

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

Лазерные измерения

Научно-образовательный модуль
в системе дистанционного обучения MOODLE

УДК 621.383

Автор-составитель: **Гришанов Владимир Николаевич**

Лазерные измерения [Электронный ресурс] : Научно-образовательный модуль в системе дистанционного обучения MOODLE / авт.-сост. В. Н. Гришанов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (78 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В модуле в форме конспекта лекций и тестов представлены методы измерения параметров лазерного излучения, а также затронуты вопросы грамотной эксплуатации лазерных.

Модуль предназначен для подготовки бакалавров направления 200500.62 «Лазерная техника и лазерные технологии» по дисциплине «Лазерные измерения» в 8 семестре, студентов специальности 200202.65 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике» по дисциплине «Измерение параметров и эксплуатация лазерных установок» в 10 семестре и 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы» по дисциплинам «Лазерные измерения» в 9 семестре, «Методы измерения характеристик лазерного излучения» в А семестре.

Модуль разработан на кафедре радиотехнических устройств.

КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

Возникновение отказов в лазерной установке зависит от различных факторов, определяемых как внутренними свойствами аппаратуры, так и воздействием внешних условий. Это приводит к тому, что процесс возникновения отказов, а также другие характеристики аппаратуры в процессе эксплуатации носят случайный характер. Поэтому для количественной оценки различных характеристик широко используются вероятностные методы. Все случайные величины делятся на непрерывные и дискретные. Примерами непрерывных случайных величин, которыми оперирует теория надежности, время безотказной работы, значение того или иного технического параметра и т.д. Дискретными случайными величинами являются число отказов, возникающих за определенный период работы устройства, число неисправных устройств и т.д.

Общей отличительной чертой составляющих надежности (безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости и долговечности) является их теснейшая связь со специфической случайной величиной, имеющей размерность времени. Для безотказности такой случайной величиной является время безотказной работы T (время непрерывной работы от начала до отказа или время работы между отказами). Для ремонтпригодности – время восстановления работоспособности изделия после отказа T_v (длительность ремонта). Для сохраняемости – время сохранения изделия своих технических характеристик и показателей в условиях хранения T_c . Для долговечности – время от начала эксплуатации до наступления некоторого предельного состояния T_d .

Указанное общее свойство четырех составляющих надежности определяет единство способов их количественного описания. С одной стороны, т.к. они являются случайными величинами, то описываются либо соответствующими функциями распределения или функциями плотности распределения. С другой стороны, аргументом этих функций является время от начала эксплуатации, ремонта или хранения. Поэтому в классической теории

надежности отрицательным временам трудно придать какой-либо физический смысл и интегрирование или суммирование ведется либо от нуля, либо какого-то определенного момента времени.

Каждый закон распределения представляет собой некоторую функцию, которая полностью описывает случайную величину с вероятностной точки зрения. Однако на практике нет необходимости характеризовать случайную величину полностью, а достаточно бывает указать только отдельные числовые параметры. Такие параметры, характеризующие в сжатой форме существенные особенности распределения, называются числовыми характеристиками случайной величины. Основными числовыми характеристиками случайных величин, изучаемых в надежности, являются математическое ожидание, или среднее значение, и дисперсия.

По определению, математическим ожиданием случайной величины X с функцией плотности распределения $f(x)$ называется значение величины x , вычисляемое с помощью интеграла:

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx . \quad (1)$$

В теории надежности будет: $f(t)$ – плотность вероятности отказов, \bar{T} - среднее время безотказной работы или среднее время наработки на отказ и

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} tf(t)dt . \quad (2)$$

Дисперсия случайной величины X есть характеристика рассеяния (разбросанности значений случайной величины около ее математического ожидания):

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f(x)dx . \quad (3)$$

В теории надежности дисперсия времени безотказной работы будет определяться аналогичным выражением:

$$D_t = \int_0^{\infty} (t - \bar{T})^2 f(t) dt . \quad (4)$$

Среднее квадратичное отклонение случайной величины X есть $\sigma = D^{0.5}$, следовательно $\sigma_t = D_t^{0.5}$, и оно - σ_t - будет определять границы интервала ($\bar{T} - \sigma_t; \bar{T} + \sigma_t$), внутри которого с заданной законом $f(t)$ вероятностью будет находиться время безотказной работы единичного изделия.

Из приведенных аналогий видна процедура применения методов теории вероятностей к оценке показателей надежности аппаратуры. Теория вероятностей дает рецепты определения вида и параметров функции распределения и плотности функции распределения. Виды этих функций могут быть получены из теоретических соображений или путем обработки экспериментальных данных. Из независимости большого числа случайных влияющих факторов на результаты измерения следует гауссовский закон распределения погрешностей, из хаотичности процесса дробления однородного изотропного твердого материала следует логнормальный закон распределения частиц по размерам и т.п.

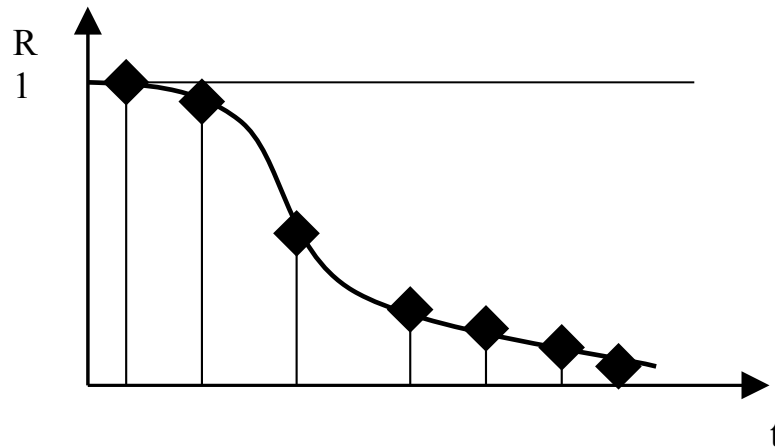
Экспериментальное определение закона распределения продемонстрируем на следующем примере. Одной из функций распределения, характеризующей безотказность изделия является вероятность безотказной работы $R(t)$. Ясно, что это будет какая-то убывающая функция (см. рис.1). Статистическим аналогом вероятности безотказной работы будет относительное количество неотказавших изделий:

$$R(t_i) = (N - n_i) / N , \quad (5)$$

где N – число изделий в начале испытаний; n_i – число изделий, отказавших к моменту времени t_i . Эта статистическая информация и является первичной, т.е. следует провести эксперимент с N изделиями, затем построить гистограмму в соответствие с (5) и, наконец, попытаться подобрать аппроксимирующую эту гистограмму эмпирическую функцию (см рис.1). Далее, теория вероятностей и ее подраздел – классическая теория надежности скорее всего позволят

определить и другие функции, характеризующие надежность, а так же и числовые характеристики надежности, что будет продемонстрировано.

Рис. 1. Зависимость относительного количества неотказавших изделий от времени



Вероятностные характеристики безотказности

Под безотказностью понимается свойство изделия или объекта сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки. Основной количественной мерой безотказности является вероятность безотказной работы $R(t)$ – вероятность того, что в пределах времени t отказ объекта не возникает. Убывающий характер этой функции доказан практикой. Если вспомнить теперь теорию вероятностей и функцию распределения случайной величины X , в частности, то она есть функция неубывающая и в пределе при $x \rightarrow \infty$ стремящаяся к единице. По обоим приведенным критериям $R(t)$ не может служить функцией распределения.

Однако можно ввести функцию $q(t)$ – вероятность отказа:

$$q(t) = 1 - R(t), \quad (6)$$

которая уже удовлетворяет вышеприведенным критериям и поэтому может служить функцией распределения (см. рис.2).

Критерием, наиболее полно характеризующим безотказность неремонтируемых простых объектов является интенсивность отказов $\lambda(t)$. Под интенсивностью отказов понимают число отказов в единицу времени, отнесенное к среднему числу элементов, безотказно работающих в данный

промежуток времени. При этом отказавшие элементы не заменяются. Из эмпирических данных эта характеристика рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \Delta n_i / (N_{cp} \Delta t_i), \quad (7)$$

где Δn_i – число отказов за промежуток времени Δt_i ; $N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2$ – среднее число работоспособных объектов; N_i – число объектов, работоспособных в начале рассматриваемого промежутка времени Δt_i ; N_{i+1} – число объектов, работоспособных в конце этого промежутка.

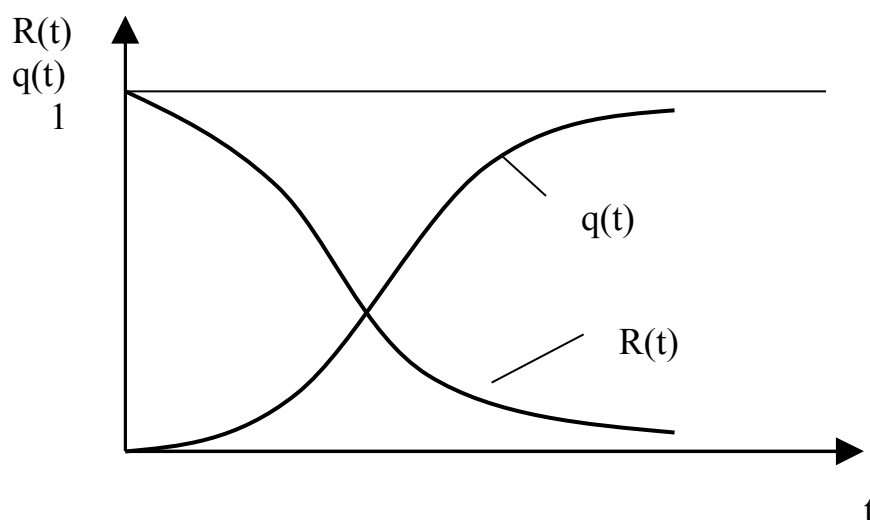


Рис. 2. Сравнение поведения функций вероятности отказа и вероятности безотказной работы

Для больших N , когда допустимо от приращений перейти к дифференциалам, на основании определения интенсивности отказов можно получить формулу связи интенсивности отказов с вероятностью безотказной работы в дифференциальной форме:

$$N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2 = N(t) = N R(t), \quad (8)$$

$$\Delta n_i / \Delta t_i = dn/dt = - [dN(t)/dt] = - N[dR(t)/dt]. \quad (9)$$

Откуда:

$$\lambda(t) = - [dR(t)/dt]/R(t). \quad (10)$$

Кривая интенсивности отказов в зависимости от времени эксплуатации t для очень большого количества однотипных элементов имеет вид, представленный на рис.3.

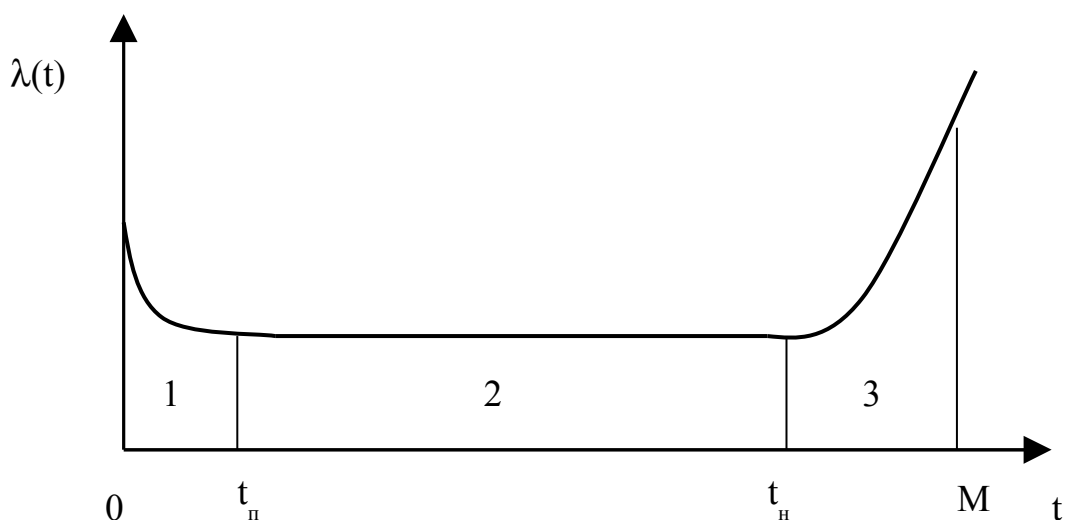


Рис.3. Кривая интенсивности отказов: 1- период приработки; 2- период нормальной эксплуатации; 3- период износа.

В момент времени $t = 0$ вводится в действие очень большое количество новых элементов одного типа. Эта совокупность элементов вначале может иметь высокую интенсивность отказов, если она содержит некоторое количество дефектных образцов, не обнаруженных выходным контролем. Поскольку эти дефектные элементы отказывают один за другим, интенсивность отказов относительно быстро уменьшается в течение так называемого периода «приработки» и становится приблизительно постоянной величиной к моменту t_p , когда дефектные детали уже отказали. Для исключения или существенного снижения интенсивности отказов в период приработки ужесточают контроль качества и проводят предварительную наработку – тренировку элементов.

Совокупность элементов, прошедших период приработки, имеет наиболее низкий уровень интенсивности отказов, который сохраняется примерно постоянным. Соответствующий период называется «периодом нормальной эксплуатации», поскольку в этот период времени элементы могут использоваться наиболее успешно. Когда время использования элементов

достигает значения t_n , начинает сказываться износ. С этого момента интенсивность отказов начинает довольно быстро возрастать. Время M является средним значением долговечности элемента с учетом износа.

Здесь следует оговориться, что кривая интенсивности отказов получена для электронных элементов. Она была получена, по крайней мере, еще до 1961 года и благополучно перекочевывает из книги в книгу без каких-либо дополнительных пояснений в плане простого заимствования либо получения дополнительных подтверждений. Электронные однотипные элементы (резисторы, конденсаторы, микросхемы и т.п.) производятся в большом количестве и используются при номинальных нагрузках в контролируемых условиях. В области механики должен значительно больше учитываться износ, и поэтому в ней лишь приближенно можно работать с постоянной интенсивностью отказов. В механике особое значение приобретает область 3 – область износа, где вместо постоянной интенсивности отказов и связанного с этим постоянством экспоненциального распределения вероятности безотказной работы используется распределения Вейбулла.

Тем не менее, поскольку немалую долю начинки ЛУ составляют электронные компоненты, рассмотрим следствия из кривой интенсивности отказов на участке «нормальной эксплуатации». На этом участке

$$\lambda(t) = \text{const.} \quad (11)$$

Откуда следует, что дифференциальное уравнение (10) есть уравнение с разделяющимися переменными, которое просто решается. Его решение с использованием начального условия $R(t=0) = 1$ приобретает вид:

$$R(t) = \exp(-\lambda t). \quad (12)$$

Это и есть закон экспоненциального убывания вероятности безотказной работы с течением времени, на основании которого и производится большинство оценок параметров надежности в классической теории надежности.

При невыполнении условия (11) общее решение дифференциального уравнения (10) может быть получено в общем виде:

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]. \quad (13)$$

Интенсивность отказов измеряется в обратных часах $[\lambda] = 1 \text{ ч}^{-1}$. Представление о порядке величины λ для радиоэлектронных компонентов можно получить из табл.1.

Таблица 1

Интенсивности отказов элементов радиоаппаратуры

Наименование элемента	Интенсивность отказов $\times 10^6$ (ч^{-1})	Наименование элемента	Интенсивность отказов $\times 10^6$ (ч^{-1})
Резисторы проволочные мощные	0,04	Транзисторы мощные	0,5
Резисторы металлопленочные	0,004	Транзисторы маломощные	0,05
Резисторы переменные	1,4	Диоды мощные	0,5
Конденсаторы керамические	0,1	Двигатели электрические	1,0 – 10
Конденсаторы электролитические	2,0	Лампы неоновые тлеющего разряда	0,1 – 1
Конденсаторы переменные	1,0	Электронные лампы мощные	10 - 100
Генераторы импульсов высокого напряжения	1 – 10	Усилители сигналов	10

Естественно, что на основе литературных данных эта таблица может быть многократно расширена вплоть до конкретных изделий: резисторов МЛТ, конденсаторов МБМ, транзисторов КТ315 и т.п. Но из этого краткого списка видно, что радиокомпоненты, в которых используются механические подвижки (переменные) менее надежны чем постоянного номинала; мощные изделия менее надежны чем маломощные; блоки, собранные из элементов имеют меньшую надежность по сравнению с элементами их составляющими. Непосредственно для излучателей ЛУ можно сравнить надежность мощных

электронных ламп (аналог ламп накачки) и неоновых ламп тлеющего разряда (аналог активных элементов гелий-неоновых лазеров).

Продолжим экскурс в теорию вероятностей. Как уже говорилось, вероятность безотказной работы не может быть функцией распределения в отличие от вероятности отказа $q(t)$ (6). Поэтому:

$$q(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp(-\lambda t). \quad (14)$$

Производная функции распределения есть плотность распределения вероятностей:

$$f(t) = dq/dt = \lambda \exp(-\lambda t). \quad (15)$$

Функция $f(t)$ для теории вероятностей есть функция плотности распределения, а в теории надежности она называется функцией частоты отказов. Тогда, вспоминая определение (2), можно рассчитать среднее время безотказной работы для экспоненциального распределения вероятности безотказной работы:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \lambda \int_0^{\infty} t \exp(-\lambda t) dt. \quad (16)$$

Интегрируем (16) по частям:

$$u = t; \quad dv = \exp(-\lambda t); \quad du = dt; \quad v = \int \exp(-\lambda t) dt = -\exp(-\lambda t) / \lambda. \quad (17)$$

Подставляя (17) в (16), получаем:

$$\bar{T} = -t \exp(-\lambda t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = 0 - (\exp(-\lambda t) / \lambda) \Big|_0^{\infty} = 1 / \lambda. \quad (18)$$

Таким образом, среднее время наработки на отказ оказывается обратно пропорциональным интенсивности отказов.

Литература

1. Леонов А.И., Дубровский Н.Ф. Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры. М.: Легпромбытиздат, 1991. - 272 с.
2. Базовский И. Надежность. Теория и практика. – М.: Мир, 1965. – 373 с.

3. Измерения в промышленности. В 3-х кн. Кн.1. Теоретические основы/Под ред. Профоса П. – М.: Металлургия, 1990. – 492 с.

4. Кузнецов А.С. Надежность радиоловительской аппаратуры. – М.: Энергия, 1969. – 48 с.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНОЙ СЛУЖБЫ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Содержание и этапы технического обслуживания

Техническое обслуживание включает в себя следующие составляющие: а) контроль технического состояния; б) профилактическое обслуживание; в) снабжение; г) сбор и обработку результатов эксплуатации.

Контроль технического состояния проводится для оценки и сопоставления истинных значений параметров конкретной ЛУ с их номинальными значениями с учетом допусков. Если для маломощных лазеров, по сути, единственным контролируемым параметром является мощность излучения или энергия импульса излучения, то для лазерных технологических установок число контролируемых параметров может исчисляться десятками.

Основным содержанием технического обслуживания является профилактическое обслуживание, которое выполняется, как правило, в плановом порядке для поддержания ЛУ в исправном или работоспособном состоянии, предупреждения отказов при использовании по назначению и продления ее ресурса. Профилактическое обслуживание, на выполнение которого установлены сроки и время проведения, называют *регламентными работами*. Сроки и содержание регламентных работ указываются в эксплуатационной документации на ЛУ. Поэтому, выступая в роли эксплуатационников достаточно следовать сопроводительной документации, проектировщик же должен сам обосновывать содержание, сроки и время проведения регламентных работ, т.е. их тоже необходимо проектировать.

