

УДК 621.375:551.521

## Измерение параметров широкоформатных лазерных пучков

В.А. Банах, А.Н. Кудрявцев, В.М. Сазанович, Р.Ш. Цвык\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 10.07.2018 г.

Представлено описание прибора для измерения мощности/энергии широкоформатных оптических (лазерных) пучков излучения, который включает два сменных измерительных блока: один — для измерения энергии в каждом импульсе импульсно-периодического лазера, второй — для измерения мощности непрерывного излучения.

*Ключевые слова:* широкоформатные оптические пучки, импульсно-периодическое излучение, непрерывное излучение, мощность, энергия, измерительные блоки; large-format optical beams, pulsed-periodic radiation, continuous radiation, power, energy, measuring units.

### Введение

Получение достоверных результатов измерений параметров используемых в эксперименте лазерных пучков имеет свою специфику, поскольку лазерное излучение характеризуется широким спектральным и динамическим диапазоном и высокой плотностью мощности. Энергетические параметры лазерного излучения измеряются с помощью разнообразных методов, основанных на различных физических и химических эффектах взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Для измерения мощности/энергии лазерных пучков используются прямое или рассеянное излучение, отклики молекул газов на воздействие излучения. Большинство современных измерительных средств, выпускаемых промышленностью, основано на методе прямого измерения излучения одиночными фотоприемниками или матрицами в широком диапазоне длин волн, мощности и энергии.

Например, Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений выпускает линейку измерителей энергии СИЭП для частотно-импульсных пучков диаметром до 40 мм в диапазоне длин волн 0,19–1,1 мкм и ЛД300-О для однократных импульсов в пучках диаметром от 3 до 100 мм в диапазоне длин волн 0,19–10,5 мкм [1].

Большую серию датчиков для измерения мощности и энергии в широких пределах методом приема прямого излучения выпускает фирма Ophir Optronics (Израиль). Датчики совместимы с различными измерительными средствами. Для лазерных пучков, размер которых больше измерительного

датчика, измерительные средства применяются только для оценки плотности энергии. Аналогичные измерители выпускаются рядом других фирм. Известна разработка фирмы Beam Watch AM для дистанционного измерения распределения интенсивности в широкоформатном мощном лазерном пучке (30–1000 Вт, длина волны 1,06–1,08 мкм). Методика основана на лидарной технологии приема излучения, рассеянного на молекулах азота и кислорода (рассеяние Рэлея) [2].

Существует группа проволочных измерителей энергии излучения проходного типа, выполненных в виде решеток из тонких металлических проволок или цилиндров, перекрывающих все сечение пучка излучения. Принцип действия прибора основан на двух различных методах: болометрическом эффекте (изменение сопротивления металлов при изменении температуры, вызванного поглощением части падающего на них лазерного излучения) [3] и на приеме излучения, рассеянного на решетке из цилиндрических элементов, линейкой или матрицей [4].

Для измерения мощности в широкоформатных лазерных пучках [5, 6] использовались измерительная матрица (ИМ-1) и измеритель большой мощности (ИБМ) проходного типа. Матрица ИМ-1 размером 1100 × 1500 мм включала 190 пластин из дюралюминия. Изменение температуры при воздействии лазерного излучения измерялось набором термодатчиков с обратной стороны пластин, сигнал с которых поступал на систему усилителей и регистрации. ИБМ представляет собой два узких фрагмента вогнутого сферического зеркала шириной 13 мм, закрепленных на вращающейся рамке. При вращении излучение принималось калориметром для измерения энергии и болометром для измерения распределения мощности в сечении.

В данной статье описано разработанное и изготовленное в лаборатории распространения волн

\* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Андрей Николаевич Кудрявцев (zoxu@iao.ru); Валентина Михайловна Сазанович (sazanovich@iao.ru); Рувим Шаханович Цвык (tsvyk@iao.ru).

Института оптики атмосферы СО РАН устройство для измерения параметров широкоформатных лазерных пучков ИК-диапазона с применением двух типов измерительных блоков: измерителей полной мощности непрерывного излучения и энергии импульсно-периодического излучения. Разработка основана на приеме излучения, отраженного от экрана, измерительным блоком и передаче данных в компьютер. Представлены результаты предварительной калибровки устройств.

