

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КАЧЕСТВА ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДЕ СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

С. В. Савкин, С. В. Кошечкин, В. В. Ладейщикова, В. И. Лесков, Н. С. Мальцева, В. В. Свиридов

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

Введение

Исследования на лазерных установках на современном этапе подразумевают необходимость получения больших энергий одновременно с высоким качеством пучка в ближней и дальней зонах излучения. С другой стороны, при проведении опытов необходимо обеспечить соответствие экспериментальных параметров заранее заданным параметрам, т. е. необходимо управлять условиями эксперимента с высокой точностью.

Эффективность усиления лазерного импульса определяется величиной коэффициентов усиления и потерь при прохождении излучения по тракту установки. В установках на неодимовом стекле, использующих многопроходную схему усиления, ключевым условием для этого является качество оптических деталей, через которые лазерное излучение проходит многократно. В результате несовершенства оптического тракта, развития амплитудных и фазовых неоднородностей пучка неоднородность пучка и его расходимость могут существенно ухудшаться. В частности, на установке «Луч» на выходе усилительного канала модуляция распределения пучка в ближней зоне составляла до 200 % при расходимости более 10^{-4} радиан. Фактически, эти значения ограничивали возможности генерации энергии установки в 2–3 раза (с учетом порогов по безопасности) и не обеспечивали качественной фокусировки излучения на мишень. С другой стороны, энергетическая нестабильность на выходе канала составляла более $\pm 15\%$, что также негативно влияло на статистику измерений, и увеличивало погрешность измерения величин в проводимых экспериментах

В докладе представлены результаты работ, проведенных на современном этапе на установке «Луч» по решению задачи повышения стабильности и эффективности генерации лазерной энергии и получения высокого качества пучка на выходе канала.

Модернизация силового усилителя установки на основе дисковых активных элементов нового типа

Основным оптическим элементом, определяющим качество излучения, является дисковый активный элемент (ДАЭ) из неодимового фосфатного стекла. Лазерный канал установки «Луч» [1], работающий по четырехпроходной схеме, содержит два

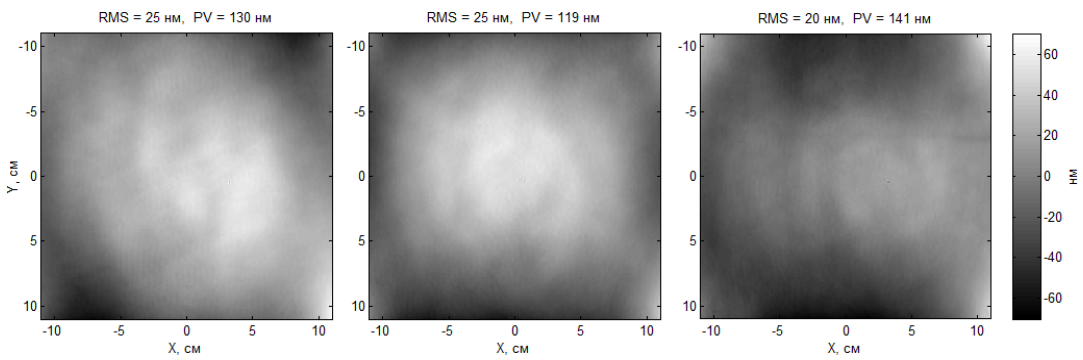
усилительных каскада У1 и У2, в каждом из которых находятся по девять ДАЭ. По мере распространения лазерного излучения через активный элемент амплитудные неоднородности переходят в фазовые и наоборот, что приводит к постепенному ухудшению качества волнового фронта. Поэтому для повышения качества пучка лазерного излучения (ЛИ) был предложен ряд мер по модернизации элементов усилительного тракта, ключевой из которых являлось оснащение усилителей новыми ДАЭ, отвечающими высоким требованиям, как к материалу, так и к качеству финишной обработки рабочих поверхностей.