Задача проектировщика облегчается, когда в проектируемом изделии максимально используются стандартизованные или ГОСТИрованные детали и узлы, готовые блоки и приборы, т.к. при этом достаточно заимствование перечня профилактических мероприятий и регламентных работ из соответствующих первоисточников. Если в ЛУ использован серийный объектив, то в сопроводительной документации на этот объектив должно быть

указано как часто и чем удаляются загрязнения с его оптических поверхностей. Часть инструкции на объектив, посвященная профилактическим и регламентным работам и переносится в соответствующие разделы инструкции по эксплуатации ЛУ. Другой путь состоит в том, что в инструкции по эксплуатации ЛУ делается ссылка на инструкцию по эксплуатации объектива, которая в этом случае должна быть приложена к инструкции по эксплуатации ЛУ.

Снабжение предусматривает получение запасного имущества и принадлежностей (ЗИП)а, материалов, оборудования, приборов и инструментов для проведения профилактического обслуживания. Сбор и обработка результатов эксплуатации проводится для количественных оценок эксплуатационно-технических показателей за определенный период эксплуатации.

Профилактические работы предусматривают: а) внешний осмотр и чистку аппаратуры; б) контрольно-регулирующие работы; в) прогнозирование отказов; г) сезонные, смазочные и крепежные работы; д) технические осмотры; е) технические проверки.

Внешний осмотр выполняют для выявления внешних признаков возможных неисправностей, проверки правильности установки органов управления, проверки состояния элементов и монтажа. Чистка ЛУ предусматривает удаление с нее пыли, влаги и коррозии.

Наиболее трудоемкой частью профилактического обслуживания являются контрольно-регулирующие работы и тесно связанные с ними работы по прогнозированию отказов. Регулирующие работы проводятся для восстановления утраченных ЛУ свойств или работоспособности. Специфичными для ЛУ являются юстировка резонаторов и оптических систем. Именно процедура юстировки и должна вменяться в обязанность специалиста по лазерным системам или проводиться под его руководством.

Прогнозирование отказов – метод предсказания отказов, который основывается на предположении, что возникновению отказов предшествует

постепенное изменение параметров ЛУ в целом или ее элементов, т.е. прогнозировать можно лишь постепенные отказы. Например, одно и тоже значение энергии импульса излучения на установке «Квант-15» удается получать при все большем значении зарядного напряжения на накопителе. Тут можно прогнозировать скорую замену ламп накачки.

Сезонные, смазочные и крепежные работы проводятся в целях подготовки ЛУ к эксплуатации в определенное время года, обеспечения работоспособности соответствующих деталей и узлов. Сезонные мероприятия необходимы для ЛУ, эксплуатирующихся в полевых условиях. Это геодезические лазерные приборы (дальномеры, указатели направлений и т.п.), лидары и лазерные локаторы, мобильные технологические ЛУ. Так, например, предлагается мобильный лазерный технологический комплекс МЛТК-50 для резки при авариях фрагментов вышек газовых скважин при авариях (уголков, швеллеров, газовой арматуры с толщиной стенок до 20 мм). Этот мобильный комплекс представляет собой импульсно-периодический углекислотный лазер с длительностью импульсов 200 мкс, частотой следования 100 Гц и средней мощностью излучения 50 кВт. Активная среда лазера - воздух атмосферного давления с добавкой CO₂ до 5% и выводом излучения через газодинамическое окно. Прокачка активной среды осуществляется авиационным газотурбинным двигателем. Оборудование комплекса размещается на двух автомобильных полуприцепах. Время подготовки к работе после перебазирования 2...3 час. Резка производится с расстояния 50 метров от аварийной скважины. Смазочные работы предусматривают либо наполнение (смазка направляющих в лазерном технологическом комплексе "Трумпф" масляным туманом) либо периодическую смену масла в картерах оптико-механических агрегатов, набивку подшипников и смазку направляющих и шарниров. Крепежные работы включают проверку крепежных деталей (болтов, гаек, шплинтов, шпилек и др.), их крепления, постановку и смену неисправных деталей.

Для систематического контроля за техническим состоянием ЛУ проводят *технические осмотры* и *технические проверки*. Технические осмотры

осуществляют в целях проверки правильности содержания и сбережения аппаратуры, проверки работоспособности, правильности ведения технической и учетно-отчетной документации, а также укомплектованности ЗИПом. Технические проверки проводятся для определения технического состояния, работоспособности и готовности аппаратуры. Они предусматривают технический осмотр, проверку своевременности проведения регламентных работ, ремонтов и знания обслуживающим персоналом аппаратуры и правил ее эксплуатации.

Профилактическое обслуживание, как правило, включает в себя три этапа: а) профилактические работы на обесточенной аппаратуре выполняются при внешнем осмотре и чистке при сезонных, смазочных и крепежных работах и предусматривают осмотр состояния оптических элементов и монтажа, чистку и замену смазок; б) профилактические работы на включенной аппаратуре предусматривают проверку узлов и блоков в целях установки ее режимов работы, проверку работоспособности элементов и устройств, регулировку и подстройку их параметров (срабатывание блокировок на открытие, по воде и т.п.); в) профилактический контроль функционирования ЛУ предусматривает контроль работоспособности объекта в нормальных и специальных режимах, а также комплексную отладку и проверку основных параметров ЛУ в целом.

На каждом этапе обслуживания проводятся операции по поддержанию ЛУ в исправном или работоспособном состоянии. При этом профилактические и регламентные работы отличаются одна от другой уровнем обслуживания, т.е. объемом работ. При определении объема и периодичности проведения регламентных работ необходимо учитывать два противоречивых требования: с одной стороны, профилактические работы повышают надежность, а с другой, - ведут к простою и потерям. Поэтому при организации профилактических работ к ним предъявляют следующие требования: а) обеспечить поддержание параметров надежности ЛУ на требуемом уровне; б) минимизировать стоимость профилактических работ и время их выполнения; в) спланировать и

организовать проведение профилактических работ наиболее простыми методами.

Объем и периодичность выполнения профилактических работ регламентируется инструкциями по эксплуатации конкретной ЛУ. Периодичность регламентных работ назначают исходя из времени работы ЛУ или календарного срока эксплуатации.

При *временном* принципе периодичность выполнения регламентных работ определяется временем наработки аппаратуры. Такую организацию регламентных работ используют при эксплуатации авиационной и другой техники, эксплуатируемой в особых условиях. При *календарном* принципе регламентные работы проводят через определенный календарный срок независимо от того, сколько времени использовалась по назначению ЛУ в течение этого срока. Сроки могут быть от ежедневных (редко) до годовых, а сами работы различаются по объему по принципу: меньше срок - меньше объем.

При планировании профилактических мероприятий необходимо учитывать способ использования аппаратуры. По способу использования ЛУ можно разделить на три группы: а) аппаратура разового действия; б) непрерывно работающая аппаратура; в) дежурная аппаратура.

Аппаратура разового действия используется по своему назначению только один раз (аппаратура ракет, шаров-зондов и т.п.). Для такой аппаратуры характерны следующие режимы работы: а) хранение; б) подготовка к использованию по назначению; в) использование по назначению. Поэтому все виды профилактического обслуживания проводятся лишь в первых двух режимах работы. Если обнаруживаются отказы, то ЛУ восстанавливают ремонтом или заменой.

Непрерывно работающая аппаратура используется по своему прямому назначению часть суток или полные сутки до тех пор, пока в ней не проявятся повреждения или отказы. К этому типу относится большинство лазерных установок как технологического, так и измерительного назначения.

Дежурная аппаратура используется по своему назначению непродолжительное время, причем момент подачи заявки или команды на ее использование является случайным. В остальное время аппаратура работает в облегченном режиме или вообще выключена. Примером могут служить лазерные маяки и системы посадки при плохой видимости.

Периодичность и продолжительность профилактических работ

Как уже отмечалось, по характеру изменения параметров до момента возникновения отказа, отказы делятся на внезапные и постепенные. Появление внезапных отказов представляет собой простейший поток случайных событий, поэтому прогнозировать их не представляется возможным, их устраняют по мере возникновения. По мере изучения причин возникновения внезапных отказов они могут быть переведены в разряд постепенных. Этому способствует и развитие диагностической составляющей ЛУ. Оснащение ЛУ компьютеризированными системами контроля все большего числа параметров позволяют минимизировать количество внезапных отказов (датчики температуры силовых электронных приборов, датчики чистоты смазочных материалов, датчики и анализаторы акустических сигналов, датчики загрязнения поверхностей силовой оптики и т.п.).

Постепенные же отказы возникают в результате постепенного изменения параметров аппаратуры, что позволяет прогнозировать и предотвращать их профилактическими мероприятиями при проведении технического обслуживания. При выборе значения периода выполнения профилактических работ необходимо иметь в виду, что при сокращении периода между техническими обслуживаниями повышается надежность за счет своевременного проведения контрольно-регулирующих работ. Однако при этом увеличивается объем и общее время профилактики в течение года, что приводит к уменьшению коэффициента технического использования ЛУ. Таким образом, можно постулировать существование оптимального значения периода выполнения профилактических работ, при котором обеспечивается лучшее соотношение между надежностью и объемом профилактики.

Здесь как раз и возникает задача перед инженерными службами в оценке этого оптимального значения периода профилактики. Решение этой задачи требует привлечения математических моделей иногда довольно сложных и выбора параметра, по которому будет производиться оптимизация. Например, если оптимизируемым параметром выбран коэффициент простоя, то он достигает минимума при значении периода между профилактиками $\tau_{т.о.}$, определяемого соотношением: $\tau_{т.о.} = (2T_{т.о.}/\lambda)^{0,5}$, где $T_{т.о.}$ – средняя продолжительность технического обслуживания, а λ – интенсивность потока постепенных отказов.

Комплектация лазерной установки запасным имуществом и принадлежностями

Одним из основных условий успешного проведения технического обслуживания и повышения ремонтпригодности является обеспечение ЛУ необходимым комплектом запасных имущества и принадлежностей (ЗИП). Комплект ЗИПа должен содержать все необходимые в процессе эксплуатации элементы. Иногда отсутствие необходимых элементов в комплекте ЗИПа намного увеличивает время ремонта аппаратуры. Особенного внимания требует комплектация ЗИПа ЛУ оптическими элементами, т.к. механические (винты, стойки, оправки и т.п.) и электронные компоненты (транзисторы, микросхемы, вплоть до ПЭВМ) ЛУ не отличаются своей специфичностью и могут быть оперативно приобретены либо изготовлены при наличии токарного и фрезерного станков. Производство же оптических элементов даже в такой крупной и промышленно развитой стране как Россия сосредоточено всего на десятке предприятий. Скорее всего, за оптическими элементами, вышедшими из строя, придется обращаться на предприятие - изготовитель ЛУ. Однако создание чрезмерных размеров ЗИПа экономически нерационально, т.к. при этом замораживаются огромные средства и дефицитные элементы.

ЗИПы разделяются на комплекты: одиночный и групповой. Одиночный комплект придается определенному изделию и предназначается для

обеспечения только данного изделия, а групповой комплект придается группе изделий и предназначается для пополнения одиночного комплекта ЗИПа и обеспечения изделий теми элементами, которых нет в одиночном комплекте.

Обеспеченность аппаратуры ЗИПом существенно влияет на коэффициент ее готовности, который часто и выступает в качестве критериального параметра для оценки необходимой обеспеченности ЛУ ЗИПом. Определение комплекта ЗИПа на основании эксплуатационно-технической модели ЛУ также входит в задачи инженерной службы технической эксплуатации.

Организация технической эксплуатации

Организация эксплуатации ЛУ с позиций обеспечения их высокой надежности и эффективности требуют комплексного решения задач из области психологии, физиологии и гигиены труда. Указанные проблемы решает инженерная психология – наука, изучающая объективные закономерности процессов информационного взаимодействия человека и техники для использования их в практике проектирования и эксплуатации системы человек-машина (СЧМ). Рассмотрим инженерные мероприятия по оптимизации взаимодействия СЧМ. В первую очередь – это проектирование и построение рабочих мест операторов.

Под рабочим местом оператора понимается зона его трудовой деятельности в системе человек-машина, оснащенная техническими средствами и вспомогательным оборудованием, необходимым для осуществления функций контроля, управления, технического обслуживания и ремонта. Правильная организация условий труда предполагает рациональную планировку оборудования и размещения постоянного рабочего места персонала с учетом психофизиологических характеристик и антропометрических данных, обеспечение безопасности работы и нормальных окружающих условий. Конечной целью организации рабочего места является оптимизация трудовой деятельности, обеспечивающая максимальную надежность техники и эффективность работы оператора.

При организации рабочего места должны быть соблюдены следующие условия: а) достаточное рабочее пространство для оператора, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения при эксплуатации и техническом обслуживании; б) оптимальное размещение рабочих мест и оборудования, входящего в состав рабочего места, а также безопасные и достаточные проходы для оператора; в) допустимый уровень акустического шума, вибраций и других факторов производственной среды; г) необходимое естественное и искусственное освещение; д) наличие необходимых инструкций и предупредительных знаков, предостерегающих об опасностях; д) надежная индикация и протоколирование отказов.

Существенное влияние на работоспособность человека оказывают температура (18 – 24° С), влажность (30 – 60%) и газовый состав воздуха.

Первым трем условиям современные ЛУ, введенные в эксплуатацию, удовлетворяют практически автоматически. При несоблюдении их они либо просто не будут работать, либо не будут обеспечивать точность. Условия г) и д) тоже, как правило, выполняются на ЛУ, т.к. они перекликаются с требованиями лазерной техники безопасности, на нарушение которой руководство подразделения, как правило, не идет, т.к. это влечет уголовную ответственность.

Литература

1. Леонов А.И., Дубровский Н.Ф. Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры. М.: Легпромбытиздат, 1991. - 272 с.
2. Красюков А.Г. Лазерный луч на аварийной газовой скважине//Лазер-информ. - 2001. - № 3-4. - С. 4 - 6.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение

Измерение – это нахождение значения физической величины опытным путем с требуемой точностью в заданных условиях с помощью специальных технических средств.

Физическая величина – это характеристика одного из свойств физического объекта, физической системы, явления или процесса, общая в качественном отношении многим физическим объектам, но в количественном отношении индивидуальная для каждого объекта.

Индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что значение величины или размер величины может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого. Материальный объект в виде физической системы обычно описывается заданием значений многих физических величин, и в зависимости от поставленной задачи из них выбирают ту, которую необходимо измерить.

Размер физической величины – это количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

Основным материальным объектом, изучаемым в рамках дисциплины «Измерение параметров и эксплуатация лазерных установок», является лазерное излучение. Оно характеризуется энергией и мощностью излучения, средней длиной волны, длиной когерентности, расходимостью и т.п. Излучение лазеров разных типов, а также разных экземпляров лазеров одного типа можно и необходимо сравнивать по размерам вышеперечисленных физических величин. Приемы, которые используются при сравнении, и будут изучаться.

Непосредственное сравнение размеров какой-то физической величины двух или нескольких лазеров имеет ограниченное применение. Большую

ценность имеет измерение физической величины, т.е. определение ее значения.

Значение физической величины – это оценка размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Значение физической величины получают в результате ее измерения или вычисления в соответствии с основным уравнением измерения

$$Q = n /Q/, \quad (1)$$

где Q - значение физической величины; n - числовое значение измеряемой величины в принятой единице; $/Q/$ - выбранная для измерения единица.

Если указать, что мощность излучения неодимового твёрдотельного лазера ЛТН-102А в 4 раза больше мощности излучения неодимового лазера ЛТН-102Б, то этим будут определены размеры физической величины этих двух лазеров по отношению друг к другу и только. Однако приведенное в технических характеристиках значение мощности излучения лазера ЛТН-102 – 100 Вт, позволяет оценить его технологические возможности.

До недавнего времени понятия «физическая величина» считалось достаточным для постановки и решения всех измерительных задач. Однако из-за расширения области применения измерений и ужесточения требований к их точности и достоверности, понятие «физическая величина» перестало удовлетворять потребности в экспериментальном определении различных свойств объектов измерений. При планировании современных измерений стало необходимым введение более конкретных понятий, определяемых целями измерений, чем весьма общее понятие «физическая величина». В настоящее время под измеряемой величиной понимается параметр или функционал параметров модели объекта измерения, отражающий то его свойство, количественную оценку которого необходимо получить в результате измерений.

Объект измерений – это реальный физический объект, свойства которого характеризуются одной или несколькими измеряемыми

физическими величинами. Он обладает многими свойствами и находится в многосторонних и сложных связях с другими объектами. Субъект измерения – человек – принципиально не в состоянии представить себе объект целиком, во всем многообразии его свойств и связей. Вследствие этого взаимодействие субъекта с объектом при проведении измерений возможно только на основе математической модели объекта.

Модель объекта измерения строится в общем виде до выполнения измерения в соответствии с решаемой задачей на основе априорной информации об объекте и условиях измерения. Погрешность, обусловленная несоответствием модели объекту измерения не должна превышать 10% предела допустимой погрешности измерения. Приведенный ниже пример иллюстрирует это положение.

Рассмотрим измерение мощности излучения одномодового непрерывного гелий-неонового лазера с диаметром пучка по уровню мощности 0,86 на выходе из излучателя $D_{0,86} = 2$ мм и энергетической расходимостью тоже по уровню мощности 0,9 $\theta_{0,86} = 1$ мрад измерителем мощности лазерного излучения типа ИМО-2Н, имеющим относительную погрешность измерения мощности 6% и входную апертуру $A = 12$ мм. В последующем изложении уровень мощности, по которому определялись параметры пучка, в целях компактности обозначений опущен. На расстоянии L от выходного окна лазера (рис. 1) пучок будет иметь диаметр D_1 :

$$D_1 = D + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\theta/2) \approx D + L \cdot \theta. \quad (2)$$

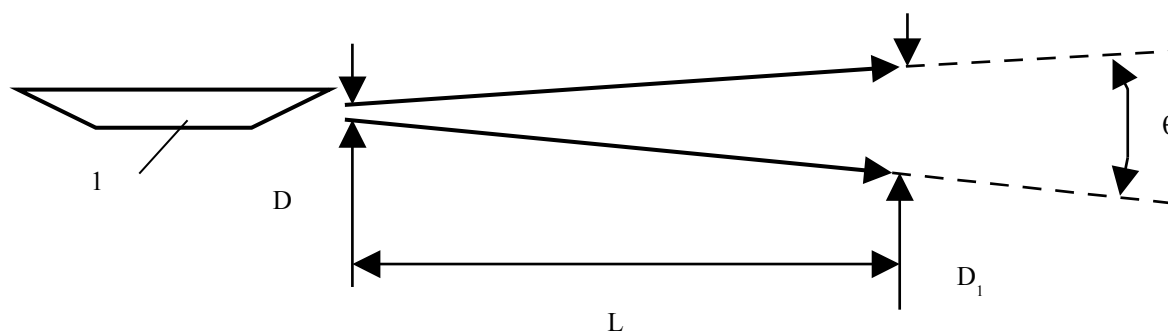


Рис. 1. К расчету диаметра пучка: 1- лазер

Вывод выражения (2) опирается на модель распространяющегося пучка в форме усеченного конуса. Справедливость перехода от строгого равенства к нестроному в выражении (2) также нуждается в проверке:

$$\frac{\Delta D_1}{D_1} = \left| \frac{L(2tg(\theta/2) - \theta)}{D + 2Ltg(\theta/2)} \right| < \left| \frac{2tg(\theta/2) - \theta}{2tg(\theta/2)} \right| \quad (3)$$
$$= \frac{2tg(10^{-3}/2) - 10^{-3}}{2tg(10^{-3}/2)} = 8 \cdot 10^{-8}$$

Как видно из проведенной проверки для энергетической расходимости в 1 мрад при расчете диаметра пучка вполне допустима замена тангенса его аргументом, т.к. возникающая при подобной замене относительная погрешность в оценке диаметра пучка на 7 порядков меньше относительной погрешности измерения мощности излучения прибором ИМО-2Н.