## Методика измерений

Методика измерения мощности/энергии в широкоформатных оптических пучках основана на наведении оптического пучка на отражающий экран и приеме под небольшим углом рассеянного излучения. К экрану предъявляется ряд требований. Размер экрана должен быть больше максимального размера пучка с учетом его уширения при распространении по трассе. Второе серьезное требование относится к шероховатости поверхности и однородности коэффициента ее отражения – угловая зависимость коэффициента отражения при углах до 30° должна быть близка к закону косинуса.

Известно, что идеальная шероховатая поверхность отражает излучение по закону косинуса. Оценим ошибку, которая определяется зависимостью коэффициента отражения от углов падения и отражения, при следующих условиях:

- лазерный пучок освещает экран частично,
  - интенсивность отраженного излучения пропорциональна косинусу угла падения и отражения.
- Плотность потока, посылаемого элементарной площадкой экрана  $dS_1 = \pi r_s^2$  на элементарную площадку в плоскости приемника (рис. 1), определяет соотношением [7]:

$$E_{\text{п}}(t) = \frac{2\pi r_s^2}{L^2} \int_0^{\pi} \int_0^{R\lambda_2} E(\rho, \alpha, t) S(\rho, \alpha) S(\lambda) d\alpha d\rho d\lambda, \quad (1)$$

где  $E(\rho, \alpha, t)$  – распределение плотности мощности излучения на экране,  $\alpha, \rho$  – угловая и радиальная переменные интегрирования,  $t$  – время;  $S(\rho, \alpha)$  – распределение коэффициента отражения по экрану (принимается равным 1);  $S(\lambda)$  – спектральная чувствительность фотоприемника в зависимости от длины волны излучения  $\lambda$  (принимается равной 1);  $R$  ( $R_{\text{п}}$ ) – радиус отражающего экрана (радиус пучка на экране).

Угол падения определяется точностью установки отражающего экрана и расходимостью излучения. Ошибка за счет расходимости для коллимированного пучка составляет не более  $R_{\text{п}}/L_{\text{т}}$  ( $L_{\text{т}}$  – длина измерительной трассы). При точности установки экрана перпендикулярно оси пучка до 9° суммарная ошибка не превышает десятые доли процента. Поэтому основная ошибка определяется углом отражения.

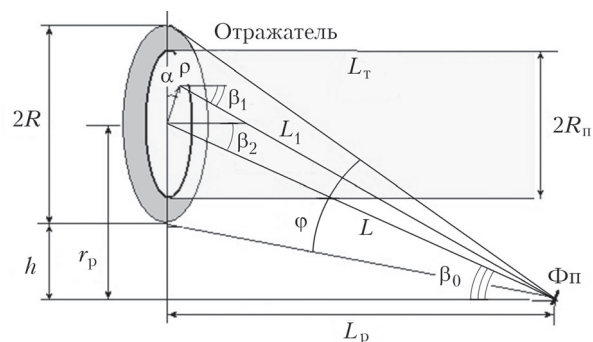


Рис. 1. Влияние угла отражения на ошибку измерения полного потока излучения:  $h$  – высота размещения приемника относительно края экрана;  $L$  – расстояние от приемника до центра экрана;  $L_1$  – расстояние от приемника до точки на поверхности экрана;  $L_p$  – длина перпендикуляра от приемника до экрана;  $L_t$  – длина измерительной трассы;  $\beta_1$  – угол отражения пучка от экрана и  $\beta_2$  – угол между перпендикуляром к экрану и направлением оси фотоприемника;  $\varphi$  – угловое поле зрения приемника;  $\Phi_{\text{п}}$  – фотоприемник излучения;  $r_p$  – расстояние между перпендикуляром и центром экрана

Расчет по формуле (1) плотности мощности излучения для пучка с равномерным единичным распределением плотности  $E_0(t) = 1$ , отраженного в направлении фотоприемника всей поверхностью экрана и с координатами каждой точки экрана ( $\alpha, \rho$ ), рассчитанными относительно координат центра экрана  $r_p = R + h$ ,  $L_p = (L^2 - r_p^2)^{1/2}$ , приводит к выражению [7]:

$$E_{\text{п}}(t) = \frac{E_0}{2} \left[ \left( 1 - \frac{L_p^2 + r_p^2 - 1}{\sqrt{(L_p^2 + r_p^2 + 1)^2 - 4r_p^2}} \right) \cos \beta_0 + \frac{L_p}{r_p} \left( 1 - \frac{L_p^2 + r_p^2 + 1}{\sqrt{(L_p^2 + r_p^2 + 1)^2 - 4r_p^2}} \right) \sin \beta_0 \right]. \quad (2)$$

При угле отражения  $\beta_0 = \beta_1 = 0$  (перпендикулярно плоскости отражателя) плотность потока, отраженная от всей поверхности экрана, в плоскости приемника  $E_{\text{п1}}(t)$  будет равна

$$E_{\text{п1}}(t) = \frac{E(t)}{L^2}, \quad (3)$$

где  $E(t) = 2 \int_0^{\pi} \int_0^R E(\rho, \alpha) d\rho d\alpha$  – полная мощность излучения, падающего на экран.