Для этих целей были разработаны усовершенствованные технические требования на ДАЭ – их оптические и лазерные характеристики. Основным изменением с точки зрения оптических требований являлось введение функции [2] разложения спектра индуцируемых оптическим элементом искажений волнового фронта (ВФ) и ограничение его в разных пространственных частотах, одновременно с появлением средств контроля, обеспечивающих высокую точность ВФ.

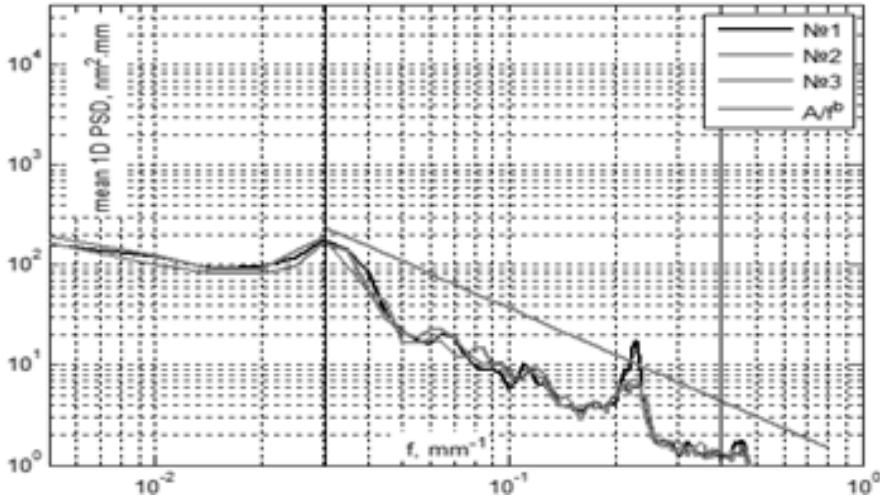
Такой подход к контролю рабочих поверхностей ДАЭ позволил снизить нежелательные мелкокомасштабные неоднородности оптических элементов до приемлемого уровня и в целом проконтролировать неоднородности различного пространственного масштаба.

На основе разработанных технических требований для установки «Луч» была изготовлена партия из 18 ДАЭ (производства Шанхайского Института Оптики и Точной Механики – СИОМ) из неодимового фосфатного стекла марки N31 для оснащения одного лазерного канала. Аттестация полученных ДАЭ на интерферометрическом стенде [3] с точностью $\lambda/1000$, показала соответствие изготовленных ДАЭ чертежам для двух вариантов их ориентации относительно излучения. Помимо этого, проведены исследования ДАЭ на наличие пузырей и свилей в объеме стекла. В качестве иллюстрации, на рис. 1 представлены изображения ВФ и амплитудно-частотные характеристики пучка, прошедшего через образец ДАЭ (для трех различных образцов).

Из рис. 1а и рис. 1б видно, что ДАЭ имеют примерно одинаковое качество и все аттестованные элементы удовлетворяют условию «not to exceed». Проведен анализ возможных вариантов взаимного расположения ДАЭ в усилителях с использованием их фазовых портретов, получено, что существенного влияния на эксплуатационные параметры расстановки элементов не оказывает.



а



б

Рис.1. Изображения ВФ и амплитудно-частотные характеристики пучка, прошедшего через образец ДАЭ (для трех различных образцов): а – искажения ВФ излучения, индуцированные aberrациями ДАЭ, расположенного под углом Брюстера; б – амплитудно-частотные характеристики фронтов (кривые линии) и предельное требование к ним (прямая линия)

Также, проведены расчетные и экспериментальные исследования по определению величины амплитудной модуляции пучка в зависимости от расстояния от плоскости перестроения оптимального изображения (ППОИ), ретранслируемой через систему, она определяет фактическую энергию, которая может быть получена на выходе усилительной системы и требования к оптическим элементам, расположенным в тракте установки, и их покрытиям.