Датчик мощности и энергии излучения прибора ИМО-2Н калориметрический, вследствие чего он имеет широкий рабочий диапазон длин волн 0,33...10,6 мкм и восприимчив как к излучению горящего в газоразрядной трубке гелий-неонового лазера разряда, так и тепловому излучению перегретых по отношению к окружающей среде элементов конструкции лазерного излучателя. Поэтому измерительную головку прибора ИМО-2Н желательно располагать как можно дальше от излучателя. В данном случае ограничителем дальности расположения измерительной головки от лазерного излучателя выступает входная апертура прибора. Для оценки максимально возможного расстояния и необходимо привлечение модели одномодового лазерного пучка.

Промоделируем одномодовый пучок гауссовским распределением плотности мощности:

$$M(r) = M_0 \cdot \exp(-2 \cdot r^2/w^2), \quad (4)$$

где $M(r)$ – плотность мощности пучка на расстоянии r от его оси; M_0 – плотность мощности на оси пучка; w – радиус гауссовского пучка. Тогда отношение мощности пучка $P(r)$, которая пройдет через круглое отверстие –

ограничивающую диафрагму радиусом r , расположенную соосно с пучком и перпендикулярно направлению распространения потока излучения, к его полной мощности P_0 будет определяться отношением интегралов:

$$\frac{P(r)}{P_0} = \left(\int_0^r 2\pi r M(r) dr \right) / \left(\int_0^\infty 2\pi r M(r) dr \right). \quad (5)$$

Подставив (4) в (5), получим:

$$P(r) = P_0 [1 - \exp(-2 \cdot r^2/w^2)]. \quad (6)$$

Используя выражения (1.3) и (1.5), составим таблицу значений изменения $M(r)/M_0$ и $P(r)/P_0$ от r/w .

Таблица 1

Зависимость $M(r)/M_0$ и $P(r)/P_0$ от r/w

r/w	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$M(r)/M_0$	0,28	0,14	0,06	0,02	0,01	0
$P(r)/P_0$	0,722	0,865	0,944	0,98	0,994	0,999

Теоретически гауссовский пучок имеет крылья распределения, распространяющиеся в бесконечность и собрать весь пучок на конечной входной апертуре измерительной головки датчика невозможно. Однако, следуя выбранной модели пучка и результатам расчета, проведенным на основании этой модели, установив измерительную головку от выходного окна излучателя на таком расстоянии L , чтобы $A/D_l = r/w = 1,6$, будем иметь $P(r)/P_0 = 0,994$, т.е. погрешность, обусловленная неполным попаданием пучка во входную апертуру, будет на уровне 0,006. Это расстояние оценивается с помощью (2) следующим образом:

$$\begin{aligned} L &= (D_l - D)/\theta = [(A/1,6) - D]/\theta = \\ &= [(12/1,6) - 2]/10^{-3} = 5,5 \cdot 10^3 \text{ (мм)}. \end{aligned} \quad (7)$$

В рамках принятой при измерениях мощности излучения модели пучка измерительную головку следует располагать на расстоянии от выходного окна излучателя, не превышающем 5,5 м. В этом случае вклад неполного

попадания пучка во входную апертуру не превысит 0,006, что составит всего 10% от относительной погрешности измерения мощности излучения прибором ИМО-2Н. Скорее всего, расстояния 5,5 м окажется достаточно для пренебрежения влиянием некогерентного излучения разряда и нагретых частей излучателя на показания измерительного прибора.

В принципе, для решения вопроса о пренебрежении влиянием некогерентного излучения разряда и нагретых деталей излучателя на показания измерителя мощности также можно привлечь эмпирически верифицируемые модели. При размерах проекции излучателя на плоскость, перпендикулярную оптической оси измерительной головки ИМО-2Н, в несколько сантиметров и расстояниях от выходного окна излучателя до входной апертуры измерительной головки в несколько метров в качестве модели некогерентного излучателя целесообразно выбрать простейшую модель – модель точечного источника. Для модели точечного источника должен выполняться закон обратных квадратов, т.е. измеренное значение мощности излучения точечного источника должно уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния от измерителя до этого точечного источника.

Последнюю модель проще всего проверить эмпирически, отодвигая или придвигая измерительную головку к излучателю. В подобном эксперименте если и не удастся подтвердить закон обратных квадратов, например, вследствие малой интенсивности некогерентного излучения, то, по крайней мере, можно убедиться в малом влиянии некогерентного излучения на показания измерителя мощности.

Классификация измерений

Обоснованная классификация любых объектов представляет собой их условное группирование по заданным признакам, осуществляемое с определенной целью. При различных целях одни и те же объекты могут быть классифицированы по-разному. Целесообразность классификации измерений обуславливается удобством при разработке методик их выполнения и

обработки результатов. Для измерений предложены классификации по следующим признакам.

Классификация по общим приемам получения результатов измерений

Согласно этому признаку измерения делятся на прямые, косвенные и совместные. Целью такого деления является удобство выделения методических погрешностей, возникающих при определении результатов измерений.

Прямыми называются измерения, при которых искомое значение физической величины находят непосредственно по показаниям средства измерения. При определениях параметров лазерных установок прямыми измерениями находят энергию и мощность лазерного излучения с помощью измерителей мощности и энергии лазерного излучения (ИМО-2Н, ФПМ-01, ОСИ-СМ и т.п.), длительность импульсов, среднюю длину волны излучения. При прямых измерениях погрешность метода измерения совпадает с погрешностью средства измерения, если модель объекта измерения выбрана верно. Так для ИМО-2Н она составит 6% при условии, что практически весь пучок попадает во входное окно его калориметрического преобразователя. Если измеренное значение физической величины X , то методическая погрешность этого значения $\Delta X_{мет} = \Delta X_{си}$.

Косвенными называются измерения, при которых значение измеряемой величины находят на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. В общем случае зависимость, связывающую измеряемую величину Y и величины X_1, X_2, \dots, X_n подвергаемым прямым измерениям, можно представить в виде $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Вид этой связи определяет методику расчета погрешностей косвенных измерений величины Y , как методической, так и других.

Например, средняя плотность мощности лазерного излучения есть отношение его мощности, проходящей через некоторую площадку,

ориентированную перпендикулярно направлению распространения, к её площади. При круговой форме площадки (круговая форма – это модель. В принципе, нужно еще доказать насколько это приближение справедливо.) вид функциональной зависимости конкретизируется: $P_0 = P/S = P/(\pi r^2)$, а погрешность метода можно оценить, используя выражение:

$$\Delta P_{0\text{мет}} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_0}{\partial P} \Delta P_{\text{мет}}\right)^2 + \left(\frac{\partial P_0}{\partial r} \Delta r_{\text{мет}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{\text{мет}}}{\pi r^2}\right)^2 + \left(\frac{2P\Delta r_{\text{мет}}}{\pi r^3}\right)^2}. \quad (8)$$

В современных микропроцессорных измерительных приборах очень часто вычисления искомой измеряемой величины производится внутри прибора. (В память прибора заведен радиус диафрагмы и запрограммировано действие деления, либо ирисовая диафрагма имеет датчик радиуса раскрытия и запрограммированы действия возведения в квадрат и деления.) В этом случае результат измерения определяется способом, характерным для прямых измерений, и нет необходимости, да и возможности отдельного учета методической погрешности расчета. Она входит в погрешность измерительного прибора. Измерения, проводимые такого рода средствами измерений, относят к прямым. К косвенным относятся только такие измерения, при которых расчет осуществляется вручную или автоматически, но после получения результатов прямых измерений. При этом имеется возможность учесть отдельно погрешности расчета. Характерным примером служат измерительные системы, для которых нормированы метрологические характеристики их компонентов по отдельности. Суммарная погрешность измерений рассчитывается по нормированным метрологическим характеристикам всех компонентов системы с помощью выражений подобных (8).

Например, существует, на первый взгляд простой, метод оценки средней мощности излучения непрерывных технологических углекислотных лазеров по количеству испарившейся под действием поглощенного излучения воды. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

Вследствие большой величины коэффициента поглощения воды излучения углекислотного лазера с длиной волны 10,6 мкм оно полностью поглощается в слое воды толщиной в 0,1 мм. Коэффициент преломления воды на $\lambda = 10,6$ мкм $n = 1,2$, удельная теплоемкость воды $c = 4,19$ кДж/кг К, удельная теплота парообразования $q = 2300$ кДж/кг [42]. При нормальном падении потока излучения на поверхность воды френелевские потери на отражение составят:

$$R = [(n - 1)/(n + 1)]^2 = 0,008, \quad (9)$$

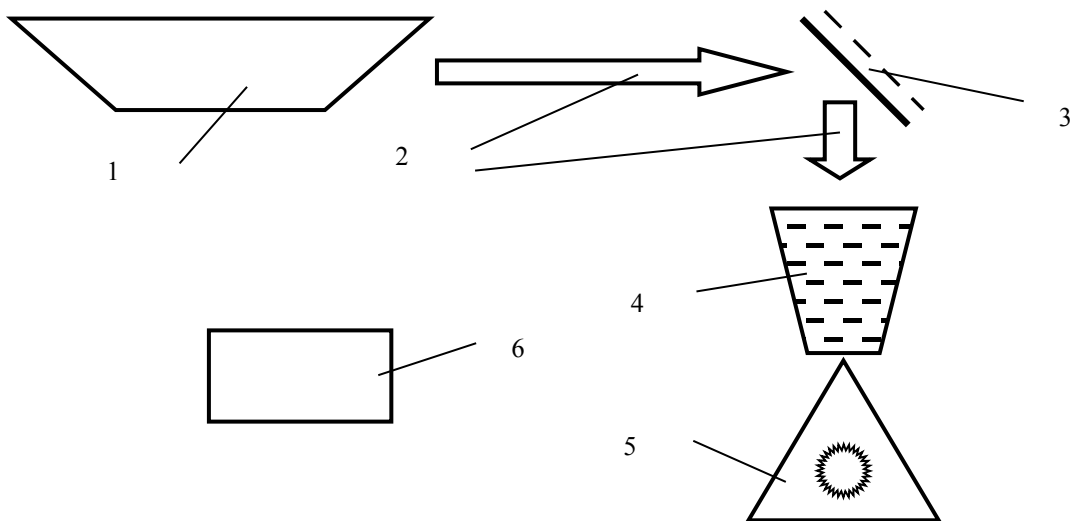


Рис. 2. Схема измерения мощности излучения углекислотного лазера по количеству испарившейся воды: 1- лазерный излучатель; 2- поток лазерного излучения; 3- зеркало; 4- сосуд с водой; 5- весы; 6- секундомер

и ими можно пренебречь. Процесс испарения поверхностного слоя воды в сосуде под действием лазерного излучения происходит настолько быстро, что за время ~ 100 с оставшаяся в сосуде вода не успевает заметно нагреться. Тогда измерив с помощью весов изменение массы воды в сосуде Δm и время t , за которое она испарилась можно оценить мощность излучения P :

$$P = (q \cdot \Delta m + c \cdot \Delta m \cdot \Delta T) / t = (q + c \cdot \Delta T) (\Delta m / t), \quad (10)$$

где ΔT – разность между температурой кипения воды (100° С) и комнатной ($\sim 20^{\circ}$ С), которую для оценок можно положить равной 100 К, т.к. вклад первого слагаемого в скобках выражения (1.9) на порядок больше второго. Для лазера киловаттного уровня мощности, т.е. для $P = 1$ кВт, за $t = 100$ с дефект массы составит $\Delta m = 37$ г:

$$\Delta m = (P \cdot t) / (q + c \cdot \Delta T) = (1000 \cdot 100) / [(2300 + 4,19 \cdot 100) \cdot 10^3] = 0,037 \text{ (кг)}. \quad (11)$$

В такой модели процесса измерения мощности формально погрешность метода оценивается выражением:

$$\Delta P = \sqrt{\left[\frac{\partial P}{\partial (\Delta m)} \cdot \Delta(\Delta m) \right]^2 + \left[\frac{\partial P}{\partial t} \cdot \Delta t \right]^2} = (q + c \Delta T) \sqrt{\frac{[\Delta(\Delta m)]^2}{t^2} + \frac{\Delta m^2 \cdot \Delta t^2}{t^4}}, \quad (12)$$

где $\Delta(\Delta m)$ – абсолютная погрешность метода измерения массы испарившейся воды; Δt – абсолютная погрешность измерения времени испарения. Для технических весов с максимально допустимой взвешиваемой массой 1 кг $\Delta(\Delta m) = 0,1$ г, а для механического секундомера $\Delta t = 0,1$ с. Подстановка этих значений в выражение (1.11) для приведенных выше значений $P = 1$ кВт, $t = 100$ с и $\Delta m = 37$ г дает величину абсолютной погрешности $\Delta P = 3$ Вт, а относительной $\Delta P/P = 0,003$.

Поскольку пренебрежение потерями на отражение (см. (9)) уже дает вклад в относительную погрешность на уровне 1%, то полученные оценки можно интерпретировать лишь в том смысле, что технические весы и механический секундомер вполне подходят для данных косвенных измерений мощности излучения. Более полный анализ предполагает учет таких источников погрешностей, как нагрев всей воды, неопределенность ее теплофизических характеристик и влияния на них атмосферного давления и т.п. Усложнение модели в плане увеличения количества факторов, влияющих на погрешность, приводят к оценке относительной погрешности в такой простой постановке эксперимента, когда используются лишь

дистиллированная вода со справочными значениями ее теплофизических характеристик, весы и секундомер, на уровне 10%. В этом случае выражение (12) правильнее назвать вкладом в погрешность метода измерения массы и времени.

Более того, если вынести из-под корня в (12) отношение $\Delta m/t$ и вспомнить (10), то:

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{m,t} = \sqrt{\left[\frac{\Delta(\Delta m)}{\Delta m}\right]^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}, \quad (13)$$

где в скобки заключены относительные погрешности измерения массы и времени. Поскольку при сохранении простоты метода $\Delta P/P \approx 0,1$, то достаточно иметь $[\Delta(\Delta m)/\Delta m] \approx (\Delta t/t) \approx 0,01$, т.е. весы с абсолютной погрешностью 0,3...0,5 г и часы с секундной стрелкой, абсолютная погрешность которых 1 с.

Совместными называются проводимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных физических величин для определения зависимости между ними. Характерным примером совместных измерений являются измерения диаграммы направленности, которая определяется как угловое распределение мощности или энергии лазерного излучения. Между совместными и косвенными измерениями есть весьма тонкие различия. Во-первых, по цели измерений. В случае диаграммы направленности результатом измерений будет функциональная зависимость между двумя величинами – углом, характеризующем направление на лазерный излучатель, (аргументом функции) и мощностью или энергией. Эта функциональная зависимость выражается в графической, например, при использовании двухкоординатного самописца, табличной (с двумя строками или столбцами) или аналитической форме. В случае измерения мощности или плотности мощности - результат есть просто число. Во-вторых, для совместных измерений принципиальна именно одновременность измерения разнородных величин, по крайней мере, аргумента и значения функции. В противном

случае измерения теряют смысл. В случае косвенных измерений, например, плотности мощности часто вполне допустимо последовательное измерение, причем в произвольном порядке, мощности и диаметра диафрагмы.

Поскольку косвенные и совместные измерения представляют собой совокупность прямых измерений, то на них необходимо остановиться подробнее. Прямые измерения подразделяются на методы: непосредственной оценки, дифференциальный, нулевой и метод замещения.

Метод непосредственной оценки состоит в том, что воздействие на вход прибора измеряемой физической величины последовательно преобразуется в показания отсчетного устройства. Значение физической величины находят по шкале прибора без каких-либо дополнительных действий со стороны оператора, кроме умножения на постоянный множитель или сложения с постоянным числом. Измерительный прибор, работающий по этому принципу, содержит либо аналоговый, либо цифровой преобразователь, выполняющий необходимые математические операции, связывающие значение измеряемой величины с положением указателя отсчетного устройства. Это наиболее распространенный метод прямых измерений. В наиболее распространенных приборах для измерения мощности и энергии лазерного излучения (ИМО-2Н, ОСИ-СМ, ФПМ-01) используется метод непосредственной оценки.

Недостатком измерительных приборов, работающих по методу непосредственной оценки, являются высокие требования к точности воспроизведения закона преобразования, особенно при изменении внешних условий (температуры, давления, вибраций, посторонних источников излучения и т.п.). Для компенсации влияния такого постоянно присутствующего фактора, как температура окружающей среды, фотодиод фотометра ФПМ-01 помещен в термостат с температурой 50°C , в расчете на то, что в рабочих условиях измерений температура не должна превышать $30...35^{\circ}\text{C}$. Трудности достижения необходимой точности растут с увеличением диапазона значений измеряемой величины.

В дифференциальном методе измеряемую величину сравнивают с мерой. Мера является составной частью прибора и может принимать ряд дискретных значений в заданном диапазоне. Очевидно, чем меньше разность между измеряемой величиной и мерой, тем меньшую погрешность вносит преобразователь. Благодаря этому измерительные приборы, работающие по дифференциальному методу, имеют существенно меньшие погрешности. Недостатками дифференциального метода является увеличение времени измерения, из-за его затрат на подбор меры и усложнения прибора введением в него мер.

Поскольку объектом измерения является лазерное излучение, то и мерой для реализации дифференциальных методов измерения должны служить реперные источники излучения, в качестве которых используются измерительные лазеры, высокостабильные светодиоды, фотометрические лампы, сцинтилляционные источники излучения и т.п. Меры излучения подбираются по требуемой мощности излучения, долговременной стабильности, спектральному диапазону, расходимости, поляризации и т.п.

Нулевой метод. Для его реализации в отличие от дифференциального, необходима мера, принимающая любые значения в заданном диапазоне значений. Физическая реализуемость такой меры является первым условием возможности создания измерительного прибора по принципу нулевого метода. Процедура измерения нулевым методом состоит в подборе такого значения меры, при котором разность между измеряемой величиной и мерой станет равной нулю. Момент равенства нулю фиксируется нуль-индикатором, а значение измеряемой величины находится по шкале отсчетного устройства меры.

При нулевом методе полностью исключается погрешность, связанная с преобразованием измеряемой величины в показание отсчетного устройства. Возможности измерительных приборов, работающих по нулевому методу, почти целиком определяются метрологическими характеристиками меры,

воспроизводящей измеряемую величину, и лишь в небольшой степени чувствительностью нуль-индикатора.

Недостаток нулевого метода – сложность создания мер, изменяющихся в заданном интервале.

Нулевой метод находит применение при измерении мощности и состояния поляризации лазерного излучения. В качестве непрерывной меры мощности излучения часто используется реперный источник излучения с оптическим клином из поглощающего стекла.

Метод замещения – это еще одна разновидность метода сравнения с мерой. Его отличие от нулевого метода состоит в том, что воздействие измеряемой физической величины замещается эквивалентным воздействием меры, которая может являться физической величиной другой природы. Метод замещения широко применяется в калориметрических и болометрических измерителях мощности излучения, когда нагрев калориметрического или болометрического датчика излучением замещается нагревом от электрического нагревателя. В данном случае мерой мощности излучения служит электрическая мощность, подводимая к нагревателю, которая легко измеряется, например, методом вольтметра и амперметра. Метод замещения находит применение не только при измерениях мощности, но при градуировке измерителей мощности и энергии лазерного излучения, как это сделано в приборе ИМО-2Н.

Классификация по отношению к изменению измеряемой величины

Все измерения делятся на статические и динамические. Целью данной классификации является возможность принятия решения о том, нужно ли учитывать скорость изменения измеряемой величины во время измерения или нет. Погрешности, вызванные влиянием скоростей изменения измеряемой величины, называются динамическими.