Отношение  $E_{\text{п1}}/E_{\text{п}}$  определяет максимальную систематическую ошибку  $\varepsilon(E_{\text{п1}})$  измерения полного потока, обусловленную использованием соотношения (3) вместо точного выражения (2). В таблице приведены результаты расчета максимальной систематической ошибки  $(1 - E_{\text{п1}}/E_{\text{п}}) \cdot 100\%$  для экрана радиусом  $2R = 50$  см, частично освещенного пучком ( $2R_{\text{п}} = 30$  см), и значений  $h = 25; 40$  и 50 см и соответствующих им значений величины угла  $\beta_0$  между направлением оси приемника на

центр экрана и горизонтальной плоскостью. Из таблицы следует, что приемлемая максимальная систематическая ошибка менее 4% (выделена полужирным) достигается при углах менее 20° (выделена полужирным курсивом) на расстояниях до экрана более 200 см. Варьированием геометрических параметров установки фотоприемника (высоты  $h$  и расстояния  $L$ ) можно снизить систематическую ошибку до нескольких процентов. Заметим, что данная методика применима при условии, что поле зрения фотоприемника на экране больше размера пучка излучения.

**Максимальная систематическая ошибка измерения полного потока в плоскости приемника  $\epsilon(E_{пл})$  без учета влияния угла отражения на плотность потока ( $L$  от 200 до 700 см, диаметры отражателя  $2R = 50$  см и лазерного пучка  $2R_{л} = 30$  см)**

$L$ , см	200	250	300	400	500	600	700
$h = 25$ см							
$\epsilon(E_{пл})$	3,73	<b>2,40</b>	<b>1,62</b>	<b>0,80</b>	<b>0,60</b>	<b>0,40</b>	<b>0,30</b>
угол $\beta_0$ , град	22,0	<b>17,50</b>	<b>14,5</b>	<b>10,8</b>	<b>8,6</b>	<b>7,2</b>	<b>6,20</b>
$h = 40$ см							
$\epsilon(E_{пл})$	7,07	4,49	<b>3,09</b>	<b>1,73</b>	<b>1,10</b>	<b>0,80</b>	<b>0,60</b>
угол $\beta_0$ , град	26,7	21,10	<b>17,5</b>	<b>13,0</b>	<b>10,4</b>	<b>8,6</b>	<b>7,40</b>
$h = 50$ см							
$\epsilon(E_{пл})$	9,05	5,710	<b>3,95</b>	<b>2,15</b>	<b>1,40</b>	<b>1,00</b>	<b>0,70</b>
угол $\beta_0$ , град	30,0	23,60	<b>19,5</b>	<b>14,5</b>	<b>11,50</b>	<b>9,60</b>	<b>8,20</b>

Указанные оценки касаются только измерительной мощности и энергии. Результаты измерений других параметров, например спектрального состава и относительного распределения интенсивности, не зависят от абсолютной величины мощности и энергии.

## Измерительное устройство

На рис. 2 представлена функциональная схема измерительного устройства. Оно включает группу выносных блоков, которые размещаются на трассе распространения излучения относительно экрана

с учетом требуемой ошибки (см. таблицу), и систему регистрации, которая соединяется с выносными блоками кабелями длиной 50 м. Разработаны два сменных измерительных блока: блок для измерения энергии импульсно-периодического излучения (ИПЭ-ИИ) и блок для измерения мощности непрерывного излучения (ИПЭ-НИ). В непосредственных измерениях может использоваться один из них в зависимости от типа лазера (импульсный или непрерывный) с соответствующей программой регистрации и статистической обработки информации.