Измерения проводились после оснащения усилителей ДАЭ «нового» типа с использованием излучения штатного юстировочного лазера в трех вариантах: с двумя ДАЭ в тракте, затем при полном комплектовании усилителя У1 (9 ДАЭ), и при полном оснащении лазерного канала (18 ДАЭ), рис. 2. Диапазон расстояний варьировался в пределах ± 15 м, что соответствует максимальному удалению от ППОИ для установки «Луч». Одновременно проводились измерения по распространению излучения на расстоянии до ± 50 м от ППОИ, что соответствует характерным масштабам перестроения в оптической схеме установки мегаджоульного уровня и позволяет моделировать ситуацию развития возмущений в ее сис-

теме. Среднеквадратические значения модуляции плотности энергии ЛИ (RMS, в процентах) в канале, составленном из усилительных элементов «старого» типа (кривые 1', 2', 3') и «нового» типа (кривые 1, 2, 3), в зависимости от комплектации канала и удаления от плоскости перестроения, представлены на рис. 2.

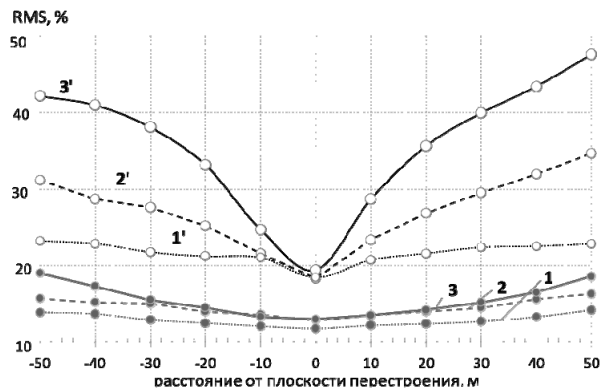


Рис. 2. Среднеквадратические значения модуляции плотности энергии ЛИ в канале: 1, 1' – тракт +2 АЭ, 2, 2' – усилитель У1, 3, 3' – усилитель У1+У2

Из рис. 2 видно, что с использованием «новых» ДАЭ амплитудные осцилляции интенсивности на всем протяжении тракта установки «Луч» не превышают 14 % по среднеквадратическому показателю (<50 % по пиковым показателям), что более чем вдвое лучше аналогичных цифр для канала до его модернизации. Важно, что регистрируемые значения RMS характеризуют комплексно влияние и активных элементов, и элементов системы транспортировки лазерного тракта (поэтому с использованием «новой» аттестованной оптики значение отклонений в эквивалентной плоскости в несколько раз ниже). Для установки мегаджоульного класса наблюдается схожая картина, максимальное RMS составляет около 18 %, что в примерно в 2,5 раза лучше, чем в случае использования оптических элементов, созданных с использованием требований «старого» типа.

Одновременно с контролем ДАЭ была проведена аттестация других оптических элементов на стендах входного контроля (СВК) и в случае несоответствия требованиям они были заменены на подходящие. В частности, зеркала выбирались наиболее плоскими ($RMS < 100$ нм), линзы пространственных фильтров – с одинаковыми фокальными отрезками.

Осуществлена геодезическая съемка монтажных конструкций усилителей, пространственных фильтров и блоков зеркал. На основании данных съемки

произведены работы по переориентации и перемещению составных частей канала. Проведена монтажная сборка канала на основе аттестованного набора оптических элементов, и их расчетных и измеренных положений. Пространственное положение линз выбрано для наилучшей угловой фильтрации излучения в плоскости установки диафрагм с учетом работы торцевого адаптивного зеркала. В процессе монтажа в штатную систему юстировки тракта, внесены изменения, заключающиеся во внесении дополнительных контрольных точек прохождения излучения по тракту: на входе и в реверсоре канала.

Проведена серия экспериментальных исследований усиления импульса ЛИ в «новом» канале и представлено сравнение с данными, полученными в экспериментах в «старом» канале. На рис. 3 приведены изображения пучка излучения в ближней, рис. 3а, и дальней зонах, рис. 3в, и распределения плотности энергии излучения в пучке на выходе силового усилителя, рис. 3б, зарегистрированные 15.02.2018 г. в эксперименте со «старым» каналом.

