КГСС-0180/35, исключив влияние материала ромбических отражателей.

**3.1. Исследования коэффициента усиления активной среды, основанной на разных типах лазерного стекла.** Чтобы исключить влияние материала ромбических отражателей на приращение величины  $g_0$ , проведены измерения коэффициента усиления в канале 2 усилителя У1 с активными элементами из стекла КГСС-0180/35 и измерения<sup>1</sup> в канале 1 усилителя У1, содержащем активные элементы из стекла КНФС.

<sup>1</sup> Между измерениями коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1, описанными в пункте 3, и измерениями в канале 2 усилителя У1, на установке была проведена серия из 22 облучательных экспериментов. Поэтому, для корректного сравнения результатов, измерения в канале 1 усилителя У1 были выполнены повторно непосредственно после измерений в канале 2 усилителя У1.

Известно [4], что значения коэффициентов усиления в каналах 1 и 2 усилителя У1 до замены ромбических отражателей и перекомпоновки активных элементов были близки (совпадали в пределах погрешности измерений и обработки экспериментальных данных). Очевидно, что в обоих каналах усилителя У1 реализуются одинаковые условия накачки.

Результаты измерения коэффициента усиления в канале 2 усилителя У1 и в канале 1 усилителя У1 при одинаковых условиях накачки приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

*Результаты измерения коэффициента усиления в канале 2 усилителя У1 после перекомпоновки активных элементов и замены ромбических отражателей*

$U_{\text{зар}}$ , кВ	18	20	22	24
$E_{\text{л}}$ , кДж	5,4	6,6	8,0	9,5
$K_0$	$4,99 \pm 0,25$	$6,02 \pm 0,30$	$7,31 \pm 0,37$	$8,44 \pm 0,42$
$g_0 \cdot 10^2$ , $\text{см}^{-1}$	$3,72 \pm 0,09$	$4,15 \pm 0,10$	$4,61 \pm 0,12$	$4,94 \pm 0,12$

Таблица 3

*Результаты измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 после перекомпоновки активных элементов и замены ромбических отражателей*

$U_{\text{зар}}$ , кВ	18	20	24
$E_{\text{л}}$ , кДж	5,4	6,6	9,5
$K_0$	$5,59 \pm 0,28$	$6,84 \pm 0,34$	$9,41 \pm 0,47$
$g_0 \cdot 10^2$ , $\text{см}^{-1}$	$3,98 \pm 0,10$	$4,45 \pm 0,11$	$5,19 \pm 0,13$

На рис. 7 представлены результаты измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 со стеклом КНФС и в канале 2 усилителя У1 со стеклом КГСС-0180/35 в зависимости от электрической энергии, введенной в лампу накачки.

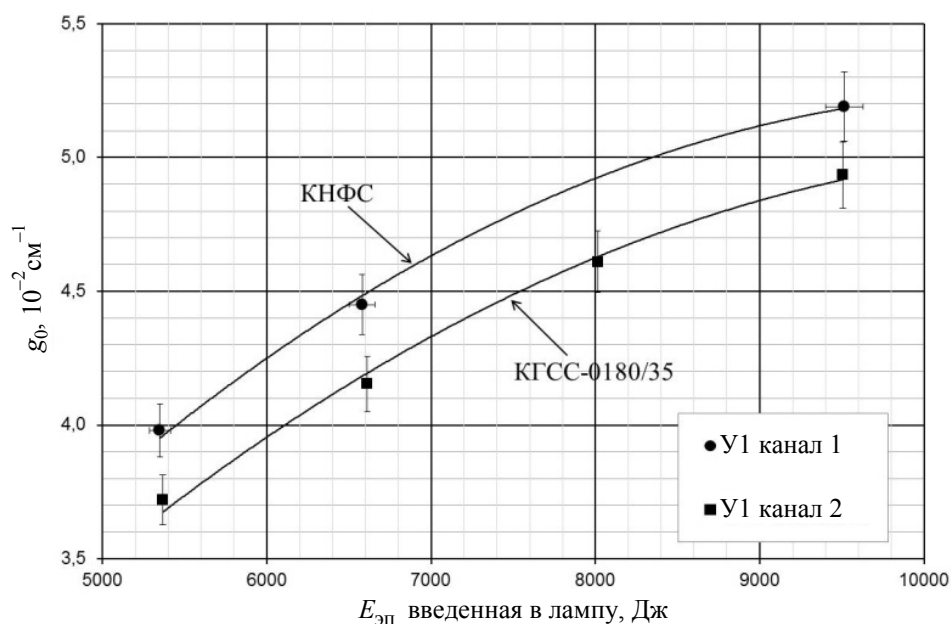


Рис. 7. Зависимости коэффициента усиления от энергии введенной в лампу в канале 1 У1 на стекле КНФС и канале 2 У1 на стекле КГСС-0180/35

