

## СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДЕ СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Горчаков Олег Иванович, Лисовский Олег Ярославович, Петрунин Александр Игоревич (oefimova@otd13.vniief.ru), Седов Дмитрий Сергеевич, Сенник Алексей Васильевич, Стародубцев Константин Владимирович*

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

В статье представлены: Структура системы диагностики параметров лазерного излучения на выходе силового усилителя; Оптическая схема системы диагностики параметров лазерного излучения на выходе силового усилителя; Узел отбора лазерного излучения; Оптическая схема измерительного канала с боксом диагностики; Аппаратура диагностики; Система измерения энергии импульсного лазерного излучения многоканальная; Система регистрации пространственных параметров лазерного излучения; Система регистрации формы импульса и исследования глубокого профиля фронта лазерного излучения; Программный комплекс обеспечения управления СДПЛИ СУ.

**Ключевые слова:** лазер, диагностика, термоядерный синтез, лазерное излучение, форма импульса, ближняя зона, дальняя зона, энергетический контраст, волновой фронт.

## DIAGNOSTIC SYSTEM OF LASER RADIATION PARAMETERS AT THE OUTPUT OF THE POWER AMPLIFIER OF A NEW GENERATION INSTALLATION

*Gorchakov Oleg Ivanovich, Lisovski Oleg Yaroslavovich, Petrunin Alexandr Igorevich, (oefimova@otd13.vniief.ru), Sedov Dmitriy Sergeevich, Senik Alexey Vasilevich, Starodubtsev Konstantin Vladimirovich*

FSUE “RFNC-VNIIEF”, Sarov, Nizhny Novgorod region

In the paper there are presented: the structure of the system for diagnostics of parameters of laser radiation at the output of a power amplifier; Optical diagram of the system for diagnosing the parameters of laser radiation at the output of the power amplifier; Laser radiation selection unit; Optical scheme of the measuring channel with diagnostic box; Diagnostic equipment; Multichannel pulsed laser energy measurement system; System for registration of spatial parameters of laser radiation; System for recording the pulse shape and studying the deep profile of the laser radiation front; Software complex for ensuring control of diagnostic system.

**Keywords:** laser, diagnostics, thermonuclear synthesis, laser radiation, pulse shape, near zone, far zone, energy contrast, wave front.

### Введение

Одним из важных направлений развивающейся лазерной техники является создание мощных лазерных установок, нацеленных на исследование состояния вещества в экстремальных условиях, решение задач по управляемому термоядерному синтезу, а также исследования в областях планетарной и кос-

мической физики [1]. Инструментом для исследований этих вопросов стали импульсные многоканальные лазерные установки (ИМЛУ) нового поколения.

Объективное представление об эффективности работы усилительных каскадов и взаимосогласованности различных подсистем ИМЛУ позволяет составить информацию о параметрах лазерного излучения. Для измерения этих параметров в ключевых точках

оптического тракта предусмотрена система диагностики параметров лазерного излучения. В данной работе представлена система диагностики параметров лазерного излучения на выходе силового усилителя (СДПЛИ СУ), реализуемая на установке нового поколения в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

### Структура системы диагностики параметров лазерного излучения на выходе силового усилителя

В состав СДПЛИ СУ входят:

- узел отбора лазерного излучения (УЗОТ), как отдельное оптомеханическое изделие, осуществляющее отбор лазерного излучения на диагностические каналы;
- стойка с приемниками энергии широкоапертурными (ПЭШ-1ω) [2], предназначенная для градуировки измерительной схемы;
- оптическая схема диагностики, осуществляющая транспортировку и согласование апертуры лазерного излучения с приемными площадками регистраторов;
- аппаратура диагностики, осуществляющая регистрацию пространственных характеристик и измерение энергии, временных параметров импульса, энергетического контраста, глубокого профиля фронта лазерного излучения;
- система автоматического управления (САУ) [3], предназначенная для включения и настройки технологического оборудования, автоматической юстировки схем диагностики, автоматизация всех процессов при подготовке и проведении экспериментов.

На рис. 1 представлена структурная схема СДПЛИ СУ.