На рис. 4 приведены изображения пучка излучения в ближней, рис. 4а, и дальней зонах, рис. 4в, и распределения плотности энергии излучения в пучке на выходе силового усилителя, рис. 4б, зарегистрированные в одном из экспериментов после модернизации лазерного канала.

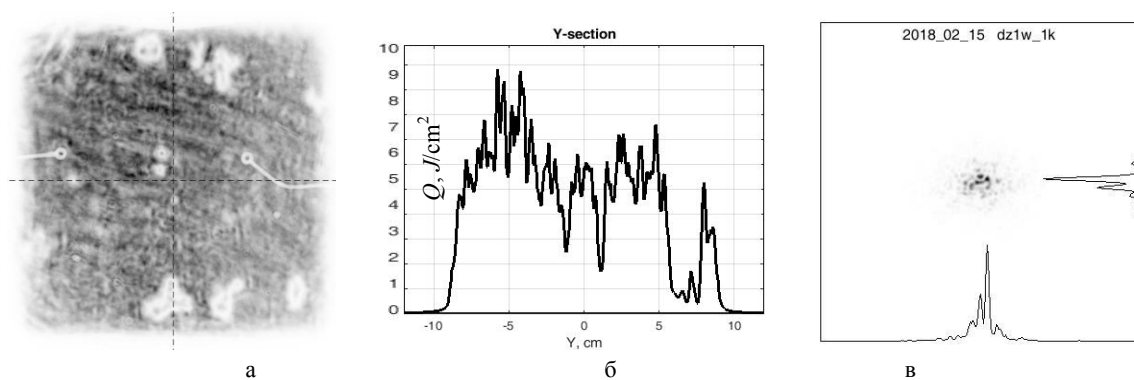


Рис.3. Регистрации пучка излучения в эксперименте до переоснащения канала: а – изображение пучка излучения в ближней зоне, б – распределение плотности энергии излучения по вертикальной координате, в – изображение пятна излучения в дальней зоне

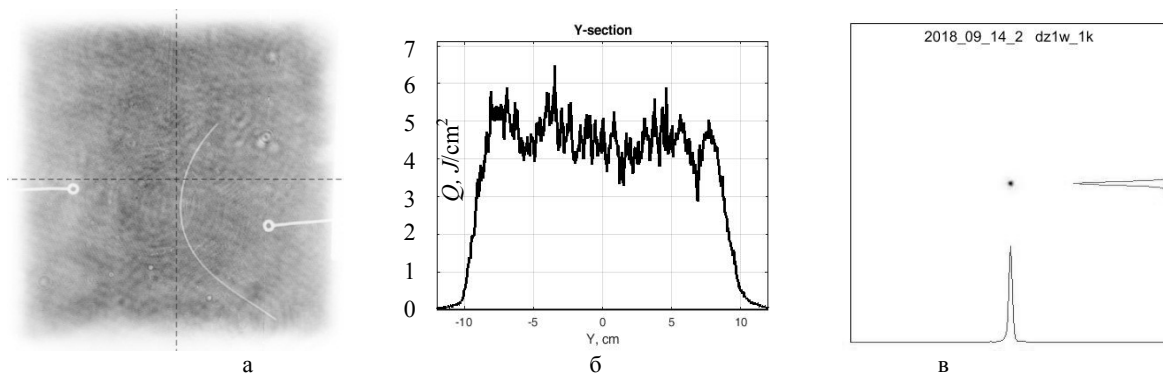


Рис. 4. Регистрации пучка излучения в эксперименте после переоснащения канала: а – изображение пучка излучения в ближней зоне, б – распределение плотности энергии излучения по вертикальной координате, в – изображение пятна излучения в дальней зоне

Из приведенных результатов видно, что следы мелкомасштабного инструмента, заметные в изображении на рис. 3а, отсутствуют на рис. 4а. Модуляция плотности энергии лазерного пучка в ближней зоне уменьшилась с $PV \approx 150\%$ и $RMS \approx 40\%$ до $PV \approx 70\%$ и $RMS \approx 20\%$. Значение средней плотности энергии в пучке в обоих случаях $\approx 4,5$ Дж/см², при этом пиковая плотность составляет ≈ 10 и 6 Дж/см², соответственно.