Статические измерения – это измерения физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения. Динамические измерения –

это измерения изменяющейся по размеру физической величины. Естественно, что ничего абсолютно постоянного в природе не существует. Поэтому признаком, по которому измерение должно быть отнесено к статическому или динамическому, является соотношение между динамической и другими составляющими основной погрешности измерений. Реальные средства измерений обладают инерционными свойствами, обусловленными особенностями используемых элементов. Свойства средств измерений в динамических режимах описываются совокупностью динамических характеристик.

Полное описание динамической модели средства измерения можно с помощью переходной, импульсно-переходной и амплитудно-фазовой частотной характеристик, связь между которыми задается преобразованиями Фурье. Амплитудно-фазовая частотная характеристика часто представляется в виде амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик. На стадии проектирования все эти характеристики оцениваются теоретически. Для реализованных средств измерения их определяют экспериментально: переходную – как реакцию на ступенчатый сигнал, импульсно-переходную – как реакцию на сигнал в виде δ -импульса и амплитудно-частотную и фазовочастотную – как реакцию на гармонические входные воздействия в требуемом диапазоне частот.

Сложное в динамическом смысле средство измерения может быть представлено совокупностью простых, хорошо изученных динамических элементов или звеньев нулевого, первого и второго порядков. Выражения их амплитудно-частотных $A(\omega)$ и фазовочастотных $\varphi(\omega)$ характеристик выглядят следующим образом:

- звена нулевого порядка:

$$A(\omega) = K_0, \quad \varphi(\omega) = 0; \quad (14)$$

- звена первого порядка:

$$A(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctg(\omega T); \quad (15)$$

- звена второго порядка:

$$A(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + (2\beta\omega/\omega_0)^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctg\left(\frac{2\beta\omega/\omega_0}{1 - \omega^2/\omega_0^2}\right). \quad (16)$$

В выражениях (14)...(16) ω - круговая частота; $K_0 = const$ - коэффициент передачи на частоте $\omega = 0$; T - постоянная времени звена первого порядка, β и ω_0 - коэффициент демпфирования и круговая резонансная частота, соответственно, звена второго порядка. Звено нулевого порядка не вносит динамических погрешностей, звено второго порядка может лишь занижать показания средства измерения, звено второго порядка при малых коэффициентах демпфирования может как завышать, так и занижать показания средства измерения, а при $\beta \geq 0,71$ также лишь занижать показания средства измерения.

В средствах измерения параметров лазерного излучения элементом, определяющим его динамическую характеристику, является фотоприемник, преобразующий падающий на него поток электромагнитного излучения оптического диапазона в электрический сигнал. Наиболее распространенные фотоприемники: фотоэлектрические (фотодиоды, фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, фотосопротивления) и тепловые (калориметры, термоэлементы, болометры, пироприемники) в динамическом плане относятся к элементам первого порядка и их передаточные характеристики описываются выражениями (15). Поэтому в технических описаниях средств измерения мощности и энергии лазерного излучения их динамические параметры выражаются в терминах: постоянная времени, время установления показаний, время реакции и т.п.

Классификация по числу измерений в ряду измерений

Данная классификация предполагает разделение измерений на однократные и многократные. Однократные измерения - это измерения,

выполненные один раз. Многократные измерения – это измерения физической величины одного и того же размера, результат которого получен из следующих друг за другом измерений, т.е. состоящий из ряда однократных измерений. Полученный при этом ряд измерений обрабатывается в соответствии с требованиями математической статистики.

Классификация по погрешностям.

По этой классификации различают равноточные и неравноточные измерения.

Равноточными называются измерения какой-либо физической величины, выполненные одинаковыми по точности средствами измерения и в одних и тех же условиях. Методики обработки равноточных и неравноточных измерений различны. Результаты неравноточных измерений обрабатывают только в том случае, если невозможно получить результаты равноточных измерений. Теория неравноточных измерений использует понятие веса измерения, суть которого сводится к тому, что более точным измерениям присваивается больший вес. Поскольку в практике обычных технических и метрологических измерений редко приходится сталкиваться с неравноточными измерениями, то: а) методику обработки результатов неравноточных измерений не рассматривается; б) методику измерений нужно проектировать или использовать такую, которая давала бы равноточные измерения. В противном случае придется покопаться в литературе и освоить методику обработки неравноточных измерений.

Погрешности

В настоящее время Международное бюро мер и весов предлагает следующее:

а) отказаться от использования таких понятий, как истинное и действительное значения измеряемой величины, погрешность, относительная погрешность, точность измерения, случайные и систематические погрешности;

б) ввести новый термин – неопределенность, как параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий рассеяние значений, которое можно приписать измеряемой величине;

в) разделение составляющих неопределенности на два типа А и В. Вновь вводимые типы неадекватны случайным и систематическим погрешностям. Разделение основано не на теоретических предпосылках, а на практических соображениях.

Неопределенности типа А могут быть оценены статистическими методами на основе многократных измерений и описываются традиционными характеристиками центрированных случайных величин – дисперсией или средним квадратическим отклонением. Неопределенности типа В могут быть оценены любыми другими методами, кроме статистических.

Единое мнение метрологов России на эти рекомендации не сформировано и они не вошли не в один нормативный документ метрологических органов России. Поэтому будем придерживаться традиционного описания погрешностей, но нужно иметь в виду, что могут встретиться и иные подходы.

Истинным называется значение ФВ, идеальным образом характеризующее свойство данного объекта, как в количественном, так и в качественном отношениях. Оно не зависит от средств нашего познания и является той абсолютной истиной, к которой мы стремимся, пытаясь выразить ее в виде числовых значений. На практике это идеальное понятие заменяется понятием «действительное значение». Действительным называется значение ФВ, найденное экспериментально и настолько близкое к истинному, что в поставленной измерительной задаче оно может быть использовано вместо него. Например, в задаче дозиметрии лазерного излучения в целях техники безопасности вполне достаточно грубых оценок мощности или энергии лазерного излучения, т.к. при сравнимости экспериментально полученного результата измерений с предельно

допустимыми значениями необходимо применение более действенных технических решений по защите обслуживающего персонала. При однократных измерениях в качестве действительного используют этот результат измерения; при многократных равноточных – среднее арифметическое значение результатов измерения. Результатом измерения называется значение ФВ, полученное путем измерения.

Погрешность результата измерения – это отклонение результата измерения от истинного или действительного значения измеряемой величины:

$$\Delta = x - x_0, \quad (17)$$

где Δ - погрешность; x – результат измерения; x_0 – действительное значение измеряемой величины.

По характеру проявления погрешности делятся на случайные, систематические, прогрессирующие (дрейф нуля, дрейф ОДН лазерного пучка) и промахи.

Случайная погрешность – это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений одного и того же размера ФВ, проведенных с одинаковой тщательностью в одних и тех же условиях. В появлении таких погрешностей не наблюдается какой-либо закономерности, кроме вероятностной. Они обнаруживаются при повторных измерениях одной и той же величины в виде некоторого разброса получаемых результатов. Случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда присутствуют в результате измерения. Описание случайных погрешностей возможно только на основе теории случайных процессов и математической статистики. В отличие от систематических случайные погрешности нельзя исключить из результатов измерений путем введения поправки, однако их можно существенно уменьшить, увеличив число наблюдений. Выбор оптимального числа

наблюдений конкретизируется целями и задачами измерительного эксперимента.

Систематическая погрешность – это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно меняющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины. Ее отличительный признак заключается в том, что она может быть предсказана, обнаружена и благодаря этому почти полностью устранена введением соответствующей поправки. В дальнейшем будем предполагать, что систематическая погрешность исключена. Характерным примером источника систематической погрешности при измерении параметров лазерного излучения является фоновое излучение, присутствующее в лаборатории. В силу линейности градуировочной характеристики большинства фотоприемников, используемых в измерителях мощности и энергии лазерного излучения, значение искомой поправки получают путем отсчета показаний прибора в отсутствие лазерного излучения. В многих приборах, оснащенных микропроцессором, систематическая погрешность, обусловленная темновым током фотоприемника вводится автоматически (спектрофотометр СФ-46).

Прогрессирующая погрешность – это непредсказуемая погрешность, медленно меняющаяся во времени. Она может быть скорректирована поправками только в данный момент времени, а далее непредсказуемо изменяется. Прогрессирующая погрешность – это понятие специфическое для нестационарного случайного процесса изменения погрешности во времени. Общая рекомендация по минимизации прогрессирующей погрешности состоит в исключении нестационарностей.

Грубая погрешность или промах – это случайная погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений; для данных условий она резко отличается от остальных результатов этого ряда, что и положено в основу ее выявления и устранения.

По способу выражения различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности.

Абсолютная погрешность – это разность между измеренным и действительным значениями ФВ. Она описывается формулой (17) и выражается в единицах измеряемой величины. Однако она не может в полной мере служить показателем точности измерений, т.к. одно и то же ее значение, например, $\Delta = 2$ мВт при $x = 2$ Вт соответствует очень высокой точности измерений, а при $x = 5$ мВт – низкой.

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности измерений к действительному или измеренному значению измеряемой величины:

$$\delta = \Delta / x_0, \quad \delta = \Delta / x. \quad (18)$$

Эта наглядная характеристика точности результата не годится для нормирования погрешности средства измерения, т.к. при изменении значений x δ принимает различные значения вплоть до бесконечности при $x = 0$.

Приведенная погрешность – это относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность средства измерения отнесена к условно принятому значению x_y , постоянному во всем диапазоне измерений или его части:

$$\gamma = \Delta / x_y. \quad (19)$$

Условно принятое значение x_y называют нормирующим. Чаще всего за него принимают верхний предел измерений данного средства измерения, применительно к которым и используется понятие «приведенная погрешность».

По месту возникновения различают инструментальные, методические и субъективные погрешности. Инструментальная – это погрешность средства измерения.

Для измерений параметров лазерных установок очень важно оценить методическую погрешность, т.к. средство измерения какого-либо параметра лазерного излучения является скорее исключением, чем правилом.

Методическая погрешность обусловлена: а) отличием принятой модели объекта измерения от модели, адекватно описывающей его свойства, которое определяется путем измерения; б) влиянием способов применения СИ; в) влиянием алгоритмов (формул), по которым производится вычисление результатов измерения (пример с оптическим измерением координат границ). Отличительной особенностью методических погрешностей является то, что они не могут быть указаны в документации на используемое СИ, поскольку от него не зависят. Их должен определять оператор в каждом конкретном случае.

Субъективная погрешность измерения – это погрешность, обусловленная погрешностью отсчета оператором показаний по шкалам средства измерения и диаграммам регистрирующих приборов. Она вызвана состоянием оператора, его положением во время работы, несовершенством органов чувств, эргономическими свойствами средства измерения. Для минимизации субъективных погрешностей измерения шкалы приборов выполняются зеркальными, отсчет показаний с которых должен производиться при совмещении стрелки прибора с ее отражением в зеркале шкалы. СИ с цифровым отсчетом практически полностью исключают субъективные ошибки.

По влиянию внешних условий различают основную и дополнительную погрешности. Основной называется погрешность средства измерения, определяемая в нормальных условиях его применения. Дополнительной называется погрешность СИ, возникающая вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения.

К числу основных влияющих величин относятся температура, влажность, уровень вибраций. От температуры зависит величина темнового тока фотоприемников, от влажности зависит величина токов утечки по

покрытиям высокоомных резисторов, межвыводное сопротивление электрических конденсаторов в устройствах выборки-хранения. В результате вибраций в фотоэлектронных умножителях и вакуумных фотоэлементах проявляется микрофонный эффект.

Существуют еще ошибки представительности, которые напрямую не связаны с инструментальными погрешностями используемых измерительных приборов и возникают из-за недостаточного знания процессов масштабирования. Иллюстрацией этого является измерение температуры помещения, которая должна быть мерой температурного поля помещения. Из-за отсутствия физически или физиологически обоснованного заданного закона чаще всего измеренная в произвольно выбранной точке местная температура объявляется температурой помещения. Подобная ситуация возникает почти всегда при измерениях, когда с помощью малого числа датчиков (часто одним датчиком) необходимо измерить среднее значение поля величин (температуры, концентрации, плотности мощности рассеянного излучения и т.п.). Ясно, что при этом большое значение получает выбор места измерения. Именно обоснование выбора координат точки измерения и может потребовать основных усилий.

Другой причиной появления ошибок представительности является не обоснованное распространение закона, вполне подходящего в нормальных условиях измерений, при выходе за границы этих условий, например, ошибочное измерение эффективного значения переменного тока или напряжения с помощью выпрямительного прибора при несинусоидальном изменении измеряемой величины. Характерно, что ошибки представительности могут появиться при использовании высококачественных измерительных приборов и что на практике эти ошибки чаще всего могут быть выявлены с трудом. Это особенно неприятно из-за того, что ошибки представительности нередко имеют значительную величину и могут многократно превышать остальные погрешности.

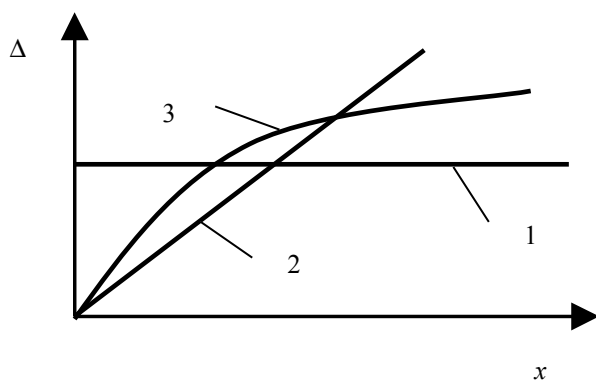


Рис. 3. Графическое представление аддитивных (1), мультипликативных (2) и нелинейных (3) погрешностей.

По зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины различают погрешности (рис. 3): а) аддитивные, не зависящие от значения измеряемой величины и наиболее часто встречающиеся (естественные фоны); б) мультипликативные, которые прямо пропорциональны измеряемой величине (дробовые шумы фотоприемников); в) нелинейные, имеющие нелинейную зависимость от измеряемой величины (обусловленные выходным сигналом фотосопротивления). Эти погрешности применяют для описания метрологических характеристик СИ.

Обработка результатов измерений

Сравнивать результаты измерений возможно только тогда, когда в них указаны как значения измеряемой величины, так и границы возможных отклонений с заданной вероятностью. Поэтому отсчет показаний по шкале измерительного прибора завершает лишь первую стадию процесса измерения, которую принято называть наблюдением.

Вторая стадия, не менее важная, состоит в установлении значения, наиболее приближающегося к истинному, и определении его возможных границ, соответствующих заданной вероятности. Эту стадию принято называть обработкой результатов наблюдений. Итогом ее оказывается результат измерения. При строгом подходе к обработке результатов измерений следует руководствоваться ГОСТами и рекомендациями по метрологии:

а) ГОСТ 8.207 – 76 ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения;

б) МИ 1317 – 86. ГСИ. Результаты и характеристики погрешностей измерений. Форма представления. Способы использования при испытании образцов продукции и контроля их параметров;

в) МИ 1552 – 86. ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений;

г) МИ 2083 – 90. ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

Общая идея, заложенная в ГОСТах и рекомендациях, состоит в том, что результат измерения должен содержать следующую совокупность сведений: а) значение измеряемой величины; б) границы возможных ее отклонений; в) вероятность, с которой определены эти границы.

Методика обработки результатов измерения разбивается на несколько этапов.

Допустим, что получен ряд неисправленных на систематическую ошибку равноточных результатов измерений ФВ x'_i , где $i = 1, 2, \dots, n$.

Первый этап обработки заключается во внесении поправок, обусловленных систематической погрешностью:

$$x_i = x'_i - g_i, \quad (20)$$

где x_i - исправленные значения; g_i – поправки. И после введения поправок x_i отягощены, во-первых случайной погрешностью, а, во-вторых, – неисключенной частью систематической погрешности, например, инструментальной. В силу того, что погрешности могут быть как аддитивными, так и мультипликативными или вообще нелинейными, то сами поправки могут зависеть от полученного значения ФВ. Это и нашло отражение введением индекса i у поправки. В случае адитивности систематической погрешности, например, фон при линейном фотоприемнике, поправка будет иметь постоянное значение для всех x'_i .

На втором этапе вычисляется среднее арифметическое значение всех x_i :

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (21)$$

которое и принимается за действительное значение измеряемой ФВ.

Далее рассчитываются среднее квадратичное значение случайной погрешности единичного измерения:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}, \quad (22)$$

и среднее квадратичное отклонение случайной погрешности среднего арифметического:

$$S_{cp.ap.} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (23)$$

Представленные выше чисто формальные процедуры не вызывают трудностей. Осложнения начинаются с указания границ возможных отклонений измеренного значения физической величины и вероятностей, с которыми определены эти границы. Подробный анализ вариантов последующих действий невозможен без углубления в теорию вероятностей, законы распределения случайных величин и т.п. Поэтому рассмотрим два предельных случая.

Пусть неисключенная систематическая относительная погрешность имеет значение θ и подчинена равномерному закону распределения на отрезке $[-\theta; \theta]$. При измерении мощности излучения прибором ИМО-2Н на пределе 30 мВт $\theta = 0,06 \cdot 30 = 1,8$ мВт и $x_{cp} = 24,73$ мВт.

Первый предельный случай состоит в превалировании неисключенной систематической погрешности над случайной. В соответствии с ГОСТ 8.207 – 76 ГСИ превалирование заключается в выполнении неравенства $(\theta / S_{cp.ap.}) > 8$. При таком соотношении погрешностей пренебрегают случайной погрешностью, и границы результата измерения принимают равными границам неисключенной части систематической погрешности θ с

доверительной вероятностью $\alpha = 1$, т.е. в данном примере результат должен быть записан в виде $(24,7 \pm 1,8)$ мВт с доверительной вероятностью $\alpha = 1$. Вероятность равная 1 является следствием предпосылки о равновероятном распределении неисключенной составляющей систематической погрешности.

Второй предельный случай состоит в превалировании случайной погрешности над неисключенной систематической при большом числе измерений $n > 30$ (в продолжение примера примем $S_{cp.ap} = 3,2$ мВт. В этом случае в соответствии с ГОСТ 8.207 – 76 ГСИ превалирование заключается в выполнении неравенства $(\theta / S_{cp.ap}) < 0,8$. Далее ГОСТ 8.207 – 76 ГСИ предписывает проводить проверку гипотезы о нормальном законе распределения случайной погрешности. Однако на практике часто этим пренебрегают, априори принимая нормальный закон распределения, в силу его всесторонней изученности и многочисленных экспериментальных подтверждений. В предположении о нормальном распределении случайной погрешности среднему квадратическому отклонению $S_{cp.ap}$ соответствует доверительная вероятность $\alpha = 0,68$, $2S_{cp.ap}$ – 0,95, $3S_{cp.ap}$ – 0,997. В ГОСТ 8.207 – 76 ГСИ рекомендуется принимать доверительную вероятность равной 0,95. В особых случаях, например при измерениях, результаты которых имеют значение для здоровья людей, допускается принимать более высокое значение доверительной вероятности. Поэтому для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ результат измерений приобретает вид (25 ± 6) мВт с доверительной вероятностью 0,95.

При меньшем числе измерений для оценки вклада случайной погрешности привлекаются коэффициенты Стьюдента.