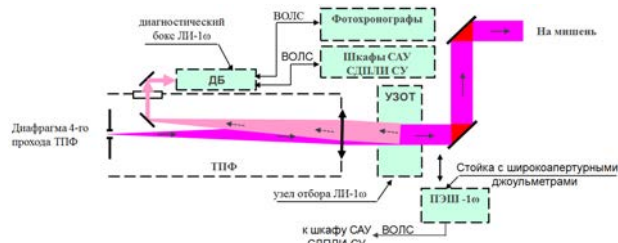


Рис. 1. Структурная схема СДПЛИ СУ: ДБ – диагностический бокс, САУ – система автоматического управления, УЗОТ – узел отбора лазерного излучения, ТПФ – транспортный пространственный фильтр, ПЭШ – приемник энергии широкоапертурный (джоульметр), ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

### Оптическая схема системы диагностики параметров лазерного излучения на выходе силового усилителя

Назначение оптической схемы СДПЛИ СУ – это транспортировка лазерного излучения от выхода транспортного пространственного фильтра (ТПФ), после четвертого прохода через усилители, к прием-

ным площадкам регистраторов, и обеспечение требований по согласованию апертур, обеспечению энергетической нагрузки диагностируемого излучения на детекторах, перестроению изображения на приемные площадки детекторов.

Оптическую схему СДПЛИ СУ можно разделить на две части: УЗОТ выходных лазерных импульсов, состоящий из широкоапертурных оптических элементов, и измерительные каналы с боксами диагностики, состоящий из оптических элементов с малой апертурой.

### Узел отбора лазерного излучения

Для отбора на выходе модуля силового усилителя (МСУ) малой части лазерного излучения на измерение и пропускания основной части энергии пучка для облучения мишени, а также для обеспечения оптимального уровня сигналов на детекторах для силовых и юстировочных пучков разработан и изготовлен УЗОТ лазерного излучения. На рис. 2 представлена 3D-модель УЗОТ.

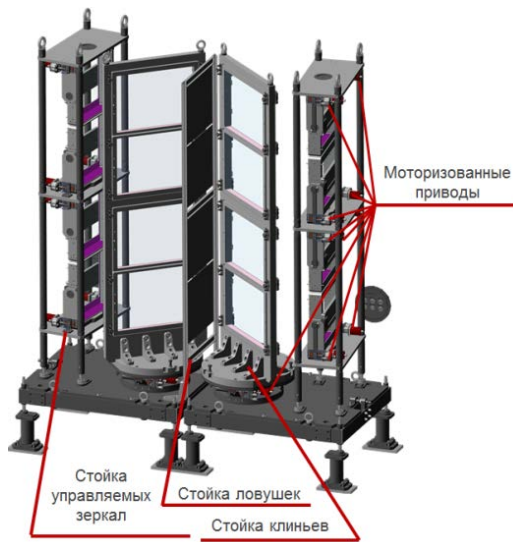


Рис. 2. 3D-модель УЗОТ

В состав УЗОТ входят:

- стойки клиньев, установленные на опорно-поворотные устройства, обеспечивающие необходимый коэффициент отражения лазерного излучения от передней непросветленной поверхности клина. Величина коэффициента отражения определяется рядом требований: доведение максимальной энергии до мишени; обеспечение безопасного уровня энергии на всех элементах схемы диагностики; необходимость заведения излучения, как с высокой, так и с малой энергией и т. д.;
- стойки управляемых зеркал, обеспечивающие точное заведение диагностируемого излучения на зеркала, расположенные внутри ТПФ, с последующим выводом его на диагностические каналы. Зеркала устанавливаются в оправы, позволяющие незави-

симулю для каждого зеркала регулировку угла установки в 2-х плоскостях;

– стойка ловушек, представляющая собой полноапертурные матрицы из поглощающих светофильтров для  $\lambda = 1,054$  мкм и предназначена для поглощения излучения отраженного зеркалом и прошедшего через клин.

Принципиальная схема УЗОТ измерительного канала проектируемой российской установки представлена на рис. 3.