В эксперименте со «старым» каналом на выходе зарегистрирована расходимость излучения $\theta_{0,8E} \approx 1,4 \cdot 10^{-4}$ рад, пятно излучения в дальней зоне (рис. 3в) имеет спеклованную асимметричную структуру, отмечается отсутствие выраженного центрального зерна.

Регистрация излучения в дальней зоне, полученная в канале «нового» типа (рис. 4в), демонстрирует выраженный дифракционный характер пятна, расходимость излучения в данном опыте составила $\theta_{0,8E} = 4,8 \cdot 10^{-5}$ рад, число Штреля $\approx 0,4$ (в среднем в серии опытов с «новым» каналом $\theta_{0,8E} \approx 5 \cdot 10^{-5}$ радиан).

Эффективность генерации энергии

Как отмечалось выше, к «новым» ДАЭ, изготовленным из стекла N31, также предъявлялись высокие требования к лазерным параметрам материала активной части. Отличительными характеристиками стекла являлись:

- повышенное сечение усиления $\sigma = 3,8 \cdot 10^{-20}$ см²;
- длительность затухания люминесценции $\tau \geq 310$ мкс при концентрации ионов $Nd^{3+} 3,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³.

У образцов ДАЭ «старого» типа, произведенных из стекла марки КНФС, данные показатели составляли $3,6 \cdot 10^{-20}$ см² и 295 мкс [4] при той же концентрации активатора. Вместе, такое изменение позволяло прогнозировать прирост величины линейного коэффициента усиления слабого сигнала g_0 до $\approx 10\%$.

Более строгие требования были предъявлены также и к показателю поглощения ДАЭ на рабочей длине волны, значения которого (по натуральному основанию логарифма) составили $\alpha_{\lambda=1053nm} \approx 0,0014$ см⁻¹ (для стекла КНФС около $0,002$ см⁻¹). Как следствие, коэффициент пропускания усилительного тракта за два прохода возрос $c \approx 0,28$ до $0,36$.

В результате, в экспериментах получено повышение линейного коэффициента усиления слабого сигнала g_0 на $\approx 10\%$: $c \approx 4,0 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹ [4] до $4,40 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹ при зарядном напряжении $U_{зар} = 18$ кВ и $c \approx 4,25 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹ до $4,7 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹ при $U_{зар} = 19$ кВ.

Вместе с увеличением пропускания это позволило снизить величину энергии на входе лазерного канала, требуемую для обеспечения рабочего диапазона выходной энергии излучения (0,5–1,5) кДж, примерно на порядок – с $\approx (20-50)$ мДж до $\approx (1-4)$ мДж.

Обеспечение стабильности энергетических характеристик силового усилителя

Опыт работы на установке «Луч» показал, что существует нестабильность выходной энергии излучения от опыта к опыту $\geq \pm 15\%$ [5]. Такая нестабильность обусловлена главным образом, высокой нестабильностью величины суммарной электрической энергии, запасаемой в накопителе к моменту ее разряда на лампы накачки ($\approx 3\%$) [5].

Для понимания работы системы электропитания установки «Луч» и возможных причин нестабильности ее параметров, рассмотрим кратко ее структуру и процесс заряда. Система электропитания, аналогично усилителям установки, организована по модульному принципу: питание ламп 18-ти усилительных модулей осуществляется 18-ю модулями конденсаторной батареи (МКБ). Заряд МКБ выполняется шестью зарядными устройствами (ЗУ), каждое из которых заряжает по три сопряженных с ним МКБ. Электрическая схема заряда трех МКБ от сопряженного с ними ЗУ показана на рис. 5.