Правила округления результатов измерений

Поскольку погрешности измерений определяют лишь зону неопределенности результатов, их не требуется знать точно. В окончательной записи результатов погрешность измерений принято выражать числом с одним или двумя значащими цифрами. Эмпирически были установлены следующие правила округления рассчитанного значения погрешности и полученного результата измерения:

а) погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной - если первая есть 3 или более (в примере - 1,8 мВт, либо 6 мВт);

б) результат измерения округляется до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности (в примере – 24,7 мВт, либо – 25 мВт);

в) если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остальные цифры числа не изменяются. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются;

г) если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу;

д) если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны или являются нулями, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная;

е) округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним или двумя лишними знаками. Для наших занятий условимся проводить вычисления с двумя лишними знаками.

Если руководствоваться этими правилами округления, то количество значащих цифр в числовом значении результата измерений позволяет ориентировочно судить об их точности. Это связано с тем, что предельная погрешность, обусловленная округлением, равна половине последнего разряда результата измерения.

Литература

1. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
2. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. Карманная энциклопедия студента. – М.: Логос, 2001. – 376 с.
3. Основные термины в области метрологии: Словарь-справочник / Под ред Ю.В.Тарбеева. – М.: И-во стандартов, 1989. – 113 с.
4. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьева и Е.З.Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
5. Иващенко П.А., Калинин Ю.А., Морозов Б.Н. Измерение параметров лазеров. - М.: И-во стандартов, 1982. - 168 с.
6. Измерения в промышленности. В 3-х кн. Кн.1. Теоретические основы/Под ред. Профоса П. – М.: Металлургия, 1990. – 492 с.

ЛАЗЕР КАК ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЙ

ГОСТ 15093 - 90 Лазеры и устройства управления лазерным излучением. Термины и определения определяет лазер как генератор когерентного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, основанный на использовании индуцированных переходов. Под оптическим диапазоном понимается диапазон длин волн от 10^{-9} до 10^{-3} м (10 нм - 1 мм). Вышеназванный ГОСТ для каждого понятия устанавливает один единственный термин и применение терминов-синонимов стандартизованного термина не допускается. Так с введением этого ГОСТа с 010.01.92 не допускается, по крайней мере, в проектной и другой технической документации, использование термина оптический квантовый генератор. Те же замечания относятся и к терминам, определяющим параметры лазерного излучения, т.к. существует ГОСТ 24453 - 80. Измерение параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин.

Качество работы лазера, как источника когерентного излучения, определяют по энергетическим, спектральным, пространственно-временным характеристикам и параметрам когерентности и поляризации. Если обратиться к ГОСТ 24453 - 80. Измерение параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин, то в нем нашли определение 42 параметра лазерного излучения, причем параметры поляризации не вошли в этот список, а должны заимствоваться из ГОСТов 7601-78 и 23778-79. К этой полусотне параметров следует добавить еще параметры, характеризующие лазерную установку в целом: электрические, шумовые, вибрационные и т.п. Поскольку нельзя объять необъятное, то в первую очередь будут рассмотрены вопросы измерения параметров лазерного излучения, причем параметров, определяющих целесообразность и эффективность использования лазеров в устройствах и системах различного назначения, включая принятие необходимых и достаточных мер по их безопасной эксплуатации. Таким образом, с одной стороны, нужно представлять себе, что система параметров, характеризующих лазерную

установку может быть довольно обширной, но существует нормативная и техническая литература, которая позволит разобраться с параметрами любой лазерной установки.

Для специалистов по лазерным системам в первую очередь важны параметры лазерного излучения, но и из них в силу ограниченности времени, выделяемому на изучение дисциплины, отобраны лишь те, которые в обязательном порядке указываются в паспортах и технических описаниях и которые позволяют, что немаловажно, оценить класс лазерной опасности установки. Кроме того, выбранная для подробного изучения совокупность параметров лазерного излучения составляет необходимый минимум для проектирования оптико-электронной части лазерных систем.

В рамках курса предстоит изучить методы измерения следующих параметров: а) мощности и энергии; б) относительного распределения плотности мощности в поперечном сечении пучка; в) расходимости и диаметра лазерного пучка; г) длительности и формы импульсов лазерного излучения; д) длины волны и частоты лазерного излучения.

В соответствие с ГОСТ 24714 – 81. Лазеры. Методы измерения параметров излучения. Общие положения. – М.: И-во стандартов, 1981 измерения параметров лазеров проводят в нормальных климатических условиях: а) окружающая температура $25 \pm 10^\circ \text{C}$; б) относительная влажность 45...80%; в) атмосферное давление $(840...1060) \cdot 10^2 \text{ Па}$, если иные условия не указаны в нормативно-технической документации (НТД) на конкретные типы лазеров. Параметры режима накачки лазеров при измерениях должны соответствовать указанным в НТД. Интервал времени от включения лазера до начала измерений также должен соответствовать указанному в НТД. Исследуемый лазер и все элементы измерительной установки, на которые должно падать лазерное излучение должны быть жестко закреплены на прочном основании, например, на оптической скамье или оптическом столе, при необходимости амортизируемом для исключения влияния вибраций на результаты измерения, если другие условия не установлены в стандартах или

НТД. Естественно, что все средства измерений, входящие в измерительную установку, должны быть предварительно поверены или аттестованы и должны быть соблюдены требования техники безопасности при работе с лазерами.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Мощность и энергия входят в группу энергетических параметров и чаще всего оцениваются посредством прямых измерений.

У непрерывных лазеров характерными энергетическими параметрами являются мощность лазерного излучения P и средняя мощность лазерного излучения $P_{\text{ср}}$. Последняя определяется как среднее значение мощности неизменного (в смысле немодулированного) непрерывного или импульсно-модулированного лазерного излучения за заданный интервал времени. Инструментальное различие между P и $P_{\text{ср}}$ состоит в том, что при $\tau_{\text{си}} < \tau_{\text{л}}$ мы измеряем P , а при $\tau_{\text{си}} > \tau_{\text{л}}$ - измеряем $P_{\text{ср}}$. К параметрам мощности лазерного излучения и средней мощности лазерного излучения примыкает относительная нестабильность мощности непрерывного лазерного излучения s , которая определяется как относительное среднее квадратичное отклонение мощности непрерывного лазерного излучения от ее среднего значения за определенный интервал времени.

У лазеров, работающих в импульсном режиме, обычно нормируют энергию импульса $W_{\text{и}}$. Для лазеров импульсно-периодического режима дополнительно нормируется средняя мощность $P_{\text{ср}}$, при модуляции добротности резонатора и при синхронизации мод нормируется максимальная $P_{\text{и.мах}}$ или средняя мощность импульса $P_{\text{и.ср}}$.

Развитие лазерной техники идет по пути увеличения выходной мощности и энергии лазерного излучения и освоения новых участков спектрального диапазона. Если 1,5...2 десятилетия назад в лазерной технологии применялись исключительно углекислотные и неодимовые лазеры, то в настоящее время встречаются и лазеры на парах меди, и мощные полупроводниковые лазеры, эксимерные лазеры и др. С другой стороны, всегда существовала потребность в измерении энергетических параметров лазерного излучения малого уровня, например, уровней отраженных сигналов в лазерной дальнометрии, в лазерных

системах связи, в лазерных измерительных системах и т.п. В результате динамический диапазон измеряемых мощностей лазерного излучения простирается от пиковатт до десятков киловатт, а энергий – от долей пикоджоуля до десятков тысяч джоулей в широком диапазоне длин волн 10 нм - 1 мм. Этим и обусловлено разнообразие методов и приборов, предназначенных для измерения энергетических параметров лазерного излучения. В дополнение следует иметь ввиду, что измерители мощности и энергии лазерного излучения являются составными элементами установок для измерения многих других параметров лазерного излучения: пространственно-временных, спектральных и поляризационных.

Методы измерения энергетических параметров сводятся к преобразованию энергии излучения при взаимодействии с веществом в другой вид энергии, удобный для последующих преобразований и измерений. Конечным итогом энергетических преобразований чаще всего является электрический сигнал. Широко распространены методы, основанные на преобразовании энергии лазерного излучения непосредственно в энергию электрического тока (фотоэлектрический метод), в тепловую энергию (тепловой метод), в механическую энергию (пандемоторный метод).

Наряду с перечисленными в ГОСТ 24453 - 80. Измерение параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин вошли люминесцентный, фотохимический, фотографический методы и метод нелинейных оптических эффектов, а также разновидность фотоэлектрического метода - метод счета фотонов.

Структурная схема средства измерения мощности или энергии - ваттметра или джоульметра лазерного излучения содержит приемный (первичный) преобразователь 1, измерительное 2 и отсчетное или регистрирующее устройства 3 (рис. 1). Термин "джоульметр" не прижился в русском языке, поэтому чаще говорят об измерителе энергии лазерного излучения. В приемном преобразователе энергия лазерного излучения преобразуется в другие виды энергии доступные для дальнейшего

преобразования и измерения. Именно тип приемного преобразователя и положен в основу классификации методов измерения мощности и энергии лазерного излучения.

Измерительное устройство осуществляет преобразование выходного сигнала приемного преобразователя в сигнал, подаваемый на отсчетное или регистрирующее устройство. В простейшем случае оно представляет собой усилитель электрического напряжения и может вообще отсутствовать, например, в измерителе энергии по количеству испарившейся воды. Отсчетное или регистрирующее устройство служит для считывания или регистрации значения измеряемой величины в аналоговой или цифровой формах.

Первичные преобразователи энергии лазерного излучения могут быть поглощающего (рис. 1) или проходного (рис. 2) типов. Путем использования ответвителя при достаточной чувствительности СИ первичный преобразователь поглощающего типа превращается в преобразователь проходного типа (рис. 3). Погрешность значения коэффициента ответвления увеличивает основную погрешность СИ. Тем не менее, СИ с первичным преобразователем проходного типа являются необходимой составной частью лазерных установок и метрологических систем.



Рис. 1. Структурная схема измерителя мощности или энергии лазерного излучения поглощающего типа: 1- лазерное излучение; 2- приемный преобразователь; 3- измерительное устройство; 4- отсчетное устройство

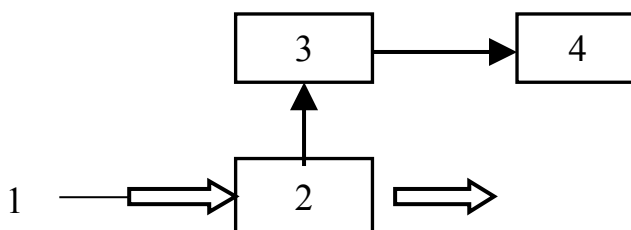


Рис. 2. Структурная схема измерителя мощности или энергии лазерного излучения проходного типа: 1- лазерное излучение; 2- приемный преобразователь; 3- измерительное устройство; 4- отсчетное устройство

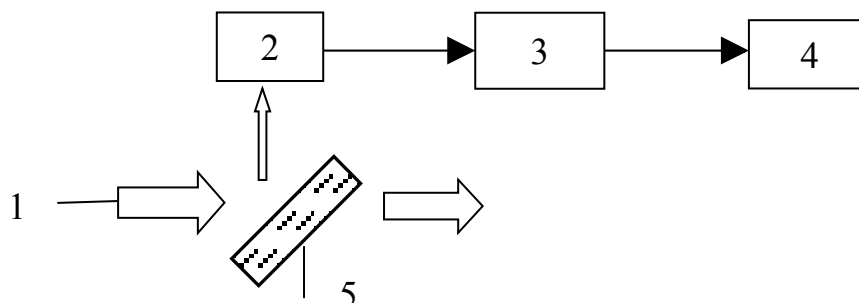


Рис. 3. Преобразование измерителя мощности или энергии лазерного излучения поглощающего типа в измеритель проходного типа: 1- лазерное излучение; 2- приемный преобразователь; 3- измерительное устройство; 4- отсчетное устройство; 5- светоделитель или ответвитель

В видимом и ближнем ИК диапазонах спектра, для которых существуют высокопрозрачные материалы с долговременной стабильностью свойств, роль ответвителей выполняют пластины из подобных материалов. Во избежание влияния многократных отражений пластинам придают форму клина с углом $1...5^\circ$. На длине волны излучения лазеров на углекислом газе $10,6 \text{ мкм}$ в высокоинтенсивных пучках ответвителем служит сканируемый по поперечному сечению пучка отражающий или рассеивающий элемент. Кроме того, схема, представленная на рис. 3, находит широкое применение при проверке средств измерения мощности или энергии лазерного излучения. Схемы, изображенные на рис. 2 и 3, часто являются элементами систем автоматического регулирования мощности или энергии лазерного излучения.

В современных измерителях мощности или энергии лазерного излучения проходного типа ответвляется на приемный преобразователь не более 2% мощности первичного пучка.

Для СИ мощности и энергии лазерного излучения нормируются: а) диапазон измерений и пределы измерений; б) рабочий диапазон длин волн - это

интервал длин волн измеряемого излучения, для которого нормированы допускаемые погрешности СИ (Иногда нормируют отдельные фиксированные рабочие длины волн. Особенно часто это делают для наиболее распространенных длин волн лазерного излучения, таких как 0,633, 0,694, 1,06, 10,6 мкм.); в) размеры входного окна; г) максимально допустимое значение локальной плотности мощности или энергии на входе СИ, так как превышение этих максимально допустимых значений может вызвать необратимые повреждения первичных преобразователей, например поглощающего покрытия; д) погрешности измерения; е) время установления показаний - это интервал времени с момента подачи измеряемого сигнала на вход СИ до того момента, когда разность между показанием отсчетного устройства и его установившимся значением окажется меньше нормированного.

Относительные погрешности измерения абсолютных значений мощности и энергии лазерного излучения рабочих СИ составляют 10..20% и лишь у лучших образцовых СИ могут быть снижены до 2...3%. Представленные цифры характерны как для отечественных, так и зарубежных СИ. Относительная погрешность измерения относительных изменений мощности и энергии, как правило, на порядок ниже, и составляет 0,1...1%.

Обратимся к ГОСТ 25212 – 82. Лазеры. Методы измерения энергии импульсов излучения. – М.: И-во стандартов, 1982. Он устанавливает 5 методов измерения энергии излучения лазеров, работающих в режиме однократного импульса, серии импульсов и периодической последовательности импульсов (частотном): А – метод прямых измерений; Б – метод измерения с использованием ослабителя; В – метод измерения с использованием фотометра сравнения; Г – метод измерения с использованием измерителя средней мощности; Д – метод измерения с использованием формирователя серии импульсов.

Метод А применяют, когда значение энергии импульса излучения лазера лежит внутри энергетического диапазона измерителя энергии. Метод Б применяют, когда значение энергии импульса излучения лазера превышает

верхний предел энергетического диапазона измерителя энергии. Метод В применяют, когда значение энергии импульса излучения лазера меньше нижнего предела энергетического диапазона измерителя энергии. Методы Г и Д применяют для измерения энергии импульса излучения лазера, работающего в режиме периодической последовательности импульсов.

Схема расположения средств измерений и вспомогательных устройств должна соответствовать приведенной на рис. 4. Оптическая система должна обеспечивать распространение лазерного излучения в заданном телесном угле и попадание пучка на приемную площадку измерителя энергии. При этом плотность мощности и энергии лазерного излучения на выходе оптической системы не должна превышать предельно допустимую для измерителя энергии. В качестве элементов оптической системы могут применяться линзы, зеркала, экраны или другие вспомогательные устройства. Коэффициент ослабления лазерного излучения оптической системой должен соответствовать указанному в НТД с погрешностью на более 5%. Если размеры поперечного сечения пучка и плотность мощности и энергии лазерного излучения не превышают размеров приемной площадки и предельно допустимой плотности мощности измерителя энергии, оптическую систему не применяют.

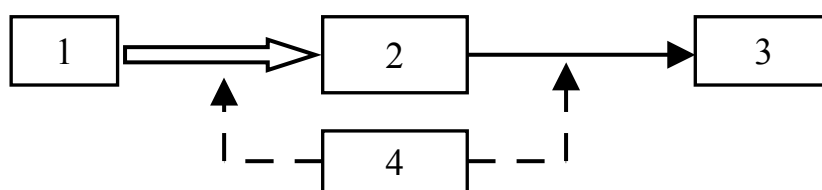


Рис. 4. Схема измерения энергии лазерного излучения по методу А: 1- исследуемый лазер; 2- оптическая система; 3- измеритель энергии; 4- средство юстировки

Здесь отражен опыт применения оптических систем при измерениях. Дополнительный элемент оптической схемы – оптическая система – вносит свой вклад в погрешность измерения. Если можно обойтись без оптической системы, то ее применять не следует. Поэтому ее используют лишь в случае

необходимости согласования пучка и приемной площадки по геометрическим размерам и допустимым уровням плотности мощности и энергии излучения.

Допускаемая основная погрешность измерителя энергии не должна превышать 15%. В этом случае относительная погрешность измерения энергии импульса излучения будет находиться в пределах $\pm 20\%$ при доверительной вероятности 0,95, что подтверждает высказанное выше замечание о допустимости невысокой точности измерений абсолютных значений мощности и энергии излучения.

Схема измерения по методу Б отличается введенным в оптическую схему ослабителя лазерного излучения. Погрешность измерения коэффициента ослабления самого ослабителя не должна превышать 5%. Распределение погрешностей между их источниками: измерителем энергии, ослабителем и оптической системой не должно приводить к выходу относительной погрешности измерения энергии за 20% - е границы. Поэтому в методе Б следует использовать измеритель энергии с допускаемой основной погрешностью в 10%, а не в 15%, как в методе А.

В методе Г и Д измеритель мощности или энергии должен обеспечивать интегрирование поступившей на приемный преобразователь энергии отдельных импульсов, входящих в серию. Чтобы пренебречь погрешностью интегрирования время нарастания переходной характеристики измерителя должно быть не менее $50T$, где T – период следования импульсов излучения. Счет числа импульсов должен производиться с погрешностью, не превышающей 5%.

Метод В реализуется с помощью схемы, представленной на рис. 5. Он основан на сравнении показаний измерителя энергии, на который воздействует установленная доля излучения вспомогательного лазера, и показаний фотоматра сравнения повышенной чувствительности, на который воздействует установленная доля излучения вспомогательного лазера и излучение исследуемого лазера. Таким образом, метод В представляет собой разновидность дифференциального метода измерений. Спектральный,

временной и энергетический диапазоны фотометра сравнения должны обеспечивать возможность измерения параметров исследуемого лазера, а нелинейность характеристики преобразования фотометра сравнения не должна превышать 5%.

Вследствие использования в методе В сложной оптической схемы и как минимум двух СИ, относительная погрешность измерения абсолютных значений энергии импульсов излучения допускается в нем ГОСТом 25212 – 82 $\pm 25\%$ с доверительной вероятностью 0,95, т.е. выше, чем в методах А, Б, Д и Г.