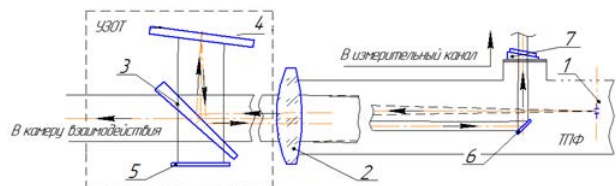


Рис. 3. Принципиальная схема УЗОТ проектируемой установки: 1 – диафрагма ТПФ 4-го прохода; 2 – выходная линза  $L_{ТПФ2}$ ; 3 – клин УЗОТ; 4 – зеркало УЗОТ; 5 – ловушка УЗОТ; 6 – зеркало; 7 – вакуумное окно диагностики

На выходе МСУ пучок лазерного излучения поступает на УЗОТ, где 1 % энергии выходного импульса отражается от передней грани клина 3, рис. 3, наклоненного к лучу под углом  $41,2^\circ$ , в той же плоскости, что и слэбы усилителей. Затем пучок отражается от зеркала 4, далее вновь от клина 3 и через линзу  $L_{ТПФ2}$  2 направляется на зеркало 6, расположенного внутри вакуумного объема ТПФ, которое отводит излучение с энергией около  $10^{-4}$  от энергии диагностируемого пучка в измерительный канал.

### Оптическая схема измерительного канала с блоком диагностики

Схема измерительного канала проектируемой установки представлена на рис. 4. Сходящийся пучок через вакуумное окно 7, рис. 3,4 выводится из ТПФ и зеркалами 8 и 9, рис. 4, задается направление распространения излучения в измерительном канале. Пучок направляется в вакуумный пространственный фильтр, который необходим для устранения оптического пробоя и экранировки рассеянного излучения. Часть пучка отражается от передней грани входного окна фильтра 10 и зеркалами 11, 12 отводится на приемную площадку ПЗС-камеры 14, установленную в фокальной плоскости линзы  $L_{ТПФ2}$  для измерения расходимости лазерного излучения на выходе МСУ. Оставшееся излучение проходит через вакуумный фильтр и поступает на линзу 17, образующую с линзой  $L_{ТПФ2}$  телескопическую систему Кеплера с кратностью, определяемой соотношением  $f_{L_{ТПФ2}}/f_{L(17)} \approx 13^\times$ . Далее излучения поступает в бокс диагностики.

Принципиальная схема бокса диагностики приведена на рис. 5.

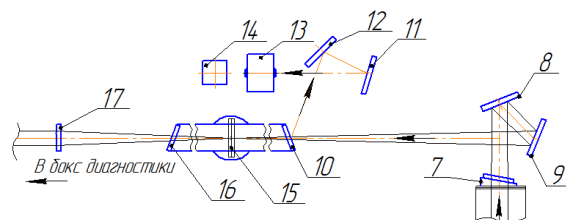


Рис. 4. Принципиальная схема измерительного канала проектируемой установки: 7 – вакуумное окно; 8, 9, 11, 12 – зеркала; 10 – входное окно вакуумного фильтра; 13 – attenuator моторизованный переменный; 14 – ПЗС-камера; 15 – диафрагма; 16 – выходное окно вакуумного фильтра; 17 – линза измерительного канала

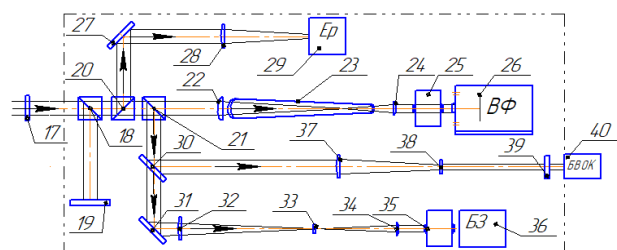


Рис. 5. Принципиальная схема бокса диагностики проектируемой установки: 17 – линза измерительного канала; 18 – поляризационный светоделительный кубик; 19, 39 – светофильтры; 20, 21 – светоделительный кубик; 22, 24 – линзы ( $5^\times$  телескоп Кеплера); 23 – вакуумный фильтр; 25, 35 – attenuator моторизованный переменный; 26 – датчик волнового фронта; 27, 31 – зеркала  $R \approx 99,9\%$ ; 28 – линза; 29 – приемник энергии; 30 – светоделительное зеркало  $R = 90\%$ ; 32, 34 – линзы ( $2,9^\times$  телескоп Кеплера); 33 – диафрагма; 36 – ПЗС-камера; 37, 38 – линзы ( $1,8^\times$  телескоп Галилея); 40 – блок волоконно-оптического коллектора