Как видно из рис. 7, значения  $g_0$ , полученные в канале 2 усилителя У1, с активной средой из базы слэбов из стекла КГСС-0180/35, в диапазоне зарядных напряжений от 18 до 24 кВ ( $E_{л}$  от  $\approx 5,4$  кДж до  $\approx 9,6$  кДж) составили от  $\approx 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  до  $\approx 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ . В канале 1 усилителя У1 с активными элементами из стекла КНФС (преимущественно, КНФС-3), при тех же условиях накачки значения коэффициента усиления оказались выше и составили от  $\approx 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  до  $\approx 5,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, величина линейного коэффициента усиления в канале усилителя с активными элементами из стекла КНФС выше, чем в канале с активными элементами из стекла КГСС-0180/35 на  $\approx 7\%$ .

Представляет интерес величина коэффициента усиления в канале 1 усилителя У2, содержащим активные элементы из стекла марок как КНФС-1 и КНФС-3, так и КГСС-0180/35.

Проведены измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У2, содержащем активные элементы как из стекла КНФС, так и КГСС-0180/35. Результаты представлены в табл. 4 и на рис. 8.

Таблица 4

Результаты измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У2

$U_{зар}, \text{ кВ}$	18	20	22	24
$E_{л}, \text{ кДж}$	5,4	6,6	8,0	9,5
$K_0$	$5,29 \pm 0,26$	$6,49 \pm 0,32$	$7,84 \pm 0,39$	$9,01 \pm 0,45$
$g_0 \cdot 10^2, \text{ см}^{-1}$	$3,86 \pm 0,10$	$4,33 \pm 0,11$	$4,77 \pm 0,12$	$5,09 \pm 0,13$

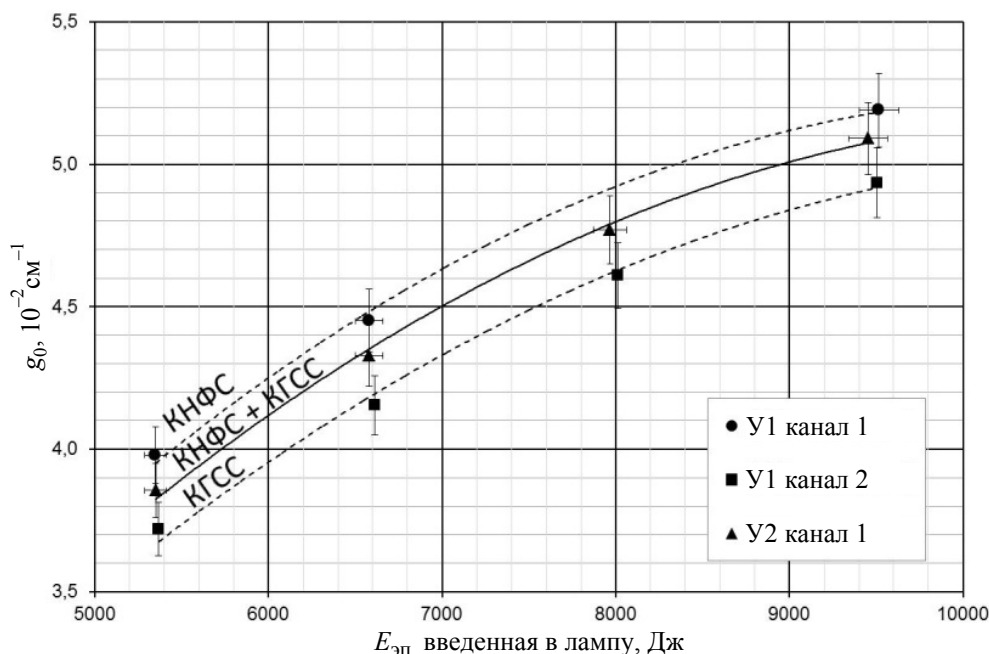


Рис. 8. Зависимость линейного коэффициента усиления от энергии, введенной в лампу накачки, в каналах 1, 2 усилителя У1 и в канале 1 усилителя У2

Зависимость коэффициента усиления от электрической энергии, введенной в лампу накачки, полученная в канале 1 усилителя У2, содержащим активные элементы из стекла марок КНФС и КГСС-0180/35, изображена на графике на рис. 8 в виде сплошной кривой. Штриховыми кривыми на графике показаны зависимости, полученные в канале 1 усилителя У1 со стеклом КНФС и в канале 2 усилителя У1 со стеклом КГСС-0180/35.