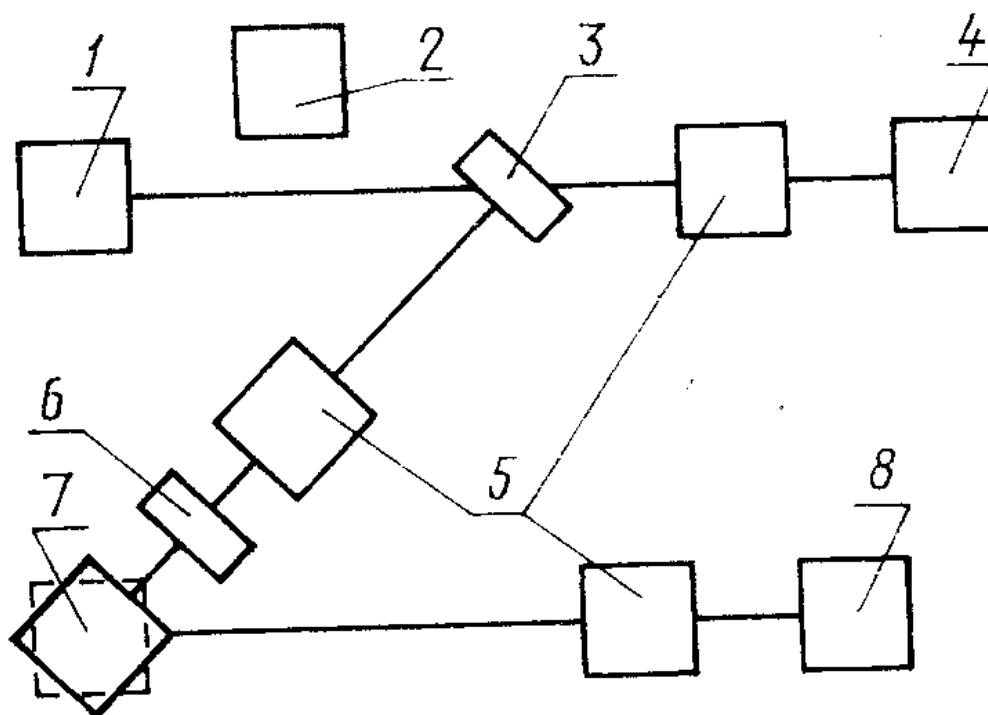


Рис. 5. Схема измерения энергии лазерного излучения по методу В: 1- вспомогательный лазер; 2- средство юстировки; 3- светоделитель; 4- измеритель энергии; 5- оптическая система; 6- ослабитель; 7- фотометр сравнения; 8- исследуемый лазер

Расчет относительной погрешности метода измерения энергии импульса лазерного излучения при заданных δ_i допустимых погрешностях СИ проводят по формулам:

- для метода А:

$$\delta = \pm 1,2[(\delta_1)^2 + (\delta_2)^2]^{0,5}, \quad (1)$$

- для метода Б:

$$\delta = \pm 1,2[(\delta_1)^2 + (\delta_2)^2 + (\delta_3)^2]^{0,5}, \quad (2)$$

- для метода В:

$$\delta = \pm 1,1[(\delta_1)^2 + (\delta_2)^2 + (\delta_3)^2 + (\delta_4)^2 + (\delta_5)^2 + (\delta_6)^2 + (\delta_7)^2 + (\delta_8)^2]^{0,5}, \quad (3)$$

- для метода Г:

$$\delta = \pm 1,1[(\delta_2)^2 + (\delta_3)^2 + (\delta_9)^2 + (\delta_{10})^2 + (\delta_{11})^2]^{0,5}, \quad (4)$$

- для метода Д:

$$\delta = \pm 1,1[(\delta_1)^2 + (\delta_2)^2 + (\delta_3)^2 + (\delta_{12})^2 + (\delta_{13})^2]^{0,5}, \quad (5)$$

где δ_1 – допускаемая основная относительная погрешность измерителя энергии (находится в интервале $\pm 10\%$ для метода Б и $\pm 15\%$ для методов А, В и Д); δ_2 – относительная погрешность определения коэффициента ослабления оптической системы (находится в интервале $\pm 5\%$); δ_3 – относительная погрешность измерения коэффициента ослабления ослабителя (находится в интервале $\pm 5\%$); δ_4 – погрешность, обусловленная неравномерностью зонной характеристики фотометра сравнения (находится в интервале $\pm 5\%$); δ_5 – погрешность, обусловленная нелинейностью характеристики преобразования фотометра сравнения (находится в интервале $\pm 5\%$); δ_6 – относительная погрешность градуировки фотометра сравнения (находится в интервале $\pm 2\%$); δ_7 – погрешность, обусловленная переходом с одного диапазона чувствительности на другой (находится в интервале $\pm 2\%$); δ_8 – погрешность определения коэффициента деления светоделителя (находится в интервале $\pm 5\%$); δ_9 – допускаемая основная погрешность измерителя средней мощности лазерного излучения в методе Г (находится в интервале $\pm 15\%$); δ_{10} – относительная погрешность измерения частоты повторения импульсов лазерного излучения (находится в интервале $\pm 5\%$); δ_{11} – относительная погрешность измерения средней мощности лазерного излучения, обусловленная постоянной времени измерителя (находится в интервале $\pm 5\%$); δ_{12} – погрешность, вносимая формирователем серии импульсов, обусловленная энергетическими

искажениями пучка лазерного излучения (находится в интервале $\pm 5\%$); δ_{I3} – погрешность определения количества импульсов в серии (находится в интервале $\pm 5\%$ при прямом измерении количества импульсов).

Если применить выражение (1) для метода А, т.е. $\delta_1 = 15\%$ и $\delta_2 = 5\%$, то получаем погрешность метода $\delta_A = 19\%$, что укладывается в допустимый интервал 20%.

Приведенный пример показывает, как следует в соответствии с ГОСТом скрупулезно учитывать вклад каждого элемента измерительной установки в результирующую погрешность метода измерений. С другой стороны, ГОСТ подсказывает как следует производить оценку пригодности того или иного элемента для применения в измерительной установке и какие сведения необходимы по тому или иному элементу для решения вопроса о его применимости в измерительной установке. Более того в ГОСТе имеется перечень приборов, оптических элементов и материалов, рекомендуемых к применению. Поскольку ГОСТу 25212 – 82 уже более 20 лет, то перечень приборов частично устарел, тем не менее, ИМО-2Н, ИКТ-1М, ФПМ-01 до сих пор находятся у нас на вооружении, их метрологические параметры современными приборами перекрыты не более чем в 2...3 раза, да и то у лучших современных образцов. Рекомендуемые оптические элементы и материалы вообще не потеряли своей актуальности.

Если обратиться к сравнительно свежему ГОСТ Р 51106 – 97. Лазеры инжекционные, излучатели, решетки лазерных диодов, диоды лазерные. Методы измерения параметров. – М.: И-во стандартов, 1998, то и в нем допуски на погрешности измерений мощности и энергии излучения остались практически без изменения: средней мощности излучения полупроводникового лазера $\pm 18\%$, а излучателя, лазерной решетки, лазерного диода и на выходе волоконно-оптического кабеля $\pm 20\%$ с установленной вероятностью 0,95; средней мощности импульса излучения $\pm 24\%$; измерения энергии импульса излучения $\pm 20\%$ для лазера и $\pm 22\%$ для излучателя, решетки и диода.

Литература

1. Системы контроля лазерного излучения: Каталог-справочник по странам СНГ и Балтии. – М.: НТИУЦ ЛАС, 2000. – 36 с.

ТЕОРИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

Основные понятия теории технической эксплуатации

Эксплуатация - это совокупность работ и организационных мероприятий для поддержания ЛУ в постоянной технической исправности.

Виды эксплуатации. Различают следующие виды эксплуатации: эксплуатация до отказа, эксплуатация по назначенному ресурсу, эксплуатация по техническому состоянию.

Эксплуатация конструкции до отказа. Надежность функционирования объектов при этом в основном определяется их прочностными характеристиками. Диагностирование таких конструкций развито слабо и заключается в основном в констатации отказа. Данный вид эксплуатации используется для изделий, выход из строя которых не наносит большого ущерба человеку, природе или производству.

Эксплуатация по назначенному ресурсу. Надежность конструкции при этом обеспечивается за счет снижения напряжений до уровня, близкого к пределу ограниченной выносливости, при котором не может произойти усталостное разрушение на заданной базе циклической долговечности конструкции или вследствие деградации электрических свойств, т.е. по заданному ресурсу. Этот вид эксплуатации характерен для неремонтируемых изделий военного или ответственного назначения, а также для относительно дешевых.

По отношению к коррозионному повреждению данный вид эксплуатации предполагает уменьшение толщины стенки до некоторой нормативной величины за весь назначенный срок эксплуатации.

Эксплуатация конструкции по техническому состоянию. При этом решение о продолжении эксплуатации объектов принимается на основе данных, полученных при техническом диагностировании, результатов анализа повреждений в целях прогноза работоспособности и оценки остаточного

ресурса с учетом динамики развития обнаруженных дефектов. В этом случае увеличение продолжительности эксплуатации конструкции достигается:

своевременным обнаружением дефектов, что позволяет сократить затраты на восстановление работоспособности объекта;

путем рационального распределения затрат на обслуживание и предупредительный ремонт в течение всего периода эксплуатации.

Как правило, наиболее экономически выгодным видом эксплуатации особенно опасных промышленных объектов следует считать эксплуатацию конструкций по техническому состоянию, составной частью которой является система диагностического контроля периодического или непрерывного типа. Последняя часто называется мониторингом.

Основные этапы процесса эксплуатации

Процесс эксплуатации состоит из следующих основных этапов: хранение, транспортирование, подготовка к применению, применение по назначению, техническое обслуживание и ремонт.

Под *хранением* ЛУ понимается содержание ее в технически исправном состоянии в течение установленного срока до реализации или до использования по назначению. В процессе хранения должны быть созданы благоприятные условия содержания техники, при которых обеспечивается сохранение ее работоспособности.

Поскольку лазеры в большинстве своем содержат прецизионные оптические элементы, то условия их хранения должны быть щадящими: а) диапазон температур $+5^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$; б) влажность не более 80%; в) присутствие в воздухе кислотных и других агрессивных примесей не допускается. Для отпаянных газоразрядных лазеров в процессе хранения необходима тренировка. Тренировка гелий-неонового лазера ЛГ-38 должна производиться не реже одного раза в три месяца путем зажигания разряда на 10...15 мин. В тренировке нуждаются и источники электропитания лазера. Например, в инструкции по эксплуатации гелий-кадмиевого лазера ЛГ-62

предусмотрена тренировка электролитических конденсаторов фильтра напряжением 10 кВ в течение 1 часа после 6 месяцев хранения.

Транспортирование - это перевозка ЛУ в условиях, обеспечивающих сохранение ее работоспособности.

Как минимум, в инструкции по эксплуатации лазеров гарантируется сохранность лазера при транспортировке лишь в таре предприятия-изготовителя. К этому иногда добавляются виды транспорта и продолжительность собственно транспортировки.

Подготовка ЛУ к применению - это совокупность работ по подготовке ее к нормальному функционированию в соответствии с назначением и техническими условиями.

Если для маломощных лазеров подготовка к эксплуатации может состоять лишь в часовой выдержке при условиях эксплуатации для выравнивания температур и испарения конденсата, подключения к шине заземления и розетке, то для мощных технологических комплексов она предусматривает соответствующую подготовку помещения и подведения целого ряда коммуникаций. Подтверждением тому являются требования к помещению (табл. 1) и коммуникациям (табл. 2) для лазерного технологического комплекса «Бистроник».

Таблица 1

Требования к помещению для лазерного технологического комплекса «Бистроник»

Толщина бетонного фундамента.	мм	300
Тип бетона В 300/DIN 4225		
Нагрузка на пол	Кг/м ²	800
Свойства окружающего воздуха:		
Отсутствие паров растворителей		
Минимальная температура С°	15	
Максимальная температура. С°	35	
точка росы	С°	<15
Относительная влажность	%	<70

Таблица 2

Требования к коммуникациям для лазерного технологического комплекса «Бистроник»

Электрические подключения		
Переменный ток, 3 фазы и заземл. допуск	%	+10;-10
Потребление без холодильн., BTL 1800	КВ*А	22.5
Потребление с холодильн. BTL 1800	КВ*А	32
Охлаждающая вода		
Замкнутый контур с холодильником		
Циркуляция воды	л/мин	75
Температура воды	С°	19
Отклонение температуры воды	К	± 1
Примеси	Мкм	< 50
Максимально допустимая проводимость воды	Мкс/см	6000
Оптимальный показатель PH		7
Давление воды в системе	Бар	4-5.5
Сжатый воздух		
Минимальное давление на входе	Бар	6
Максимальное потребл., включая внешний фильтр	Нм ³ /ч	40-50
Вспомогательные газы		
N ₂ ; Давление на входе	Бар	26
O ₂ ; Давление на входе	Бар	12

Применение ЛУ по назначению - совокупность работ, обеспечивающих ее нормальное функционирование в соответствии с техническими условиями.

В мощных лазерах эта совокупность работ включает в себя подачу напряжений требуемых уровней, газов, хладагентов, наблюдение за однородностью разряда («Хебр-1А»), за ходом технологического процесса. В измерительных или исследовательских установках предусматриваются также работы по самой процедуре измерения (получение, сохранение и обработка кадров факела распыла форсунок), по контролю систем объектов исследования (контроль за подачей и распределением масла в установке по исследованию газовых потоков в цилиндре двигателя).

Техническое обслуживание - это комплекс работ и операций для поддержания ЛУ в исправном или работоспособном состоянии при хранении, транспортировке, подготовке к применению и применении по назначению.

Техническое обслуживание маломощных отпаянных газоразрядных лазеров сводится к периодической тренировке активного элемента включением разряда, удалению пыли с помощью груши и беличьей кисточки, подъюстировки зеркал резонатора, иногда промывке оптических элементов в спиртоэфирных растворах. Техническое обслуживание мощных лазеров состоит из обслуживания всех его подсистем. Если ЛУ имеет систему откачки, включающей в себя форвакуумный насос, то в перечне комплекса работ технического обслуживания будет присутствовать периодическая смена вакуумного масла и т.п.

Ремонт

Ремонт - это комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности и восстановлению ресурса ЛУ или ее составных частей. Ремонт может проявляться и в гарантийном сроке сохранения работоспособности после ремонта.

В зависимости от степени старения, характера неисправностей, от сложности и объема работ ремонт подразделяется на текущий, средний и капитальный. Чтобы перейти к определениям видов ремонта необходимо различать понятия работоспособного состояния (работоспособность) и исправного состояния (исправность).

Под *работоспособностью* понимают такое состояние ЛУ, при котором она способна выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Если же значение хотя бы одного заданного параметра не соответствует установленным требованиям, то объект находится в неработоспособном состоянии.

Перечень параметров установленных на маломощные лазеры невелик. Число параметров собственно излучения не превышает 10, а чаще всего еще меньше – это: а) мощность излучения; б) диаметр пучка; в) расходимость; г) модовый состав; д) состояние поляризации; е) длина волны излучения. Причем эти параметры приводятся в форме неравенств – для мощности излучения – не

менее, для диаметра или расходимости – не более. К параметрам излучения обычно добавляются: а) время готовности; б) напряжение электропитания; в) потребляемая мощность; г) масса и габариты; д) параметры (1...2) надежности. Для мощных лазеров и лазерных комплексов число параметров может возрасти до сотни.

Под *исправным состоянием* понимают такое состояние ЛУ, при котором она соответствует всем параметрам нормативно-технической документации. Понятие исправности шире, чем понятие работоспособности, т.к. лазерная установка может быть и неисправной (например, по требованиям, определяемым внешним осмотром, исправности сигнальных индикаторов), но работоспособной.

Переход ЛУ из одного состояния в другое называют событием. *Событие* - переход в неисправное, но работоспособное состояние - называют *повреждением*. Событие, заключающееся в нарушении работоспособности, называют *отказом*. Например, появилась трещина на части поверхности отражающего покрытия зеркала резонатора "Квант-15" – лазерное излучение не генерируется, т.е. имеет место отказ, повернули его другим, свободным от дефектов участком, - работоспособность восстановилась, но повреждение осталось.

Ремонт, выполняемый для обеспечения или восстановления работоспособности объекта и состоящий в замене или восстановлении его отдельных частей, называется *текущим*. Он осуществляется обычно после возникновения отказа.

Ремонт, выполняемый для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса объекта с заменой или восстановлением составных частей ограниченной номенклатуры и контролем технического состояния составных частей, выполняемом в объеме, установленном нормативно-технической документацией, называется *средним*.

Деление на текущий ремонт и средний весьма условно. Здесь главными критериями будут плановость или внеплановость ремонта и наличие или

отсутствие контроля технического состояния. Например, не включается вентилятор, осуществляющий прокачку рабочей смеси через газодинамический контур в излучателе ЛУ «Хебр-1А». Если причина отказа в кнопке включения или магнитном пускателе и их замена привела к восстановлению работоспособности, то ремонт – текущий. Если же для устранения отказа пришлось заменять электродвигатель вентилятора, что требует почти полной разборки газодинамического контура, то, ограничившись лишь заменой электродвигателя, ремонт должен быть признан текущим. Однако при этом вряд ли кто откажется от контроля технического состояния и других элементов тракта. В этом случае ремонт следует классифицировать как средний.

Ремонт, выполняемый для восстановления исправности и полного или близко к полному восстановлению ресурса объекта с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые, называется *капитальным*.

Капитально ремонтируются лишь сложные и дорогостоящие ЛУ, подсистемы которых имеют разный ресурс. СО₂ лазеры лазерных технологических установок достигли высокой степени совершенства и имеют ресурс в десятки тысяч часов. В лазерных технологических установках (ЛТУ) быстрее изнашиваются направляющие, по которым перемещается «летающая» оптика и ее привода, что приводит к росту погрешностей воспроизведения геометрии контуров обработки. Поэтому, например, фирма «Бистроник» осуществляет капитальный ремонт своих ЛТУ путем замены направляющих и приводов и вновь реализует свои ЛТУ по цене 25...50% от новых.

Кроме того, ремонт может быть плановым и неплановым. *Плановым* называют ремонт, постановка на который осуществляется в соответствии с требованиями нормативно-технической эксплуатацией, чаще всего - это средний и капитальный. *Неплановый* - это ремонт, который осуществляется без предварительного назначения.

ЛУ и ее составные части делятся на ремонтируемые и неремонтируемые. *Ремонтируемым* называется такой объект, исправность и работоспособность

которого в случае возникновения повреждения или отказа подлежит восстановлению. Объект, у которого исправность и работоспособность не подлежат восстановлению, называется *неремонтируемым*.

Под *ремонтпригодностью* понимают свойство ЛУ, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения ее отказов и повреждений и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов. Здесь базовыми показателями являются легкосъемность и доступность.

При разработке теоретических основ эксплуатации должны решаться следующие задачи: а) обоснование объема и содержания работ и мероприятий, проводимых на различных этапах эксплуатации; б) разработка методов организации труда обслуживающего персонала и технологии различных работ в процессе эксплуатации; в) разработка основ автоматизации процесса эксплуатации; г) исследование экономических проблем эксплуатации и внедрение результатов этих исследований в практику эксплуатации (например, решение задачи о целесообразности последующих ремонтов); д) изучение и анализ факторов, влияющих на качество эксплуатации (сделать лазер защищенный от всех атмосферных воздействий очень дорого и в большинстве случаев в этом нет никакой необходимости); ж) разработка критериев и методов оценки эксплуатационных характеристик.

Задачами собственно эксплуатации ЛУ являются организация и проведение различных мероприятий, обеспечивающих подготовку к использованию, использование по назначению и поддержание исправного состояния.

Эксплуатационные свойства лазерных установок

Под *эксплуатационными свойствами* ЛУ понимают ее надежность, готовность к выполнению основных функций, приспособленность к техническому обслуживанию, экономичность.

Надежность - это свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в

заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технических обслуживаний, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность является одним из важнейших эксплуатационных свойств ЛУ, т.к. она в значительной мере определяет эффективность применения ЛУ по назначению. Надежность во многом определяет стоимость изготовления ЛУ. Надежность является комплексным свойством. В зависимости от назначения ЛУ и условий ее эксплуатации надежность может включать в себя безотказность, сохраняемость, долговечность, ремонтпригодность.

Готовность - это свойство объекта, характеризующее его приспособленность к переводу из любого исходного состояния в состояние непосредственного применения по назначению. Это свойство наиболее важно для ЛУ военного назначения.

Приспособленность к техническому обслуживанию - это свойство объекта эффективно выполнять стоящие перед ним задачи при проведении технических обслуживаний заданной продолжительности с определенной периодичностью. Оно наиболее важно для ЛУ производственного назначения.

Экономичность - свойство, характеризующее затраты, связанные с эксплуатацией ЛУ.