В боксе диагностики с помощью поляризационного светоделительного куба 18, рис. 5 выделяется р-поляризованная составляющая пучка, s-поляризованная составляющая пучка поступает на светофильтр 19. Далее излучение разделяется светоделительными кубами 20 и 21 (соотношением отражение/пропускание  $R/T \approx 50/50$ ) и светоделительным зеркалом 30 ( $R/T = 90/10$ ) на 4 пучка, которые направляются на независимые схемы регистратив.

Первый пучок через поворотное зеркало 27, рис. 5, 6, и линзу 28 поступает на приемник энергии 29 – ПЭ-1ω [4] для измерения энергии лазерного излучения. Линза 28 служит для фокусировки пучка до размеров сравнимых с приемной площадкой приемника.

Оптическая схема измерения энергии лазерного излучения (1-й фрагмент рис. 5) представлена на рис. 6.

Второй пучок через линзы 22, 24, рис. 5, 7, вакуумный фильтр 23 и attenuator моторизованный переменный 25 поступает на линзовый растр датчика волнового фронта, для измерения параметров волновых aberrаций на выходе МСУ. Линзы 22 и 24 образуют телескопическую систему Кеплера с кратностью определяемой соотношением  $f_{L(22)}/f_{L(24)} \approx 5^\times$  и служат для согласования апертуры диагностируемого лазерного излучения с приемной площадкой датчика волнового фронта. Вакуумный фильтр 23 предназначен для устранения оптического пробоя.

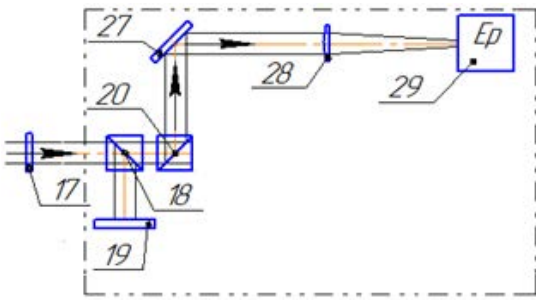


Рис. 6. Оптическая схема измерения энергии лазерного излучения в боксе диагностики: 17 – линза измерительного канала; 18 – поляризационный светоделительный кубик; 19 – светофильтр; 20 – светоделительный кубик; 27 – зеркало  $R \approx 99,9\%$ ; 28 – линза; 29 – приемник энергии

Оптическая схема регистрации волнового фронта лазерного излучения (2-й фрагмент рис.5) представлена на рис. 7.

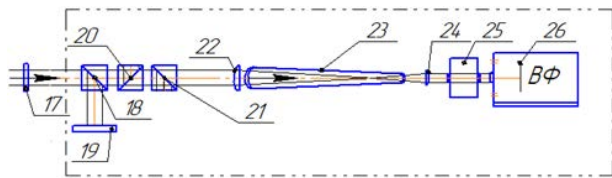


Рис. 7. Оптическая схема регистрации волнового фронта лазерного излучения в боксе диагностики: 17 – линза измерительного канала; 18 – поляризационный светоделительный кубик; 19 – светофильтр; 20, 21 – светоделительный кубик; 22, 24 –  $5\times$  телескоп Кеплера; 23 – вакуумный фильтр; 25 – attenuator моторизованный переменный; 26 – датчик волнового фронта

Третий пучок через светоделительное зеркало 30, рис. 5, 8, линзы 37, 38 и светофильтры 39 поступает на блок волоконно-оптического коллектора (БВОК) [5], формирующий ввод лазерного излучения в ВОЛС для транспортировки диагностируемого излучения на регистратор энергетического контраста для измерения энергетического контраста и на фотохронограф для измерения временных параметров и исследования глубокого профиля фронта лазерного излучения.