Как видно из рис. 8, величины  $g_0$ , полученные в канале 1 усилителя У2 содержащем слэбы как из стекла КНФС, так и КГСС-0180/35, ожидаемо принимают промежуточные значения между результатами для каналов со стеклом КНФС и со стеклом КГСС.

Рассмотрим, например, значения коэффициента усиления во всех трех вариантах при энергии, введенной в лампу,  $E_{\text{л}} \approx 8,3$  кДж. Из рисунка 8 видно, что при  $E_{\text{л}} \approx 8,3$  кДж величина коэффициента усиления на стекле КНФС составляет  $\approx 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ , на стекле КГСС-0180/35 –  $\approx 4,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ . Тогда величину коэффициента усиления для канала 1 усилителя У2, содержащего 7 слэбов из стекла КНФС и 2 слэба из стекла КГСС-0180/35, можно оценить как:

$$g_0(\text{КНФС} + \text{КГСС}) = \frac{7}{9}g_0(\text{КНФС}) + \frac{2}{9}g_0(\text{КГСС}) \approx 4,93 \cdot 10^{-2} \text{ (см}^{-1}\text{)}. \quad (6)$$

Однако, из графика на рис. 8 видно, что значение  $g_0$  в канале 1 усилителя У2 со смешанной конфигурацией лазерного стекла оказывается меньше и составляет  $\approx 4,87 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ . Отсюда можно предположить, что характерная величина коэффициента усиления для стекол КНФС-1 и КНФС-3 является различной, причем она выше для КНФС-3 (т.к. в канале 1 У1 из девяти слэбов КНФС – 7 шт. КНФС-3, а в канале 1 У2 – из семи слэбов КНФС только 1 шт. КНФС-3). Тогда, для трех представленных на рис. 8 кривых, при  $E_{\text{л}} = 8,3$  кДж запишем:

$$\frac{1}{9} \cdot \left( 2g_0^{(\text{КНФС-1})} + 7g_0^{(\text{КНФС-3})} \right) = 5, \quad (7)$$

$$\frac{1}{9} \cdot \left( 6g_0^{(\text{КНФС-1})} + g_0^{(\text{КНФС-3})} + 2g_0^{(\text{КГСС})} \right) = 4,87, \quad (8)$$

$$\frac{1}{9} \cdot \left( 9g_0^{(\text{КГСС})} \right) = 4,7. \quad (9)$$

Из уравнения (9) получаем, что при  $E_{\text{л}} = 8,3$  кДж характерная величина коэффициента усиления для стекла КГСС-0180/35 должна составлять  $4,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ . Из уравнений (7) и (8) следует, что  $g_0 \approx 4,895 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  для стекла КНФС-1 и  $\approx 5,029 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  для КНФС-3. Таким образом, оцененное значение коэффициента усиления на стекле КНФС-3 при  $E_{\text{л}} = 8,3$  кДж оказывается на  $\approx 2,7$  % выше, чем на КНФС-1.

**3.2. Исследования величины коэффициента усиления силового усилителя в полномасштабных экспериментах.** Измерения коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1, проведенные непосредственно по окончании переборки усилителей (табл. 1) и повторенные после полномасштабных экспериментов (табл. 3), показали снижение значений  $g_0$  после серии облучательных экспериментов на величину  $\leq 2$  %, что не превышает погрешности измерений и обработки результатов. Однако, это незначительное снижение величины коэффициента усиления может быть вызвано деградацией поверхности активных элементов под действием излучения накачки в ходе 22 срабатываний ламп в полномасштабных экспериментах.

При штатном зарядном напряжении 20 кВ величина коэффициента усиления в канале 1 усилителя У1 в измерениях, проведенных непосредственно после переборки усилителей составила  $g_0 = 4,52 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ . Отношение величин  $g_0$  в канале 1 усилителей У1 и У2, измеренных после серии облучательных опытов, равно  $4,45/4,33 \approx 1,028$  (смотри табл. 3 и 4). Значение коэффициента усиления в канале 1 усилителя У2 на момент непосредственно после переборки усилителей можно оценить как:  $g_0 = 4,52 \cdot 10^{-2} / 1,028 \approx 4,40 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ .



Величину усиления силового усилителя в полномасштабных экспериментах удобно характеризовать коэффициентом усиления за два прохода  $K_{12}$ , равным отношению энергии на входе реверсора к энергии на входе лазерного канала:

$$K_{12} = \frac{E_{\text{PCB}}}{E_{\text{ВХ}}}. \quad (10)$$

На первых двух проходах силового усилителя усиление лазерного излучения происходит в линейном режиме, поэтому:

$$K_{12} = K_{Y1}^2 \times K_{Y2}^2 \times T, \quad (11)$$

где  $K_{Y1} = \exp(g_{0Y1} \cdot l)$  и  $K_{Y2} = \exp(g_{0Y2} \cdot l)$  – коэффициенты усиления слабого сигнала на усилителях  $Y1$  и  $Y2$ ,  $T$  – пропускание тракта за 2 прохода.

Согласно результатам измерений, выполненных в 2013 году, значение коэффициента усиления до перекомпоновки активных элементов, дооснащения усилителей и замены ромбических отражателей в канале 1 усилителя  $Y1$  составляло  $g_0 \approx 4,21 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  и примерно совпадало с величиной  $g_0$  в канале 1 усилителя  $Y2$  [4]. Тогда, согласно (11), коэффициент  $K_{12}$  в результате роста значений линейных коэффициентов усиления, достигнутых при замене активных элементов и ромбических отражателей, должен увеличиться в  $\approx 1,54$  раза.

На графике на рис. 9 показана зависимость коэффициента усиления силового усилителя  $K_{12}$  в канале 1 от номера опыта в полномасштабных экспериментах с зарядным напряжением на накопителе 20 кВ. Белыми кружочками на графике показаны значения  $K_{12}$  в опытах до перекомпоновки и дооснащения активными элементами, черными – после установки активных элементов из стекла КНФС и замены ромбических отражателей. Крестиками нанесены значения  $K_{12}$  до перекомпоновки, помноженные на коэффициент 1,54.

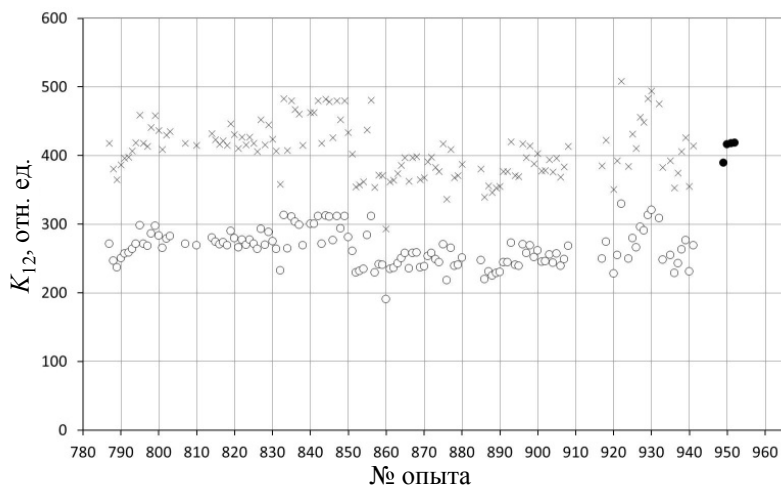


Рис. 9. Зависимость коэффициента усиления силового усилителя за два прохода от номера опыта в канале 1 установки

Как видно из рис. 9, значения  $K_{12}$  до перекомпоновки, увеличенные с учетом полученного роста величины  $g_0$  в 1,54 раза, примерно совпадают с результатами, наблюдаемыми в первых экспериментах после переборки усилителей. Среднее значение  $K_{12}$  составляет  $\approx 415$ . Таким образом, наблюдаемые значения коэффициента усиления силового усилителя в полномасштабных экспериментах согласуются с результатами измерения коэффициента усиления.

### 3.3. Исследования коэффициента усиления активной среды при разных условиях накачки.

Для оценки влияния замены ромбических отражателей на величину коэффициента усиления, проведено сравнение значений  $g_0$ , полученных в канале 2 усилителя У1 до и после замены ромбических отражателей и перекомпоновки активных элементов (в 2013 и 2015 годах). Канал 2 усилителя У1 как до, так и после перекомпоновки активных элементов, связанной с дооснащением усилителей слэбами из стекла КНФС, включал в себя только активные элементы из стекла КГСС-0180/35.