Свойство ЛУ непрерывно сохранять работоспособное состояние после транспортирования, а также в течение и после хранения называется *сохраняемостью*.

Долговечность - это свойство ЛУ сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. *Предельным* называют такое состояние, при котором дальнейшая эксплуатация ЛУ должна быть прекращена по следующим причинам: а) неустранимого нарушения требований безопасности; б) неустранимого ухода технического параметра за заданные пределы; в) неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой.

Признаки предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией на ЛУ или данный вид изделий.

Классификация отказов

Отказы подразделяются:

1) по характеру изменения параметров до момента возникновения отказа на внезапные и постепенные.

Внезапным называют отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одного или нескольких параметров.

Постепенным называют отказ, характеризующийся постепенным изменением одного или нескольких параметров.

2) по взаимосвязи между собой - на зависимые и независимые.

Зависимым называют отказ элемента объекта, обусловленный отказом другого его элемента.

Независимым называют отказ, не обусловленный отказами других его элементов.

3) по характеру времени нарушения работоспособности - на сбой и перемежающиеся.

Сбоем называется самоустраняющийся отказ, приводящий к кратковременному нарушению работоспособности, например, пробой по корпусу увлажненного конденсатора.

Перемежающимся отказом называют многократный возникающий сбой одного и того же характера, например, разъюстировка резонатора лазера при прогреве.

4) по наличию внешних признаков - на явные и неявные.

Явный - это отказ, который обнаруживается сразу после его появления без применения измерительных приборов. (Исчезновение излучения лазера видимого диапазона. Отслоение интерференционного покрытия зеркала резонатора.)

Неявный (скрытый) - это отказ, который не имеет внешних признаков проявления и может быть обнаружен только с помощью соответствующих

измерений. (Отказ, вызванный изменением расходимости или модового состава.)

5) по причинам возникновения - на конструкционный, производственный и эксплуатационный.

Конструкционным называют отказ, возникающий в результате нарушения установленных правил и норм конструирования объекта.

Производственным называют отказ, возникший в результате нарушения процесса изготовления или ремонта объекта.

Эксплуатационным называют отказ, возникший в результате нарушения установленных правил или условий эксплуатации.

Установить отказ по причинам возникновения, наверное, самая скользкая тема, развитие которой часто влечет крупные материальные и даже уголовные издержки. (Чернобыль, Курск, обрушение крыш и т.п.)

Эксплуатационно-технические показатели

Рассмотренные выше понятия и определения являются качественными параметрами. Для количественного выражения надежности, готовности и экономичности используются эксплуатационно-технические показатели. Выбор возможного перечня эксплуатационно-технических показателей проводят с учетом следующих требований: а) возможности оценивать соответствующие параметры и характеристики в различных условиях и на разных этапах эксплуатации; б) возможности их числового определения или задания; в) возможности их расчета по данным эксплуатации и проектирования; д) достаточной универсальности; е) простоты и удобства применения. В зависимости от условий получения необходимых для расчета данных показатели называют: оценочными, опытными, прогнозируемыми, экстраполированными.

Показатели безотказности: а) вероятность безотказной работы $P(t)$; б) частота отказов $f(t)$; в) интенсивность отказов $\lambda(t)$; г) средняя наработка на

отказ (для ремонтируемых изделий) или до отказа (для неремонтируемых изделий) T_{cp} .

Показатели ремонтпригодности: а) средняя продолжительность текущего ремонта T_{mp} ; б) средняя продолжительность технического обслуживания T_{mo} .

Показатели долговечности для неремонтируемого объекта: а) средний срок службы T_{cc} ; б) средний ресурс R_{cp} ; для ремонтируемого объекта к ним добавятся: в) средний срок службы до капитального (среднего) ремонта; г) средний срок службы между капитальными (средними) ремонтами; д) средний ресурс до капитального (среднего) ремонта; е) средний ресурс между капитальными (средними) ремонтами. Пример ресурса – среднее число вспышек лампы накачки.

Показатели сохраняемости: средний срок сохраняемости T_c .

Показатели готовности: а) коэффициент готовности K_z ; б) коэффициент оперативной готовности $K_{o.g.}$; в) коэффициент технического использования $K_{т.и.}$.

Эксплуатационно-экономические показатели: а) средняя трудоемкость текущего ремонта $S_{m.p.}$; б) средняя трудоемкость технического обслуживания $S_{m.o.}$; в) коэффициент эффективности профилактики $K_{эф.п.}$; г) коэффициент стоимости эксплуатации $K_{ст.э.}$.

Естественно, что перечислены не все эксплуатационно-экономические показатели, но и перечисленная группа весьма представительна, для того, чтобы продемонстрировать возможность количественного сравнения по ним различных ЛУ. Причем для потребителя именно эксплуатационные показатели играют решающее значение. К сожалению именно они часто остаются за бортом российских разработчиков новой техники.

Процесс возникновения отказов, а также конкретные значения других характеристики аппаратуры в процессе эксплуатации носят случайный характер. Поэтому в их определении присутствует вероятностная терминология, а количественная оценка осуществляется с привлечением вероятностных методов.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает. «Наработка» – термин, определяющий продолжительность работы объекта.

Под *частотой отказов $f(t)$* понимают число отказов в единицу времени, отнесенное к первоначальному числу поставленных на испытание изделий.

Под *интенсивностью отказов $\lambda(t)$* понимают число отказов в единицу времени, отнесенное к среднему числу изделий, безотказно работающих в данный промежуток времени. При этом отказавшие изделия не заменяются. В отличие от частоты отказов $f(t)$ этот показатель характеризует надежность изделия в каждый данный момент, т.е. его локальную надежность.

Средней наработкой на отказ (для ремонтируемых изделий) или до отказа (для неремонтируемых изделий) T_{cp} называется математическое ожидание времени работы до первого отказа.

Показатели готовности называют еще комплексными показателями надежности, т.к. они характеризуют одновременно несколько свойств, составляющих надежность.

Коэффициент готовности K_g – вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается (плановое техническое обслуживание, плановый ремонт и т.п.). Следовательно, коэффициент готовности представляет собой отношение суммарного времени исправной работы к общему времени исправной работы и ремонта, взятых за определенный период эксплуатации.

Коэффициент оперативной готовности $K_{o.z.}$ – вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени и начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент технического использования $K_{т.и.}$ есть отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических

ожиданий времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации.

Как видим, присутствие вероятностной терминологии в определении эксплуатационно-технических показателей налицо.

Средняя трудоемкость текущего ремонта $S_{т.р.}$ определяется отношением средней продолжительности текущего ремонта к общему числу лиц технического персонала заданной квалификации, принимающих участие в текущем ремонте, и измеряется в человеко-часах.

Средняя трудоемкость технического обслуживания $S_{т.о.}$ определяется отношением средней продолжительности технического обслуживания к общему числу лиц технического персонала заданной квалификации, принимающих участие в техническом обслуживании, и измеряется в человеко-часах.

Под *коэффициентом эффективности профилактики $K_{эф.п}$* понимают отношение количества отказов, выявленных во время выполнения профилактических работ, к суммарному числу отказов, зарегистрированных в процессе эксплуатации аппаратуры.

Под *коэффициентом стоимости эксплуатации аппаратуры $K_{ст.э}$* понимается отношение стоимости эксплуатации в течение года к стоимости ее производства.

Как видим, и эксплуатационно-экономические показатели также требуют статистической обработки материалов, связанных с эксплуатацией изделий.

Литература

1. Леонов А.И., Дубровский Н.Ф. Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры. М.: Легпромбытиздат, 1991. - 272 с.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

Технической диагностикой (ТД) называется наука о распознавании состояния технической системы. Категория технического состояния характеризуется соответствием или несоответствием качества объекта определенным техническим требованиям, установленным технической документацией на этот объект. При проведении ТД важно различать следующие виды технического состояния: а) исправность и неисправность; б) работоспособность и неработоспособность; в) правильное функционирование и неправильное функционирование. Под функционированием объекта понимают выполнение предписанного объекту алгоритма функционирования при его применении по назначению. Распространение микропроцессорной техники в лазерных установках (ЛУ) делает особенно актуальным различие правильного и неправильного функционирования (вирусы, перепрограммируемые ЗУ, ошибки программирования и т.п.).

ТД используется на всех этапах существования ЛУ – при проектировании, производстве и эксплуатации. Задачи ТД существенно упрощаются, если в ходе разработки ЛУ была предусмотрена возможность выявления ее технического состояния. При производстве ЛУ задачи ТД решаются в процессах входного контроля материалов и комплектующих и наладки аппаратуры. На этапе эксплуатации ТД повышает эффективность использования ЛУ.

Например, в процессе производства газоразрядных приборов большую роль играет чистота исходных материалов и технология их обработки. Здесь представляется возможность обнаружить брак на самых ранних стадиях производства методами спектрального анализа. Появление паров натрия и ртути ведет к снижению электрической прочности газоразрядного промежутка, образованию слоев с повышенной вторичной электронной эмиссией, снижению эмиссии катода. Если при фотографировании спектров газового разряда отпаянной газоразрядной трубки гелий - неоновом лазера обнаруживаются характерные линии ртути или натрия, то необходимо найти и устранить

источники их попадания внутрь. Источником натрия может быть никелевый анод, содержащий 0,05% натрия, а ртути – ртутный манометр.

Общее число состояний ЛУ определяется количеством ее функциональных элементов и связей между ними. Переход ЛУ из одного технического состояния в другое является случайным событием. Поэтому любое состояние ЛУ до проведения ТД обладает некоторой неопределенностью, для раскрытия которой и необходима ТД. При решении задач ТД предполагается, что контролируемая ЛУ может находиться в конечном множестве S состояний, которое можно разделить на два подмножества S_p работоспособных и S_n неработоспособных состояний. Для ЛУ невысокой сложности, состоящей, например, из отпаянного излучателя и ИП, первое подмножество S_p часто включает единственное состояние, соответствующее исправности всех элементов ЛУ. Подмножество S_n включает в себя все состояния, соответствующие возникновению в аппаратуре отказа.

Такая классификация технических состояний позволяет разделить процесс ТД на два этапа. На первом этапе устанавливается принадлежность ЛУ по состоянию к одному из подмножеств S_p или S_n . Эту процедуру называют проверкой работоспособности. Анализ состояний в подмножестве S_p позволяет установить характер изменения степени работоспособности ЛУ и в ряде случаев предсказать момент перехода ее состояния в подмножество S_n , а следовательно, осуществить прогноз. На втором этапе определяют, в каком из состояний подмножества S_n находится ЛУ, если в данный момент ее состояние действительно принадлежит этому подмножеству. Этот этап называется обнаружением отказа. Необходимость его определяется ремонтпригодностью аппаратуры. Если ЛУ неремонтпригодна, то ее списывают.

При ТД различают рабочие воздействия, которые поступают на объект диагностирования при его функционировании (функциональное диагностирование), и тестовые воздействия на объект, которые подаются на него только для целей диагностирования (тестовое диагностирование). Система ТД включает в себя совокупность средств и объекта диагностирования, и при

необходимости, исполнителей, подготовленных к диагностированию или осуществляющих его по правилам, установленным соответствующей документацией.

Системы функционального диагностирования используют в качестве проверочных воздействий рабочие сигналы. Эти воздействия соответствуют рабочим алгоритмам функционирования и не могут выбираться произвольно. Системы функционального диагностирования применяются, как правило, в процессе эксплуатации ЛУ. Они позволяют заменить в процессе работы отказавшие узлы резервными или переходить на другие режимы работы, для которых возникшая неисправность незначительна.

Излучатель лазера ВТЛ 1800 ЛТУ «Бистар 3015» имеет 5 режимов работы: а) непрерывный; б) модуляционный; в) нормальный импульсный; г) суперимпульсный; д) мегаимпульсный. Мегаимпульсный режим используется при прошивке и точной резке толстых заготовок толщиной более 6 мм. Неработоспособность в мегаимпульсном режиме выявляется в процессе функционального диагностирования. Если производственный план в течение какого-то промежутка времени не предусматривает резку толстых листов, то на этот промежуток времени можно мириться с указанной неисправностью. На ЛТУ «Квант-15» режим одиночных импульсов запускается с модулятора накачки МТ-42, пульта оператора на лазерном станке и от ножной педали. При отказе ножной педали тоже какое-то время можно обходиться и без нее.

Системы тестового диагностирования используют проверочные воздействия, которые вырабатываются устройствами диагностирования. Поэтому как состав, так и последовательность подачи этих воздействий на диагностируемую ЛУ определяются из условий эффективности контроля и диагностики. При этом для подачи воздействий и получения ответных реакций используются не только основные входы и выходы аппаратуры, но также внутренние узлы и ветви. Это способствует получению большей глубины поиска дефектов при меньших затратах времени. Обычно тестовые воздействия возможны в стадии ремонта, т.е. при выводе ЛУ из штатной эксплуатации.

В ходе функционального диагностирования газодинамического тракта, имея даже несколько датчиков давления в разных участках тракта, не всегда удастся выявить место разгерметизации. Например в «Латусе-31», датчик давления расположен в непосредственной близости от насоса и может вместе с насосом отделяться клапаном от остальной магистрали. Тогда при открытом и закрытом клапане в процессе функциональной диагностики удастся отделить неисправность форвакуумного насоса от неисправности магистрали. В магистрали имеется ~ 100 герметизируемых соединений (газоразрядные трубки, зеркала, теплообменники, компрессор, клапана подачи газов и т.д.) и диагностировать неисправное без течеискателя вряд ли удастся. Наиболее распространенный принцип работы течеискателя состоит в использовании тестового газа – гелия, обладающего высокой теплопроводностью. Гелий и выступает в роли тестового сигнала подаваемого в области возможной разгерметизации.

Структура технической диагностики

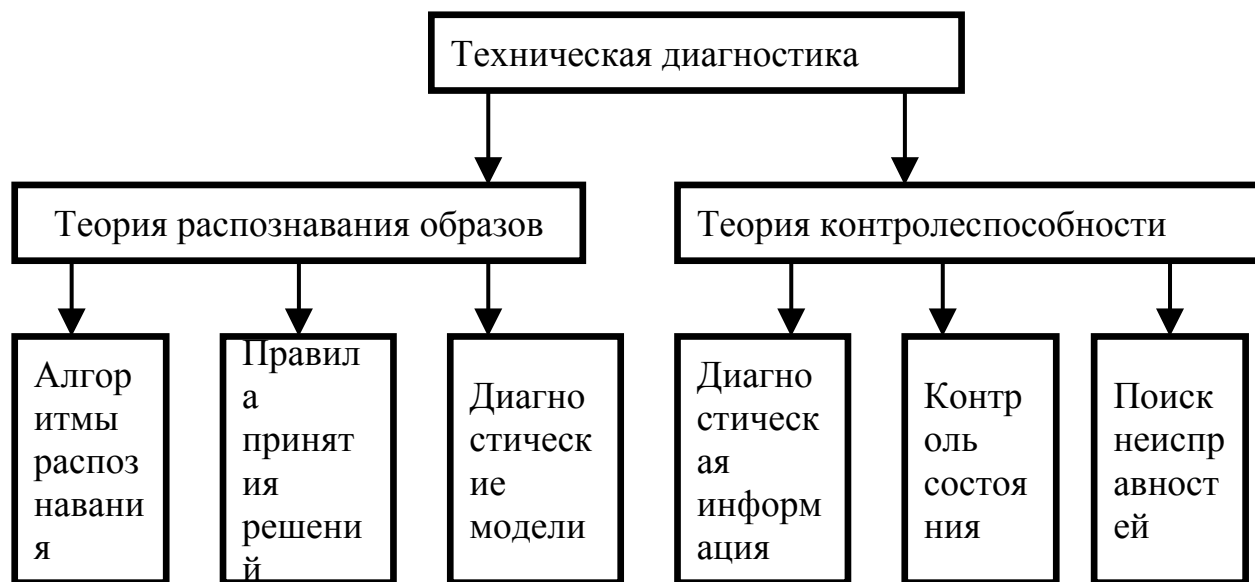


Рис. 1. Структура ТД как технической дисциплины

Структура ТД характеризуется двумя взаимопроникающими и взаимосвязанными направлениями: теорией распознавания образов и теорией

контролеспособности. Теория распознавания содержит разделы, связанные с построением алгоритмов распознавания, теорией принятия решений и диагностических моделей. Теория контролеспособности включает разработку средств и методов получения диагностической информации, автоматизированного контроля состояния и поиска неисправностей.

Теоретическим фундаментом ТД является общая теория распознавания образов. Эта теория, как составная часть кибернетики занимается распознаванием образов любой природы. ТД изучает алгоритмы распознавания применительно к задачам диагностики, т.е. к задачам распознавания технического состояния объекта. Алгоритмы распознавания в ТД рассматриваются как задачи классификации по техническим состояниям. Диагностические модели устанавливают связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве диагностических сигналов. Поскольку как задачи классификации при распознавании образов, так и связи между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве сигналов носят вероятностный характер, то и правила принятия решений также базируются на теории вероятностей, т.е. оценивается стоимость или последствия ложной тревоги и стоимость или последствия пропуска цели.

Сами термины ложной тревоги и пропуска цели пришли в теорию принятия решений из радиолокации и в применении к лазерному локатору они имеют тот же смысл. Применительно к ТД пояснить ситуацию можно следующим примером. Допустим, проводится ТД газовых магистралей фтористо-водородного лазера на герметичность. (Фтор и водород могут использоваться и как компоненты активной среды, и как топливо и окислитель ракетного двигателя.) В этом случае следует использовать максимальную чувствительность течеискателя. Тогда его ложные срабатывания приведут к дополнительной переборке участков магистрали и замене газораспределительной арматуры. В этом случае дополнительные затраты будут оправданы, т.к. утечки агрессивного фтора и взрывоопасного водорода могут привести к катастрофическим последствиям. Если же диагностируется

магистраль углекислотного лазера, то пропуск участков с малыми утечками компонент его активной среды вряд ли ощутимо скажется на его безопасной и экономически эффективной эксплуатации. Поэтому можно загрузить чувствительность течеискателя, снизив, тем самым, вероятность ложной тревоги, но увеличив вероятность пропуска некачественной сборки или арматуры.

Вторым важным компонентом ТД является теория контролеспособности. Контролеспособностью называется свойство изделия обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Контролеспособность создается конструкцией изделия и принятой схемой его ТД.

Как видно из общей структуры ТД теория контролеспособности изучает методы получения диагностической информации, системы, позволяющие осуществлять контроль состояния, алгоритмы поиска неисправностей и отказов.

В общей структуре ТД лишь перечислены ее компоненты. Поэтому она применима к любым изделиям, но нуждается в конкретном наполнении при применении для каждого типа технических устройств. Более того, даже в рамках одного названия, например, ТД трубопроводов могут быть совершенно разное наполнение этих структурных элементов в зависимости от того, рассматривается ли ТД трубопроводной системы авиационного двигателя или ТД магистральных нефте- и газопроводов. Но поскольку ТД сформировалась уже как самостоятельное учение и достигла определенной степени обобщения, то нужно, во-первых, знать или хотя бы иметь представление об этих обобщениях (та же структура), а, во вторых, уметь наполнить ее конкретным содержанием. Этим умением студенты и должны овладеть в процессе обучения. В качестве одного из универсальных рецептов по наполнению ТД ЛУ конкретным содержанием можно рекомендовать использование схем ТД, разработанных и апробированных в других областях техники.