Оптическая схема ввода излучения на БВОК (3-й фрагмент рис.5) представлена на рис. 8.

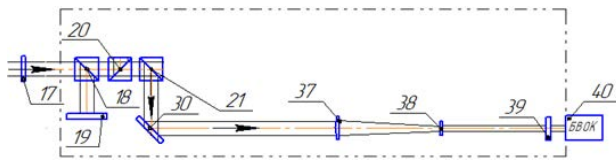


Рис. 8. Оптическая схема ввода излучения на БВОК в боксе диагностики: 17 – линза измерительного канала; 18 – поляризационный светоделительный кубик; 19 – светофильтр; 20 – светоделительный кубик; 30 – светоделительное зеркало  $R = 90\%$ ; 37, 38 – линзы ( $1,8\times$  телескоп Галилея); 39 – светофильтр; 40 – блок волоконно-оптического коллектора

Линзы 37 и 38 образуют телескопическую систему Галилея с кратностью определяемой соотношением  $f_{Л(37)}/f_{Л(38)} \approx 1,8\times$  и служат для согласования апертуры диагностируемого лазерного излучения с приемной площадкой БВОК.

Четвертый пучок через светоделительное зеркало 30, рис. 5, 9, поворотное зеркало 31, линзы 32, 34, диафрагму 33 и attenuator моторизованный переменный 35 поступает на ПЗС-камеру, для измерения распределения лазерного излучения в ближней зоне. Линзы 32 и 34 образуют телескопическую систему Кеплера с кратностью определяемой соотношением  $f_{Л(32)}/f_{Л(34)} \approx 2,9\times$  для согласования апертуры диагностируемого лазерного излучения с приемной площадкой ПЗС-камеры.

Оптическая схема регистрации ближней зоны лазерного излучения (4-й фрагмент рис. 5) представлена на рис. 9.

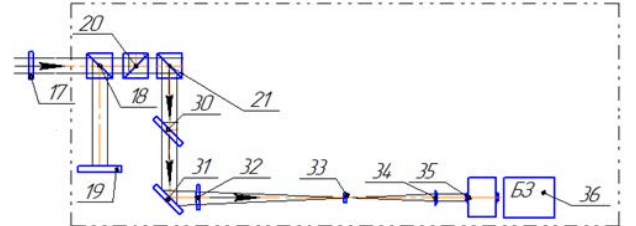


Рис. 9. Оптическая схема регистрации ближней зоны лазерного излучения в боксе диагностики: 17 – линза измерительного канала; 18 – поляризационный светоделительный кубик; 19 – светофильтр; 20, 21 – светоделительный кубик; 30 – светоделительное зеркало  $R = 90\%$ ; 31 – зеркало  $R \approx 99,9\%$ ; 32, 34 – линзы ( $2,9\times$  телескоп Кеплера); 35 – attenuator моторизованный переменный; 36 – ПЗС-камера

## Аппаратура диагностики

Аппаратура диагностики в СДПЛИ СУ осуществляет регистрацию пространственных характеристик и измерение энергии, временных параметров лазерного импульса, энергетического контраста, глубокого профиля фронта лазерного излучения.

### Система измерения энергии импульсного лазерного излучения многоканальная

В качестве аппаратуры измерения энергии и градуировки измерительной схемы используются джоульметры ПЭ-1ω, ПЭШ-1ω с комплектом связанного оборудования, располагаемые в диагностических каналах и в герметичном отсеке соответственно. Стойка с ПЭШ-1ω располагается за клином УЗОТ (рис. 1) и предназначена для градуировки джоульметра ПЭ-1ω.

Структурная схема системы измерения энергии импульсного лазерного излучения с месторасположением джоульметров ПЭ-1ω, ПЭШ-1ω приведена на рис. 10.