На рис. 10 представлены зависимости коэффициента усиления от электрической энергии, введенной в лампу накачки, полученные до [4] и после перекомпоновки усилителей и замены ромбических отражателей в канале 2 усилителя У1 (2013 и 2015 годы). Ромбические отражатели в первом случае выполнены из фольги MIRO, во втором – MIRO Silver.

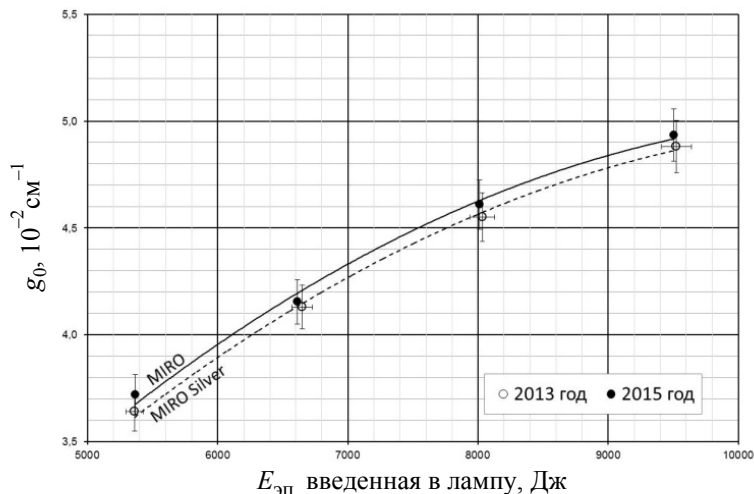


Рис. 10. Зависимость коэффициента усиления от энергии в лампу в канале 2 усилителя У1 до и после перекомпоновки активных элементов и замены ромбических отражателей

Из графика, представленного на рис. 10, видно, что значения  $g_0$ , полученные после замены ромбических отражателей ламповых кассет, лежат выше, чем полученные со старыми отражателями. Это, вероятно, связано с разной величиной коэффициента отражения используемых фольг. Однако, разница значений  $g_0$  во всем исследованном диапазоне энергии накачки составляет от  $\approx 1,1\%$  до  $\approx 1,6\%$ , что не превышает погрешности измерения и обработки экспериментальных данных.

## 4. Заключение

Проведена модернизация элементов усилителей, включавшая в себя дооснащение канала 1 установки активными элементами из стекла марки КНФС, перекомпоновку активных элементов в усилителях и замену ромбических отражателей из фольги MIRO на отражатели, выполненные из фольги MIRO Silver.

Выполнены измерения коэффициента усиления активной среды в канале 1 усилителя У1. Получено увеличение коэффициента усиления на величину до 8,4 %, максимальное значения  $g_0$  при зарядном напряжении на накопителе 24 кВ составило  $g_0 \approx 5,3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ .

Проведены исследования коэффициента усиления в каналах усилителя У1, сформированных на базе стекла КНФС и на базе стекла КГСС-0180/35. Показано, что значения линейного коэффициента усиления активной среды на стекле КНФС выше, чем для стекла КГСС-0180/35 на величину до  $\approx 7\%$ . Проведены измерения коэффициента усиления в канале усилителя, содержащем активные элементы как из стекла КНФС, так и КГСС-0180/35. Полученные величины коэффициента усиления

ния принимают промежуточные значения между результатами для стекла марки КНФС и марки КГСС-0180/35.

Представлены результаты исследования коэффициента усиления активной среды при разных условиях накачки (с разными ромбическими отражателями). Показано, что замена ромбических отражателей привела к увеличению коэффициента усиления активной среды на величину  $\approx 1,5\%$ .

Показано, что рост коэффициента усиления силового усилителя в полномасштабных экспериментах согласуется с результатами измерений коэффициента усиления активной среды.

### Список литературы

1. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И. и др. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 4. С. 299–301.

2. Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зарецкий А. И. и др. Получение высокого коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с элементами из неодимового фосфатного стекла // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 6. С. 121–122.

3. <http://www.alanod.com>.

4. Белов И. А., Бельков С. А., Воронич И. Н. и др. Исследование влияния модернизации элементов усилительного модуля установки «Луч» на повышение световой эффективности накачки // Сборник тезисов докладов XIII научно-технической конференции «Молодежь в науке». 2014. С. 59.

5. Белов И. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г. и др. Исследование коэффициента усиления активной среды усилителя установки «Луч» на неодимовом фосфатном стекле // Сборник докладов 21-й Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация. 2011». 2011. Т. 2. С. 203–214 // Труды РФЯЦ ВНИИЭФ. 2013. Т. 18. С. 298–305.

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