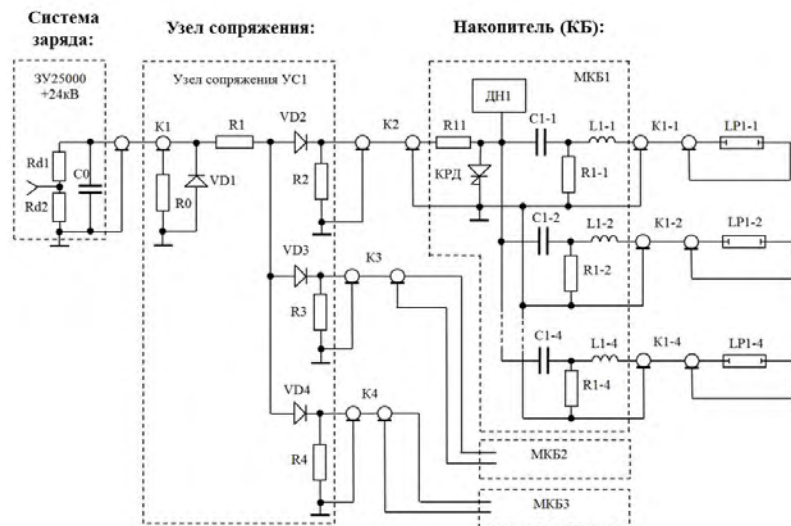


Рис. 5. Схема заряда трех МКБ: R_0 – ТВО60 24 Ом; R_1 – 300 Ом; R_2 - R_4 – КЭВ5 100М; Rd_1 – КЭВ20 100М; Rd_2 – С2-23-0,5 22к; C_0 – К75-48 0,1мкФ 25кВ; VD_1 - VD_4 – 3HV50K; K_1 - K_4 – РК50-11-13; K_1 -1 – K_1 -4 – 3 параллельно соединенных кабеля РК50-11-13; ДН1 – высоковольтный делитель; R_{11} – 2 последовательно соединенных ТВО60 24 Ом; КРД – коммутатор КРД25-100; C_1 -1 – C_1 -4 – конденсаторы типа 99ЕСХ011 150мкФ фирмы ТРС (Франция); R_1 -1 – R_1 -4 – зарядные резисторы 1кОм; L_1 -1 – L_1 -4 – формирующие индуктивности 95 мкГ; LP_1 -1 – LP_1 -4 – ламповая нагрузка

Набор заряда на накопителе, рис. 5, и его последующий разряд на импульсные лампы накачки лазерных усилителей происходит следующим образом. Устанавливается значение зарядного напряжения, требуемого при проведении эксперимента. ЗУ производят набор высокого напряжения на накопителе. Управление работой ЗУ осуществляется с помощью датчика обратной связи, использующего омический делитель для измерения выходного зарядного напряжения на емкости C_0 . При заряде батареи напряжение на данной емкости равно напряжению на конденсаторах МКБ. В момент времени, когда величина измеряемого напряжения достигает установленного значения, непрерывный заряд МКБ от ЗУ прекращается. ЗУ переходит в режим стабилизации заряда на МКБ, ожидая зарядки всех МКБ до установленного значения напряжения. В режиме стабилизации ЗУ дозаряжает МКБ небольшими дозами для компенсации тока утечки. Когда на последнем МКБ достигается установленное значение зарядного напряжения, проходит команда «Стоп заряд», и происходит автоматический разряд электрической энергии, запасенной в МКБ, на лампы.

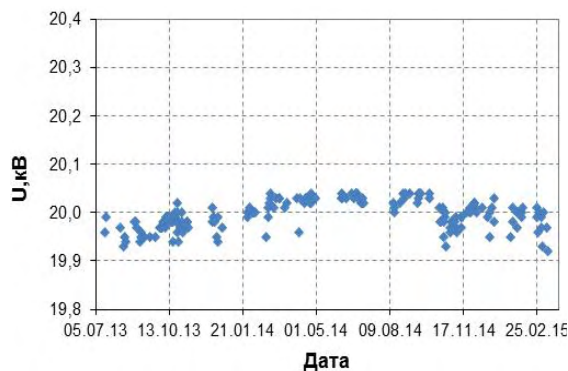
Однако недостатком является то, что в режиме подзарядки контрольная емкость ЗУ разряжается быстрее, чем емкости заряжаемых им МКБ, а диоды VD2-4 (рис. 5) препятствуют выравниванию потенциалов в этих точках схемы. Следствием является перезарядка сверх нормы уже заряженных МКБ, ожидающих окончания процесса заряда на последнем МКБ.