Рассмотрим общие конструктивные решения, которые применены в обоих измерительных блоках. Выбранный измерительный блок ИПЭ устанавливается на поворотном устройстве KDM-6651 с дистанционным управлением KDM-6658 (рис. 3). Для наведения оптической оси изделия на центр экрана в каждом измерительном блоке установлена аналоговая видеокамера, работающая в широком диапазоне внешних температур. Видеокамера и фотоприемник установлены за отдельными входными окнами (рис. 3, цв. вкладка). Съёмный лазерный дальномер, который устанавливается на посадочном месте на верхней крышке блока, позволяет измерить расстояние  $L$  до центра экрана и углы направления на экран (см. рис. 1), которые необходимы для расчета по формуле (3) и оценки ошибки определения мощности.

Программой предусмотрены два режима: «наведения» и «работы». В режиме «наведения» изображение с видеокамеры по витой паре кабеля № 1 через USB-видеорегистратор вводится в компьютер. В этом режиме на экране монитора формируется два окна (рис. 4). В левом окне выводится непосредственное изображение с видеокамеры. В правом окне дополнительно отображаются запрограммированные перекрестие и квадрат, жестко связанные с центром кадра. Оператор, дистанционно управляя поворотным устройством, совмещает центр изображения экрана с перекрестием. В программе можно изменять размер изображения и квадрата на правом экране, что позволяет более точно совместить центр изображения с центром экрана.

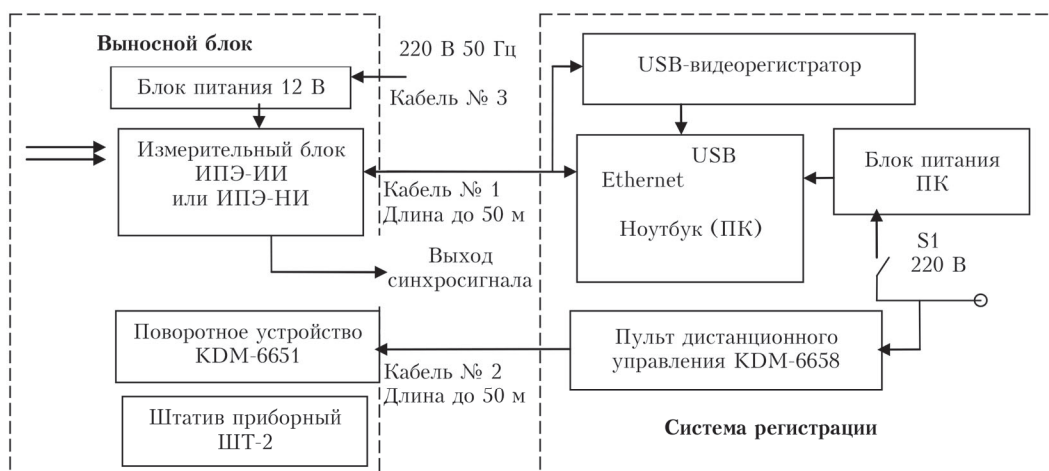


Рис. 2. Функциональная схема изделия

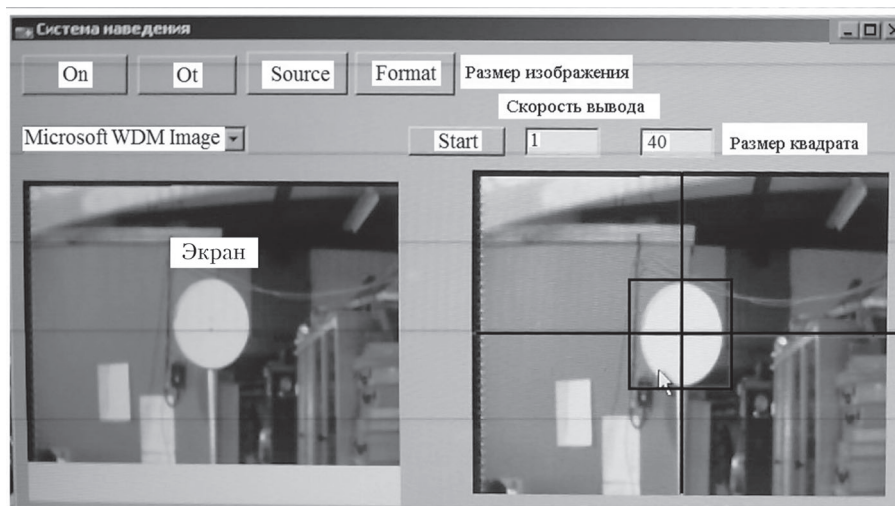


Рис. 4. Меню системы отображения в режиме «наведение»: левое окно – изображение с видеокamеры, правое – перекрестье и квадрат, привязанные к центру экрана

В режиме «работа» в каждом блоке также предусмотрены два режима: режим «имитатор» для контроля работоспособности блока и режим «измерения», при котором формируется синхросигнал для запуска внешних устройств. В каждом блоке установлен дисплей для задания температуры и вывода информации о текущем температурном режиме.