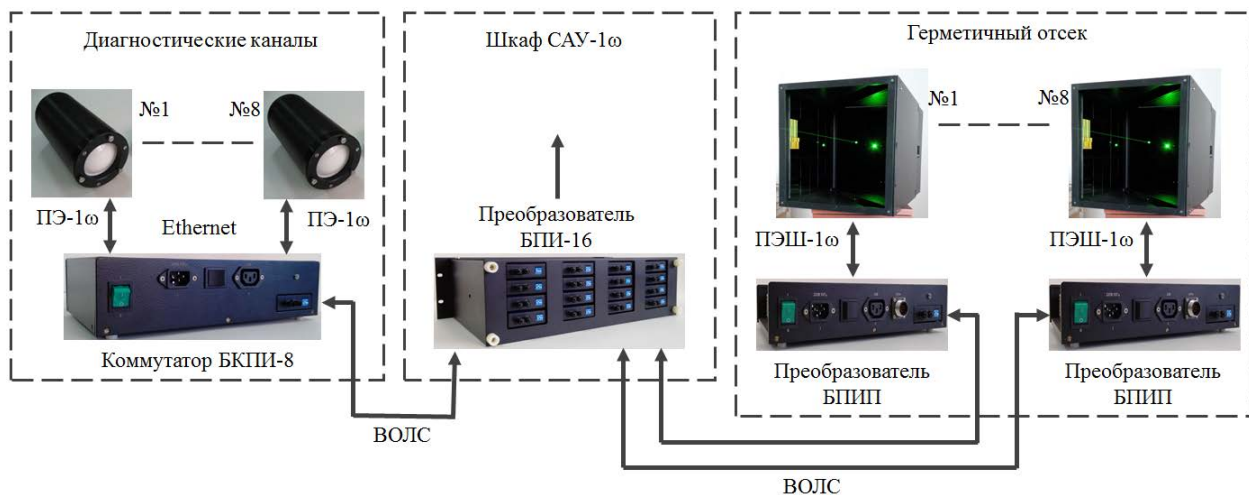


Рис. 10. Структурная схема системы измерения энергии импульсного лазерного излучения

В таблице представлены основные технические параметры приемников энергии ПЭ-1ω и ПЭШ-1ω.

Технические параметры джоульметров ПЭ-1ω и ПЭШ-1ω

Наименование технических параметров	ПЭ-1ω	ПЭШ-1ω
Длина волны лазерного излучения, нм	1054	1054
Рабочая апертура, мм	Ø40	400×400
Диапазон измеряемой энергии, Дж	$10^{-3} \div 1$	$300 \div 30\ 000$
Длительность измеряемых импульсов, нс	$1 \div 50$	$1 \div 30$
Погрешность измерений энергии, %	3	3
Габариты, мм	Ø86x190	777x509x454

Градуировка джоульметра ПЭ-1ω, размещенного в боксе диагностики, производится методом сличения с джоульметром ПЭШ-1ω, вносимым в рабочий пучок в градуировочных экспериментах и измеряющим полную энергию рабочего пучка. Результатом операции является нахождение коэффициента градуировки измерительной схемы  $K_G$ :

$$K_G = E_{\Sigma} / N_M, \quad (1)$$

где  $E_{\Sigma}$  – энергия, измеренная ПЭШ-1ω, в Дж,  $N_M$  – энергия, измеренная ПЭ-1ω, в мДж.

После градуировочных экспериментов, определение энергии  $E$  на выход МСУ за клином УЗОТ осуществляется с помощью показаний джоульметра ПЭ-1ω:

$$E = N_M \cdot K_G, \quad (2)$$

где  $N_M$  – энергия, измеренная джоульметром ПЭ-1ω, в мДж,  $K_G$  – коэффициент градуировки измерительной схемы.

### Система регистрации пространственных параметров лазерного излучения

В качестве аппаратуры регистрации пространственных параметров (ближней и дальней зоны) лазерного излучения используются ПЗС-камеры S2C-077W [6] с комплектом связного оборудования, располагаемые в диагностических каналах.

Структурная схема системы регистрации пространственных параметров лазерного излучения с месторасположением ПЗС-камер приведена на рис. 11.