Выявлена причина недостаточной стабильности работы делителя на ЗУ, связанная с термостабильностью верхнего плеча на основе сопротивления КЭВ-50-100 МОм $\pm 5\%$, характеризуемого высоким значением ТКС $\pm 1600 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Это приводило к некорректной регистрации напряжений на ЗУ и характеризовалось явной «сезонной» зависимостью.

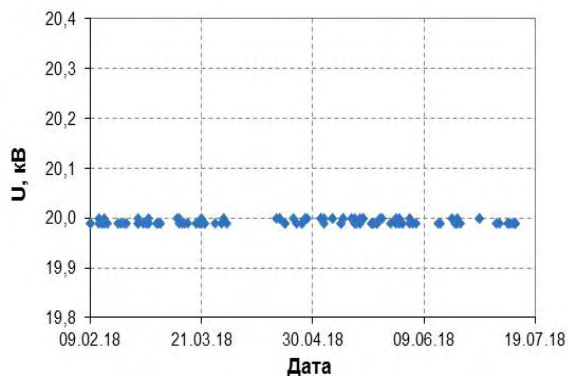
По результатам исследований была выполнена модернизация системы электропитания. Модернизация включала в себя доработку платы сопряжения модулей конденсаторной батареи с зарядными устройствами, замену делителей обратной связи в ЗУ и внесение изменения в алгоритм работы автоматизированной программы управления зарядом. На плату сопряжения параллельно диодам были добавлены резисторы (5 кОм), обеспечившие постоянную электрическую связь ЗУ с МКБ. Делители верхнего плеча в ЗУ были заменены на сборку из 2 резисторов HPR 968.7 АВ 50М $\pm 1\%$ TC25 с низким значением ТКС ($\pm 40 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Изменение в алгоритме работы автоматизированной программы управления зарядом заключалось в добавлении задержки ≈ 5 сек. формирования команды «Стоп заряд» с целью «дотягивания» напряжения до установленного значения.

В результате проведенных работ по исследованию и модернизации системы электропитания, достигнута требуемая стабильность ее выходных параметров, получено повышение стабильности величины суммарной энергии на накопителе в (7–8) раз. На

рис. 6, представлены результаты работы ЗУ1 до и после модернизации системы электропитания при $U_{\text{зар}} = 20 \text{ кВ}$.



а



б

Рис. 6. Напряжения на делителях ЗУ1: а – до модернизации системы электропитания, б – после модернизации

Итоги модернизации

Итоги проведенных работ по повышению энергетических характеристик силового усилителя и стабильности его работы наглядно иллюстрируют экспериментальные зависимости энергии излучения на выходе лазерного канала от величины входного сигнала, изображенные на рис. 7.

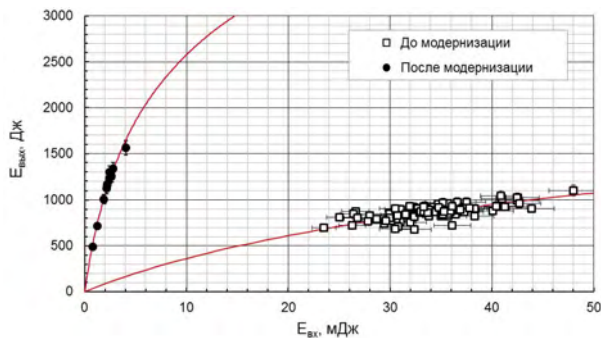


Рис. 7. Энергия излучения на выходе лазерного канала до и после модернизации лазерного канала и системы электропитания

Белыми квадратами на рис. 7 обозначены значения, полученные в опытах до модернизации при зарядном напряжении на накопителе $U_{зар} = 20$ кВ, черными точками – после модернизации при $U_{зар} = 19$ кВ.