Для исключения запотевания входных защитных окон и фильтров в измерительных блоках предусмотрен подогрев корпуса при внешней температуре ниже 5 °С.

На рис. 5 (цв. вкладка) показано размещение измерительных блоков и блока питания с кабелем в переносном ударопрочном транспортном контейнере.

### Измерительный блок импульсно-периодического излучения ИПЭ-ИИ

Измерительный блок ИПЭ-ИИ, блок питания, поворотное устройство и штатив приборный (ШТ-2) являются выносными блоками; персональный компьютер (ПК), блок питания ПК, видеорегиистратор и пульт дистанционного управления – стационарными.

В измерительном блоке размещен фотоприемник ФП-0,5 диаметром 5 мм для ИК-области, выполненный из германия. Фотоприемник установлен в теплоизолированном медном корпусе (термостате), в котором датчик температуры управляет термоэлектрическим модулем и поддерживает температуру, заданную оператором в пределах 20–25 °С с точностью  $\pm(1-3)$  °С. Установленная и текущая температуры в термостате, текущая температура в измерительном блоке выводятся на дисплей измерительного блока и монитор ноутбука.

Сигнал с фотоприемника усиливается и оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с частотой 250 МГц, 12 бит. Данные каждого импульса заносятся в буферную память (программируемая логическая интегральная схема),

предварительно обрабатываются и по витой паре передаются в компьютер между импульсами излучения через Ethernet-контроллер. Управление предварительной обработкой данных, процессами приема и передачи информации производится разработанным микроконтроллером.

Для контроля работоспособности электронного тракта в измерительном блоке ИПЭ-ИИ оператор включает режим «имитатор» (триггер), в котором микроконтроллер формирует и подает импульсы длительностью 250–500 нс с частотой 25 Гц на вход усилителя сигнала с фотоприемника. Амплитуда импульсов на экране монитора – 200–250 ед. разрядов АЦП. По этим импульсам проверяется работоспособность измерительной головки от входа усилителя до регистрации. Выбор режима «имитатор – измерение» производится дистанционно, в программе на ПК. В режиме «измерения» формируется импульс синхросигнала длительностью 1 мкс.

Перед началом разработки измерительного устройства проведена проверка работоспособности фотоприемного блока с лазером на длине волны 1,06 мкм и длительностью импульса на уровне 0,5 максимума, близкой к 10 нс. Излучение, отраженное от экрана, принималось с расстояния 40 см и регистрировалось цифровым осциллографом TDS с полосой пропускания 300 МГц и частотой оцифровки 2 ГГц. Длительность переднего фронта импульса на уровне 0,5 составила 5 нс, на уровне 0,33 – 12 нс; длительность заднего фронта на уровне 0,5 – 6 нс, на уровне 0,33 – 16 нс. Эксперименты с эрбиевым лазером (длина волны 2,94 мкм) показали, что генерируется импульс длительностью  $\approx 200$  мкс, состоящий из более чем 40–50 импульсов разной амплитуды и длительности ( $\approx 20-30$  нс).

На рис. 6 (цв. вкладка) представлено меню управления и регистрации данных. Оператор заносит в него данные эксперимента, которые затем записываются в файл измерений.

## Измерительный блок непрерывного излучения ИПЭ-НИ

Измерительный блок ИПЭ-НИ предназначен для измерения мощности непрерывного излучения и аналогичен ИПЭ-ИИ по функциональной схеме и оформлению.

В качестве фотоприемника в блоке используется пироэлектрический преобразователь МГ-30 со встроенным предварительным усилителем (диапазон длин волн 2–20 мкм, размер приемной площадки 1 × 1 мм), работающий в диапазоне внешних температур от –45 до +55 °С. Перед фотоприемником установлен модулятор, который вращается шаговым двигателем и обеспечивает стабилизированную частоту модуляции излучения 500 Гц. Плата управления двигателем позволяет уменьшать/увеличивать частоту вращения модулятора с одновременным увеличением/уменьшением чувствительности.