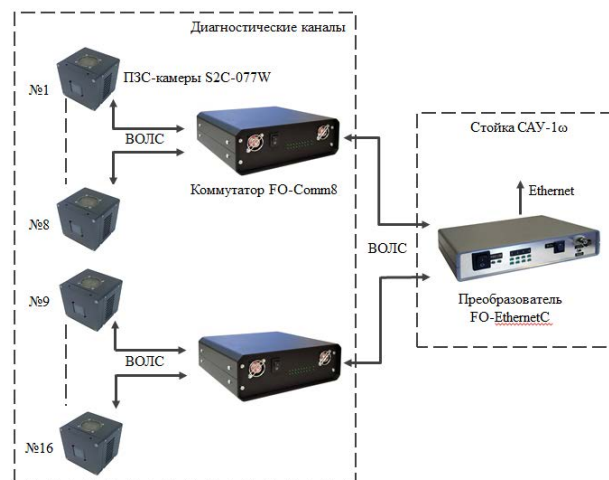


Рис. 11. Структурная схема системы регистрации пространственных параметров лазерного излучения: № 1, 8, 9, 16 – ПЗС камеры S2C-077W

Основные технические параметры ПЗС-камеры S2C-077W:

- спектральный диапазон: от 400 до 1100 нм;
- режимы работы: однократный/непрерывный;
- размерность матрицы: 1040x1160 пикс;
- размер пикселя: 16x16 мкм;
- размеры рабочего поля: 16x16 мм;

- динамический диапазон регистрации: не менее  $2 \cdot 10^3$ ;
- погрешность связанная с неравномерностью чувствительности: не более 10 %;
- габариты: 100x88x80 мм;
- синхронизация с регистрируемым импульсом: световым импульсом;
- программа управления камерой и ввода изображения в компьютер SIC3-M;
- вывод информации на компьютер: информационно-измерительная система на базе сети Ethernet.

### Система регистрации формы импульса и исследования глубокого профиля фронта лазерного излучения

Отбор излучения на измерение временных параметров и исследование глубокого профиля фронта лазерного излучения происходит с помощью БВОК расположенного в боксе диагностики.

Основные технические параметры БВОК:

- размер входной апертуры:  $\varnothing 15$  мм;
- число выходных каналов: 8;
- спектральный диапазон пропускаемая: от 400 до 1100 нм;
- габаритны:  $\varnothing 104 \times 305$ .

В качестве аппаратуры регистрации временных параметров лазерного излучения используются фотохронографы СЭР-5 [7] с комплектом связного оборудования, расположенные в помещении диагностики лазерного излучения.

Структурная схема системы регистрации временных параметров и исследования глубокого профиля лазерного излучения с месторасположением фотохронографов СЭР-5 приведена на рис. 12.

Основные технические параметры фотохронографа СЭР-5:

- спектральный диапазон регистрации: от 350 до 1100 нм;
- временное разрешение: не хуже  $1 \cdot 10^{-10}$  с;
- динамический диапазон регистрации: не менее  $1 \cdot 10^3$ ;
- длительность развертки: от  $5 \cdot 10^{-9}$  до  $60 \cdot 10^{-9}$  с;
- нелинейность развертки: не более  $\pm 10$  %;
- тип запуска (синхронизации): оптический и электрический;
- нестабильность запуска: не более  $\pm 3$  %;
- вывод информации на компьютер: информационно-измерительная система на базе сети Ethernet.

### Система измерения энергетического контраста

Отбор излучения на измерение энергетического контраста происходит с помощью БВОК расположенного в боксе диагностики. В качестве аппаратуры измерения энергетического контраста используется регистратор энергетического контраста (РЭК).