Диапазон значений входного сигнала во втором случае на порядок ниже – от 1 до 4 мДж вместо $\approx(20-50)$ мДж из-за увеличения коэффициента усиления силового усилителя и повышения коэффициента пропускания лазерного канала.

Сравнение графиков на рис. 7 показывает существенное увеличение энергетических возможностей канала одновременно со стабилизацией работы силового усилителя – разброс значений энергии излучения на выходе канала снижен с ± 15 до ± 5 %, с учетом погрешности измерения энергии излучения штатными калориметрами, экспериментальные значения новой серии экспериментов лежат на расчетной кривой.

Достигнутая стабильность работы силового усилителя позволяет осуществлять управление выходной энергией лазерного излучения, определив для заданного значения $E_{вых}$ величину входного сигнала в соответствии с зависимостью $E_{вых}(E_{вх})$, и реализовав данный сигнал на входе усилительного канала.

Заключение

Проведены комплексные исследования в обоснование возможности повышения и стабилизации энергетических характеристик и качества пучка лазерного излучения на выходе силового усилителя установки «Луч».

Осуществлена модернизация, включающая в себя переоснащение элементной базы силового усилителя установки «Луч» и усовершенствование штатной системы электропитания установки. Оснащение силового усилителя проведено на базе новых дисковых активных элементов, изготовленных по усовершенствованным техническим требованиям к параметрам материала и качеству обработки рабочих поверхностей ДАЭ.

Улучшено пространственное качество пучка в ближней зоне излучения по показателям PV, RMS более чем в два раза. В дальней зоне излучения получено стабильное пятно излучения дифракционного характера с четким центральным керном и выраженной угловой симметрией. Расходимость излучения снижена с $1,4 \cdot 10^{-4}$ до $0,48 \cdot 10^{-4}$ рад, число Штреля составляет $\approx 0,4$.

Увеличен коэффициент линейного усиления слабого сигнала на ≈ 10 %, и повышено пропускание лазерного тракта за два прохода с 0,28 до 0,36. Как результат, в экспериментах на установке достигнуто снижение величины входного сигнала, требуемого для получения на выходе канала энергии лазерного излучения в диапазоне от $\approx 0,5$ до 1,5 кДж, примерно на порядок – с (20–50) мДж до уровня (1–4) мДж.

По результатам проведенных работ по модернизации системы электропитания, достигнута требуемая стабильность ее выходных параметров, получено повышение стабильности величины суммарной энергии на накопителе в (7–8) раз. В экспериментах на установке зарегистрирован разброс значений энергии на выходе силового усилителя ± 5 %, при этом отмечено, что разброс за счет стабильности работы силового усилителя, исключая стабильность входного сигнала и пропускания реверсора, составляет ≈ 2 %.

Литература

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. С. 299–301.
2. ISO 10110: Optics and Optical Instruments – Preparation of drawings for optical elements and systems: User's Guide, Second Edition. OSA, 2010.
3. Sergeev A. M., Khazanov E. A., Kozhevatorov I. E., Silin D. E. Subnanometer characterization of large aperture optical components using broad-band interferometry. Proc. SPIE. 2008. Vol. 7022. P. 70220I-1 – 70220I-11.
4. Бельков С. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г. и др. Исследования энергетических характеристик силового усилителя установки «Луч» с активными элементами из неодимового фосфатного стекла КНФС и отражателями из фольги Miro Silver / Международная конференция «XIII Забабахинские научные чтения» // Сборник тезисов. Снежинск, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2017. С. 119.
5. Бельков С. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г. и др. Лазерная установка на Nd стекле с предельными характеристиками по концентрации энергии излучения для проведения исследований экстремальных состояний вещества и в интересах ЛТС / Международная конференция «XIII Забабахинские научные чтения» // Сборник тезисов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2017. С. 122.