Сигнал с фотоприемника усиливается, оцифровывается 12-разрядным АЦП и передается в микроконтроллер, который в каждом периоде регистрирует амплитуду сигнала в момент достижения максимального значения на положительном полупериоде и минимального – на отрицательном полупериоде, вычисляет их разность и через Ethernet-контроллер передает в компьютер по кабелю № 1 (см. рис. 2). Для контроля работоспособности в блоке использован «имитатор» излучения (керамический резистор, нагреваемый в режиме «имитатор» от источника питания). Выбор режима «имитатор – измерение» производится дистанционно оператором в программе. Резистор установлен под углом к МГ-30 и не перекрывает поле зрения. Одновременно в измерительном блоке ИПЭ-НИ формируется импульс синхронизации, пропорциональный общей длительности измерения, который используется для запуска и остановки внешних устройств. Меню измерителя аналогично меню ИПЭ-ИИ.

### Методика калибровки измерительных блоков

Калибровка ИПЭ-ИИ выполнена с импульсно-периодическим лазером LF 117, длина волны 1,064 мкм, частота следования импульсов 10 Гц, длительность импульса 10–14 нс, средняя энергия задается оператором по данным паспорта. Излучение направлялось на отражающий экран. Размер пучка на экране не превышал 7 мм. Расстояние от экрана до фотоприемника 40 см. Данные с измерительного блока передавались и регистрировались в ПК в течение 1–2 с. Затем измерялась средняя энергия излучения промышленным измерителем мощности/энергии NOVA II с измерительной головкой PE50BB-DIF (диаметр входного окна 20 мм), которая устанавливалась перед окном измерительного блока. Измерения проводились поочередно при каждом изменении энергии лазера.

Калибровка ИПЭ-НИ выполнена с применением модели абсолютно черного тела АЧТ-45/100/100. Диаметр выходного отверстия АЧТ 45 мм, коэффициент излучения полости 0,97, диапазон температур 300–1100 °С, погрешность поддержания температуры 0,5 °С. При измерениях поддерживалась температура 1100 °С. Излучение направлялось на фотоприемник измерительного блока. Данные с блока передавались и регистрировались в ПК. Каждая запись измерительным блоком сопровождалась измерением плотности мощности в пучке измерительной головкой NOVA II. Плотность излучения изменялась путем увеличения расстояния между АЧТ и блоком.

### Результаты калибровки

Результаты калибровки ИПЭ-ИИ приведены на рис. 7, а, ИПЭ-НИ – на рис. 7, б. Прямые на рис. 7 рассчитаны методом наименьших квадратов;  $r$  – коэффициент корреляции;  $Sd$  – среднеквадратическое отклонение для измерений ИПЭ-ИИ и NOVA II.