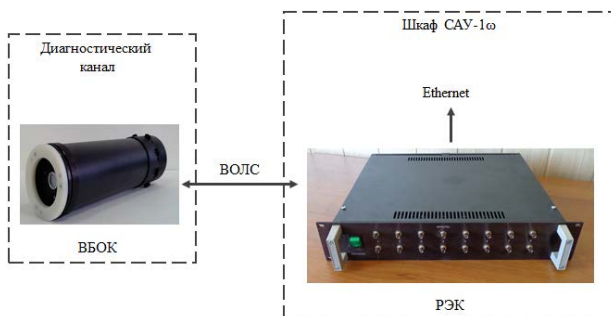
Структурная схема системы измерения энергетического контраста с месторасположением РЭК приведена на рис. 13.

Основные технические параметры РЭК:

- длина волны лазерного излучения: 1054 нм;
- минимальный уровень регистрируемой энергии: 1 мкДж;
- суммарный динамический диапазон регистрации контраста одного канала: не менее  $10^6$ ;
- временной интервал регистрации: 512 мкс;
- каналов измерений: 8;
- габаритны: 482x408x95.



Рис. 12. Структурная схема системы регистрации временных параметров и исследования глубокого профиля лазерного излучения



Рис/ 13. Структурная схема системы измерения энергетического контраста

## Программный комплекс обеспечения управления СДПЛИ СУ

Для подготовки одного диагностического канала (включение и настройка регистрирующего оборудования, проверка и настройка оптической схемы, юстировка оборудования, диагностика оборудования) к эксперименту силами нескольких человек может измеряться часами. Для автоматизации всех процессов подготовки, облегчения эксплуатации СДПЛИ СУ, сокращения времени на подготовку к эксперименту и проведения эксперимента в состав СДПЛИ СУ входит САУ.

САУ СДПЛИ СУ предназначена для:

- сбора, хранения и отображения на мнемосхемах информации о состоянии оборудования и информации об ошибках;
- сбор, хранение, обработка и просмотр данных эксперимента;
- обеспечение выдачи команд управления оборудованием с контролем процесса выполнения;
- отработка аварийных защит;
- осуществление непрерывной диагностики оборудования и самодиагностики САУ;
- обеспечение проведения автоматической юстировки, а также юстировки в ручном режиме;
- обеспечение настройки и подготовки оборудования к проведению эксперимента.

ПО САУ СДПЛИ построено по модульному принципу, и состоит из десятков отдельных, независимо выполняющихся программ различного назначения (модули интерфейса, модули алгоритмов управления САУ, модули обработки данных, модули взаимодействия с оборудованием), взаимодействующих с внешними системами и между собой.

### Заключение

Приведен краткий обзор СДПЛИ СУ установки нового поколения позволяющая производить сле-

дующие измерения лазерного излучения: расходимости, энергии, распределения излучения в ближней зоне, временных параметров, глубокого профиля фронта, энергетического контраста и параметров волновых aberrаций.

### Список литературы

1. Sarrao J., Budil K. and others. Report on the National Nuclear Security Administration // Office of Science «Basic Research Directions». 2008.

2 Патент 2605786, РФ, МПК G01J 11/00, G01J 1/04. Широкоапертурное устройство для измерения энергии высокоинтенсивных нано- и пикосекундных лазерных импульсов / Леднев В. М., Райцин А. М., Улановский М. В., Хлопов В. С. // Бюллетень изобретений. 2016.

3. Исаев В. Д., Панкова Т. А. Программный комплекс обеспечения управления системой диагностики параметров лазерного излучения многоканальной лазерной установки / 24-я Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки) / Материалы докладов. Н. Новгород: Министерство образования, науки и молодежной политики, 2019. С. 173–175.

4. Патент 2626315, РФ, МПК G01J 11/00, G01J 1/04. Высокоточное многоканальное устройство для измерения энергии коротких лазерных импульсов / Райцин А. М., Улановский М. В., Хлопов В. С. // Бюллетень изобретений. 2017.

5. Патент 2620783, РФ, МПК G02B 6/32, H04B 10/25. Устройство ввода импульсного лазерного пучка в волоконно-оптическую линию связи / Сенник А. В., Седов Д. С., Улановский М. В. // Бюллетень изобретений. 2017.

6. [www.silar.ru](http://www.silar.ru)

7. Корниенко Д. С., Кравченко А. Г., Литвин Д. Н. и др. Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 2. С. 78–89.