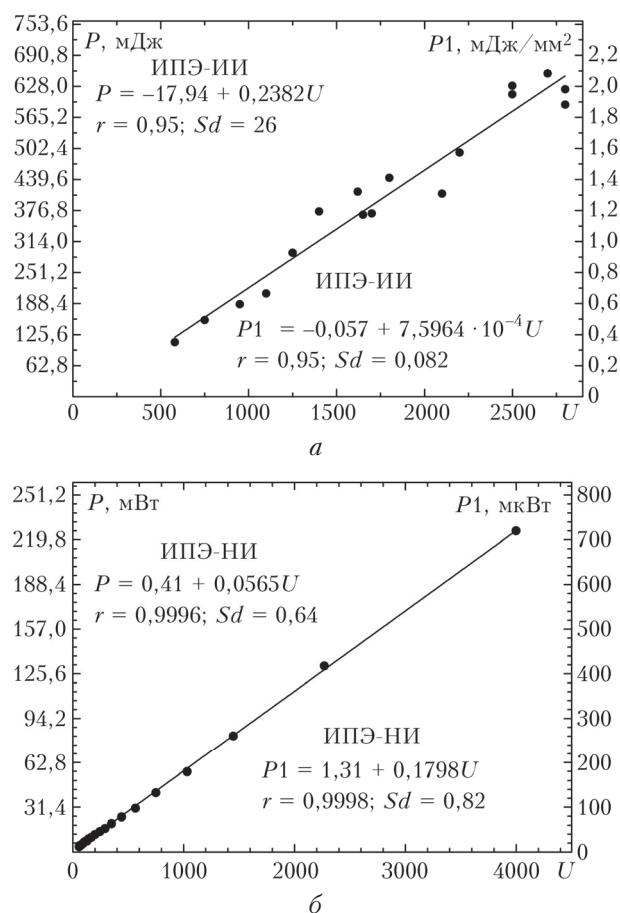


Рис. 7. Результаты сравнения средней плотности энергии в импульсе (мДж)/мощности (мВт) лазерного излучения  $P$ , измеренной NOVA II и ИПЭ-ИИ (а), ИПЭ-НИ (б) в единицах разряда АЦП ( $U$  – амплитуда сигнала, пропорциональная плотности излучения). Правая шкала  $P1$  – измеренная плотность энергии на единицу площади в импульсе мДж/мм<sup>2</sup> (а) и мощности мкВт/мм<sup>2</sup> (б)

Диапазон изменения энергии лазера, используемого при испытаниях ИПЭ-ИИ, регулировался в пределах  $P = 110\text{--}700$  мДж в импульсе, что не позволило выполнить измерения во всем диапазоне работы ИПЭ-ИИ, верхний предел которого составил 2750 ед. разряда АЦП вместо возможных 4096, нижний — 510 ед. вместо близких к нулю. Для оценки реальной плотности энергии  $P_1$ , измеренной устройством, использовалось отношение площади  $S_{\text{пр}} = 19,6 \text{ мм}^2$  фотоприемника ФП-0,5 к площади  $S_{\text{NOVA}} = 314 \text{ мм}^2$  измерительной головки NOVA II, нормированных на площадь фотоприемника:  $P_1 = (PS_{\text{пр}}/S_{\text{NOVA}})/S_{\text{пр}} = (P/S_{\text{NOVA}}) [\text{мДж}/\text{мм}^2]$ . Динамический диапазон сигнала в области измерений ( $P_{1\text{max}}/P_{1\text{min}}$ ) составил не более 16 дБ. Энергия импульса, измеренная с расстояния 100 см от экрана с коэффициентом отражения 1, составила 2,0 кДж. При длительности импульса более 20 нс регистрируется распределение во времени. Уравнение  $P = -17,94 + 0,2382U$  [мДж] позволяет рассчитать падающую на экран энергию излучения по результатам измерения фотоприемником для условий калибровки.

При калибровке ИПЭ-НИ расстояние изменялось в пределах от 26 до 216 см. Для оценки реальной плотности мощности  $P_1$ , измеренной устройством, использовалось отношение площади  $S_{\text{NOVA}} = 314 \text{ мм}^2$  измерительной головки NOVA II к площади фотоприемника МГ-30  $S_{\text{пр}} = 1 \text{ мм}^2$ :  $P_1 = (PS_{\text{пр}}/S_{\text{NOVA}})/S_{\text{пр}} [\text{мкВт}/\text{мм}^2]$ . Измеренные значения  $U$  изменялись в пределах 3919–54 ед. разряда АЦП. Пропорциональные плотности мощности и рассчитанные с учетом площадей значения  $P_1 = 719\text{--}11 \text{ мкВт}/\text{мм}^2$ . Минимальный уровень ограничен возможностями головки NOVA II, максимальный — АЧТ. Динамический диапазон измерений  $P_1$  — не менее 36,3 дБ. Мощность в пучке, измеренная с расстояния 100 см от экрана с коэффициентом отражения 1, равна 11–700 Вт.

Для условий калибровки уравнения  $P = -17,94 + 0,2382U$  [мДж] и  $P = 0,41 + 0,565U$  [мВт], приведенные на рис. 7, позволяют рассчитать па-

дающую на экран энергию и мощность излучения по результатам измерения  $U$  прибором ИПЭ.

## Заключение

Разработано устройство для измерения мощности/энергии в широкоапертурных лазерных пучках, включающее два сменных измерительных блока. Блок ИПЭ-ИИ предназначен для измерения распределения энергии во времени в каждом импульсе излучения импульсно-периодического лазера с частотой 250 МГц в диапазоне длин волн 1,06 и  $2\pm 11$  мкм и энергией до  $5\pm 10$  мДж/имп.; блок ИПЭ-НИ — для измерения мощности непрерывного излучения до 100 кВт в спектральном диапазоне  $2\pm 20$  мкм и флуктуаций мощности в частотном диапазоне до 50–60 Гц. Диапазон измерений можно расширить, увеличив расстояние до экрана. Температурный диапазон работы измерительных блоков — от  $-20$  до  $+35$  °С.

1. *Каталог* ФГУП «ВНИОФИ». URL://http.www.vniiofi.ru/depart/f2/ljm.html (last access: 10.06.2018).
2. *Каталог* фирмы Ophir. 2018. URL://http.www.ophiropt.com/laser-measurement/beam-profilers/products/High-Power-Beam-Profiling (last access: 10.06.2018).
3. *Пак А.О., Кокодий Н.Г.* Измерение временных характеристик интенсивного оптического излучения // ФГУП. Наука. 2012. Т. 50, № 1. С. 137.
4. *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989. 544 с.
5. *Аксенов В.П., Банах В.А., Валуев В.В., Зуев В.Е., Морозов В.В., Смалихо И.Н., Цвык Р.Ш.* Мощные пучки в случайно-неоднородной атмосфере // Под ред. В.А. Банаха. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1998. 341 с.
6. *Валуев В.В., Духин М.Н., Коняев Ю.А., Малашко Я.И., Морозов В.В., Цвык Р.Ш.* Влияние атмосферы на распределение плотности мощности и расходимость широкоапертурного пучка излучения непрерывного СО<sub>2</sub>-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 5. С. 495–498.
7. *Григорьев Б.А.* Импульсный нагрев излучением. М.: Наука, 1974. Т. 1. 320 с.

*V.A. Banakh, A.N. Kudryavtsev, V.M. Sazanovich, R.Sh. Tsvyk. Measurements of large-format laser beams.*

A device for measurements of the power/energy of large-format optical (laser) radiation beams is described. It includes two interchangeable measuring units, one for measurements of the energy in each pulse of a pulsed-periodic laser, and the second, for the continuous radiation power measurements.



Рис. 3. Выносной блок в сборе: 1 – измерительный блок; 2 – дальномер; 3 – дисплей; 3а – кнопки установки температурного режима в изделии и вывода результатов измерений; 4 – окно видекамеры; 5 – окно фотоприемника; 6 – поворотное устройство; 7 – катушка с кабелем № 1 (витая пара); 8 – блок питания измерительного блока; 9 – штатив

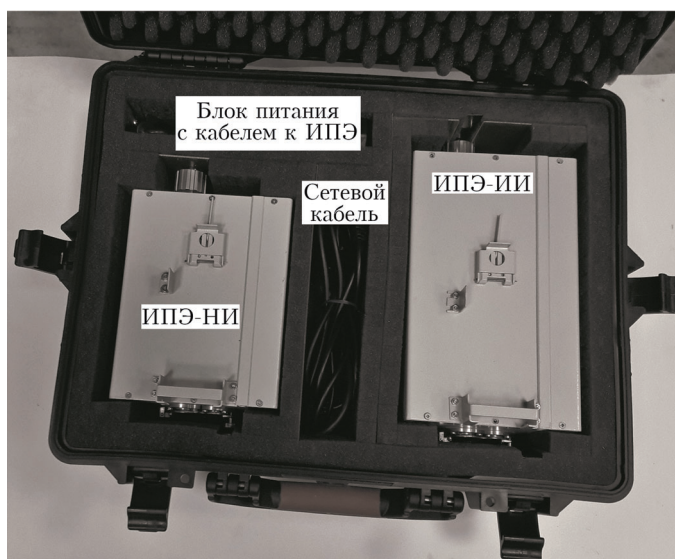


Рис. 5. Измерительные блоки в ударопрочном транспортном контейнере

Вкл./выкл. защитного интервала

Запуск/остановка измерения

Вкл./выкл. имитатора сигнала

Установка порога триггера

Установка защитного интервала

Установка предзаписи сигнала перед срабатыванием триггера

Установка длительности тестового импульса (от 1 до 256)

Температура внутри корпуса

Количество срабатываний триггера

Количество чтений из памяти

Индикатор наличия связи с прибором

Вкл./выкл. триггера

Вкл./выкл. смещения

ИЗМЕРИТЕЛЬ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ИПЭ-ИИ)

Порог триггера: 2500

Защитный интервал: 10

Пред-запись: 10

Ширина импульса: 10

Температура:

Триггер:

Чтение:

Путь:

Расстояние до экрана, см: 10  Высота прибора, см: 10  Смещение: 50

Угол, градусы: 25  Высота нижнего края экрана, см: 20

Добавить время в файл

20:43:35

Скорость приема данных, Гц

Выбор пути для записи данных

Рис. 6. Меню измерителя импульсно-периодического излучения ИПЭ-ИИ