Если вспомнить системы газоподготовки и охлаждения ЛУ «Латус-31», а ставится задача осуществить ТД трубопроводов этой ЛУ или написать инструкцию по ТД. Вряд ли удастся найти литературу по ТД трубопроводов ЛУ вообще, а тем более по конкретной ЛУ. Однако конструкция «Латуса-31» известна и поэтому можно сделать вывод о том, что ее трубопроводы ближе к трубопроводам авиационного двигателя, нежели к магистральным. Литература по ТД трубопроводов авиационных двигателей наверняка найдется, вплоть до конкретных инструкций.

Рассмотрим отдельные компоненты общей структуры ТД.

Выбор диагностических признаков

Диагностические признаки делятся на три основные группы: признаки работоспособности, признаки неисправностей и косвенные признаки. В качестве признаков работоспособности выступают выходные параметры ЛУ, т.к. удовлетворение значений выходных параметров техническим условиям на ЛУ и дает прямой ответ на вопрос о ее работоспособности. Однако этих параметров оказывается недостаточно как в случае неработоспособности ЛУ, так и для прогноза ее ресурса. В первом случае желательно получить ответ о месте и причине отказа, а во втором – о времени исчерпания ресурса тех или иных ее узлов.

К признакам неисправностей относят те признаки, которые приводят или могут привести к отказу ЛУ. Это величина износа, различного вида деформации, степень коррозии, отложения и засорения. Число их может быть велико и их часто сложно контролировать прямыми методами. Например, отложения в жидкостной системе охлаждения ЛУ могут привести к отказу излучателя и его элементов, источника питания, системы транспортировки и фокусировки излучения.

Косвенные признаки – это признаки функционально связанные с признаками работоспособности и неисправностей. В качестве косвенных признаков чаще всего выступают температура, вибрации, акустические шумы, качественный и количественный анализ продуктов износа, давление. Их

используют, когда непосредственные измерения параметров, характеризующих первые две группы признаков затруднено, или когда требуется интегральная оценка технического состояния ЛУ. Если что-то в автомобиле застучало – значит появилась какая-то неисправность. Существенным преимуществом использования косвенных признаков служит возможность оценки технического состояния изделия во время его работы.

Использование косвенных признаков повышает эффективность и экономичность ТД. Так диагностирование каналов хладагента охлаждаемого зеркала является сложной и трудоемкой задачей, связанной с его извлечением из оптической схемы, в то время как установка на нем датчика температуры и периодическое или непрерывное ее измерение осуществляется довольно просто. Если перегрева не наблюдается, то заниматься диагностированием его внутренних каналов нецелесообразно. Техническая диагностика герметичности газового тракта того же «Латуса» с помощью течеискателя тоже выльется в день простоя ЛУ. В то же время в нем имеется механотронный датчик давления и регистрирующий прибор. Если систематически измерять скорость натекания за нерабочую смену, то можно обнаружить нарушение герметичности, и тогда уже использовать методы поиска нарушения герметичности, позволяющие локализовать место нарушения. Если еще с помощью того же датчика давления периодически измерять скорость откачки, то можно судить о состоянии форвакуумного насоса.

Что касается герметичных механических подвижных узлов с жидкой смазкой (форвакуумные насосы, прокачные устройства излучателей; системы перемещения обрабатываемых деталей или оптических элементов), то ценную информацию об их износе дает качественный и количественный анализ масла, которым заполнены эти механические узлы. Что проще, быстрее и дешевле: разобрать форвакуумный насос для ТД износа его деталей или взять пробу масла и прогнать ее на спектрофотометре? Причем при таких фотометрических исследованиях можно не только судить о механическом износе, но и оценить качество самого масла, т.е. пора его менять или на нем можно еще работать.

Исследование акустических шумов и вибраций (спектральный анализ, но не оптический, а акустический) позволяет не только зафиксировать неисправность, но и локализовать поврежденную или изношенную деталь. В силу низкочастотности акустических сигналов, возникающих при работе машин и механизмов (до сотен килогерц) сам по себе акустический спектральный анализ больших сложностей не представляет, но для его применения в целях ТД необходимо предварительное установление хотя бы статистических связей между формой акустического спектра и техническим состоянием. Имеются попытки использования акустического сигнала для контроля технологического процесса лазерной резки металлов. Ориентировочные параметры аппаратуры для акустической диагностики следующие: микрофон с полосой пропускания до 70 кГц и чувствительностью 5 мВ/Па, 12-ти разрядный АЦП с тактовой частотой 250 кГц и ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Было бы интересно применить оптический спектральный анализ для ТД мощных газоразрядных лазеров. При современном состоянии оптоэлектроники такая система измерения могла бы получиться компактной и недорогой. Анализируемые параметры: соотношения компонент (диагностика системы газоподготовки), чистота газов (входной контроль газов и износ элементов газоразрядной камеры), возможно измерение суммарного и парциального давления в газоразрядной камере, скорости потока (диагностика прокачного устройства).

Связь между количеством диагностических признаков и классом задач ТД следующая: а) для определения работоспособности достаточно признаков работоспособности, число которых невелико; б) при поиске отказов необходима детальная информация о состоянии узлов, блоков и элементов, что требует привлечения большего числа признаков и, соответственно, числа измеряемых параметров, чем при контроле работоспособности; в) при прогнозировании работоспособности необходимо иметь еще больший объем информации. В этом случае нужно знать не только состояние узлов, блоков и

элементов, но и законы изменения их параметров от условий эксплуатации и во времени /21/.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СИГНАЛ

Фотоэлектрический метод измерения мощности и энергии лазерного излучения

Он определяется ГОСТ 24453 - 80. Измерение параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин как метод измерения мощности или энергии лазерного излучения, основанный на использовании фотоэлектрических эффектов в веществе, основными из которых являются эффекты возникновения э.д.с. или эмиссии электронов и изменения электропроводности под действием падающего лазерного излучения.

Фотоэлектрический эффект заключается в переходе носителей заряда на более высокие энергетические уровни под действием (при поглощении) фотонов измеряемого излучения. Энергия фотонов в результате фотоэлектрического эффекта непосредственно преобразуется в электрическую, которую затем измеряют. Фотоприемники на основе фотоэлектрического эффекта выполняют функцию чувствительного элемента в приемных преобразователях СИ мощности и энергии лазерного излучения. В фотоэлектрических преобразователях падающие на него фотоны оптического излучения прямо взаимодействуют с его кристаллической решеткой, в результате чего освобождаются носители тока. Различают первичные фотопреобразователи с внешним и внутренним фотоэффектами. Если носители тока – фотоэлектроны, возникающие в веществе при его освещении, эмитируются в вакуум или газ, образуя ток во внешней цепи, то наблюдается внешний фотоэффект. Если освобожденные носители тока остаются внутри вещества и переходят из валентной зоны в зону проводимости, чаще всего полупроводника, то наблюдается внутренний фотоэффект.

Явление внешнего фотоэффекта заключается в испускании электронов с поверхности катода под действием электромагнитного излучения. Это

классический фотоэффект, основные законы которого открыты эмпирически Столетовым и теоретически, с квантовых позиций, объяснены Эйнштейном. Испускание фотоэлектронов имеет место, когда длина волны излучения становится меньше некоторой критической, называемой красной границей фотоэффекта. Это будет длинноволновая граница фотоэффекта. Коротковолновая же его граница для фотоэлектронного первичного преобразователя ограничена пропусканием его входного окна. Аналогично описывается и явление внутреннего фотоэффекта. Наличие красной границы и порождение не более одного фотоэлектрона на поглощенный фотон приводят к резко неравномерной по длинам волн спектральной чувствительности фотоприемников с внешним или внутренним фотоэффектом, что является отрицательным фактором при их использовании в широкополосных по спектру средствах измерения энергетических параметров лазерного излучения.

Понять происхождение неравномерности можно на основе простейшей модели фотоприемника. Предположим, что количество эмитированных фотоэлектронов n_e пропорционально количеству падающих на фотоприемник фотонов n_f :

$$n_e = g n_f, \quad (1)$$

где g – коэффициент пропорциональности, который называется квантовой эффективностью. Энергия одного фотона:

$$w_0 = (hc) / \lambda. \quad (2)$$

Тогда количество падающих на фотоприемник фотонов n_f будет равно отношению падающей энергии оптического излучения W к энергии одного фотона w_0 :

$$n_e = g (W / w_0) = [g W / (hc)] \lambda. \quad (3)$$

Поскольку выходной сигнал фотоэлектрического фотоприемника S токовый или по напряжению в первом приближении прямо пропорционален

количеству эмитированных электронов, то при постоянной энергии падающего излучения $W = const_1$:

$$S = k_1 n_e = k_2 \lambda \quad (4)$$

он будет пропорционален длине волны излучения, а его графиком будет отрезок прямой, проходящей через начало координат (рис. 1). С длинноволновой стороны этот отрезок ограничен вертикалью $\lambda_{кр} = const_2$ – красной границей фотоэффекта, а с коротковолновой стороны $\lambda_{пр} = const_3$ – границей пропускания входного окна или покрытия фоточувствительной площадки.

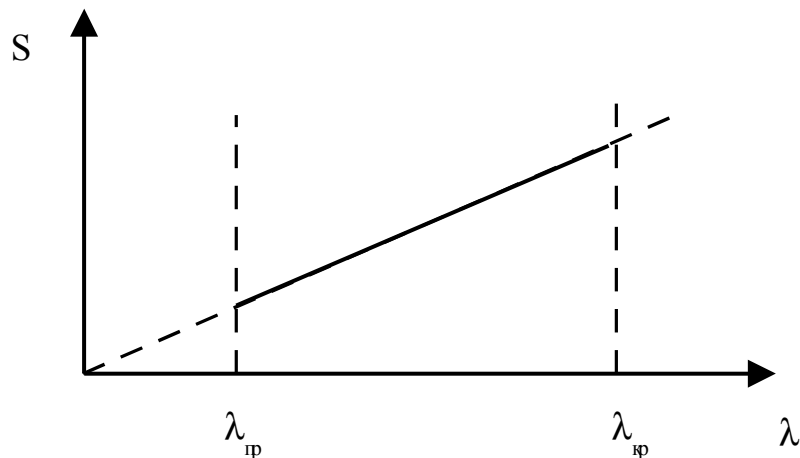


Рис. 1. Зависимость спектральной чувствительности от длины волны для упрощенной модели фотоэлектрического фотоприемника

Естественно, что зависимость спектральной чувствительности от длины волны реальных фотоэлектрических фотоприемников будет иметь более сложный вид из-за расплывания красной границы и границы пропускания, наличия примесей и спектральной зависимости коэффициента поглощения материала фотоприемника и т.п.

Средства измерения мощности и энергии лазерного излучения с фотоприемниками с внешним фотоэффектом

К точечным фотоприемникам с внешним фотоэффектом относятся вакуумные и газонаполненные фотоэлементы и фотоумножители. Здесь уместно упомянуть еще об одной классификации фотоприемников по количеству фоточувствительных элементов в одном фотоприемнике. По этому признаку фотоприемники делятся на одноэлементные и многоэлементные. В свою очередь, в многоэлементных фотоприемниках их фоточувствительные элементы могут располагаться вдоль некоторой линии (чаще всего – прямой), и их называют линейными, а могут – на некоторой поверхности (чаще всего – плоской), и такие фотоприемники называют площадными. Поэтому одноэлементные фотоприемники еще называют точечными.

Спектральный диапазон фотоприемников с внешним фотоэффектом ограничен ближней ИК областью спектра (1,2 мкм для серебряно-кислородно-цезиевого фотокатода и 1,5 мкм у ФЭУ с полупроводниковым катодом с так называемым отрицательным электронным средством). При использовании фотоприемников с внешним фотоэффектом в качестве измерительных преобразователей средств измерения мощности и энергии лазерного излучения помимо ограничений, связанных с необходимостью учета области спектральной чувствительности фотокатода, возникает необходимость учитывать также зависимость коэффициента преобразования от угла падения излучения, а также зонную неравномерность коэффициента преобразования.

Газонаполненные фотоэлементы и фотоэлектронные умножители обладают способностью внутреннего усиления. В газонаполненных фотоэлементах усиление фототока происходит за счет формирования разряда в газе, а в фотоэлектронных умножителях – за счет вторичной электронной эмиссии на динодах.

Частотный диапазон ФЭУ простирается до 10^{10} Гц, а временное разрешение до 10^{-10} с. Временные характеристики быстродействующих вакуумных элементов еще на порядок лучше.

Достоинства фотоприемников с внешним фотоэффектом: а) высокая чувствительность; б) высокое быстродействие; в) высокая линейность при

малых токах. Благодаря внутреннему усилению ФЭУ способны работать в режиме счета фотонов.

Недостатки фотоприемников с внешним фотоэффектом: а) неравномерность спектральной чувствительности; б) утомляемость, особенно при больших засветках; в) высокое напряжение питания (100 В...3000 В); г) чувствительность к вибрациям (динатронный эффект); д) чувствительность к внешним электрическим и магнитным полям; е) малая механическая прочность.

Поскольку, когда речь заходит об измерении средней мощности и энергии лазерного излучения, т.е. о величинах $> 0,1$ мВт и > 1 мДж, то чувствительность перестает быть определяющим фактором применения фотоприемника того или иного типа в средстве измерения. Поэтому в современных средствах измерения средней мощности и энергии лазерного излучения фотоприемники с внешним фотоэффектом вытеснили фотоприемники других типов.

Благодаря высокому быстродействию вакуумные фотоэлементы и ФЭУ применяют для измерения мгновенной мощности, формы и длительности импульсов, т.е. для измерения временных параметров лазерного излучения. Оправдано их применение в дозиметрах лазерного излучения, когда фактор чувствительности играет заметную роль.

Тем не менее, еще можно встретить фотометры старых образцов марок ФОГ, ФН, ФЧ, ИЭЛ с фотоприемниками с внешним фотоэффектом. Они предназначены для измерения энергии (10^{-8} ... $2 \cdot 10^2$ Дж) и мощности ($2 \cdot 10^2$... $5 \cdot 10^8$ Вт) импульсов, а также их формы и длительности ($2 \cdot 10^{-8}$... 10^{-2} с). Их метрологические характеристики нормированы на фиксированных длинах волн 530, 694 и 1060 нм, т.е. на длинах волн генерации излучения неодимового и рубинового лазеров и 2-й гармоники излучения неодимового лазера. Инструментальная погрешность измерения энергетических параметров составляет 20...25%.

Средства измерения мощности и энергии лазерного излучения с фотоприемниками с внутренним фотоэффектом

К фотопреобразователям с внутренним фотоэффектом относятся фотосопротивления, фотодиоды, фототранзисторы и т.п. Действие фотосопротивлений основано на явлении фотопроводимости, заключающемся в возникновении свободных носителей заряда в некоторых полупроводниках и диэлектриках при падении на них оптического излучения. Фотопроводимость приводит к уменьшению электрического сопротивления и соответственно к увеличению тока, протекающего через фотосопротивление. Фотосопротивления различных типов перекрывают широкий спектральный диапазон от 0,3 до 40 мкм, однако ИК-фотосопротивления требуют охлаждения до азотных или гелиевых температур. Характеристики фотосопротивлений существенно нелинейны, чем затрудняется их применение СИ мощности и энергии лазерного излучения. Благодаря большому быстродействию ($\tau < 10^{-6}$ с) фотосопротивления из $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ находят применение в дополнительных каналах измерения временных характеристик.

Существенно лучшими метрологическими свойствами обладают фотодиоды, особенно кремниевые. Кремниевые фотодиоды в комбинации с современными операционными усилителями способны обеспечить линейность ватт-амперной характеристики более 5-и порядков изменения входного светового потока. Область спектральной чувствительности кремниевых фотодиодов составляет 0,4...1,2 мкм (максимум около 0,85 мкм), темновой ток не превышает 10^{-7} А, постоянная времени – менее 10^{-6} с. Практически все кремниевые фотодиоды рассчитаны на облучение, перпендикулярное *p-n*-переходу.

Германиевые фотодиоды по темновому току и быстродействию уступают кремниевым, но имеют более широкую область спектральной чувствительности 0,3...1,8 мкм (максимум в области 1,5 мкм).

В серийных средствах измерения энергетических параметров лазерных пучков практическое применение нашли кремниевые фотодиоды благодаря высокой линейности и стабильности ватт-амперной световой характеристики, хотя в оригинальных разработках используются *p-i-n* - фотодиоды, лавинные

фотодиоды и фототранзисторы. Лавинные и *p-i-n* – фотодиоды отличаются от простых фотодиодов повышенными чувствительностью и быстродействием; лавинные фотодиоды и фототранзисторы обладают внутренним усилением фототока.

Преимущества фотоприемников с внутренним фотоэффектом состоят в:
 а) высокой линейности преобразования свет – электрический сигнал; б) долговременной стабильности световой характеристики; в) низких ~ 10 В напряжениях электропитания; г) высокой механической прочности; д) неутомляемости.

В заключение этого раздела приведем параметры современных разработок СИ энергетических характеристик средств измерения лазерного излучения с кремниевыми фотодиодами в качестве чувствительных элементов.

Измеритель уровня оптической мощности Волгоградского госуниверситета:

стандартные длины волн, мкм....	0,63; 0,67; 0,87 0,91 (выбираются переключ.)
диапазон измерения мощности, мВт.....	2...200
разрешение по мощности, мВт.....	0,1
линейная апертура, мм.....	10
максимально допустимая входная мощность, Вт.....	1
погрешность, %	
- полная.....	не более 10
- искажения линейности.....	1
- погрешность калибровки.....	4
- температурный дрейф.....	5
- неоднородность поверхности детектора.....	5
- погрешность индикатора.....	5
рабочая температура, °С.....	5...45
потребляемая мощность, Вт.....	0,1
габариты, мм.....	166 × 84 × 42
вес, кг.....	0,4

Образцовое средство измерения средней мощности малых уровней – ОСИ СМ-М ВНИИОФИ предназначено для калибровки рабочих средств измерений и для высокоточных измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических линиях передачи. ОСИ СМ-М может применяться при исследовании, испытаниях и аттестации источников и приемников излучения малых уровней и позволяет производить измерения, как абсолютных значений, так и относительных уровней средней мощности оптического излучения. Оно состоит из двух оптических блоков: с кремниевым (для диапазона $0,85 \pm 0,1$ мкм) и германиевым (для диапазона $1,3 \pm 0,1$ мкм) фотодиодами, а также блока регистрации и представления информации. Возможна аттестация прибора для других длин волн в диапазоне $0,5 \dots 1,87$ мкм.

Характеристики образцового средства измерения средней мощности малых уровней – ОСИ СМ-М ВНИИОФИ:

диапазон длин волн, мкм.....	$0,85 \pm 0,1; 1,3 \pm 0,1$
диапазон средней мощности, Вт.....	$10^{-8} \dots 10^{-1}$
основная погрешность на длине волны калибровки, %.....	5
погрешность относительных измерений, %.....	2
погрешность в диапазоне длин волн, %.....	8

Тепловой метод измерения мощности и энергии лазерного излучения

Сущность теплового метода измерения энергетических параметров лазерного излучения состоит в том, что энергия излучения при взаимодействии с веществом приемного преобразователя превращается в тепловую энергию, которая и измеряется тем или иным способом. В тепловых приемниках излучения взаимодействие лучистого потока с веществом приводит к появлению температурного поля в чувствительном элементе и, как следствие, к повышению его температуры. Спектральная чувствительность тепловых приемников излучения постоянна в широком спектральном интервале, т.к. энергия фотонов преобразуется в тепло неселективно. В неселективности заключается основное преимущество тепловых приемников излучения и, соответственно, теплового метода.

На практике, естественно, спектральный интервал более или менее равномерной чувствительности также имеет ограничения, как с коротковолновой, так и длинноволновой сторон. В большинстве случаев коротковолновая граница спектральной чувствительности обусловлена проницаемостью материала чувствительного элемента и пропусканием входного окна, а длинноволновая граница – коэффициентом отражения чувствительного элемента и пропусканием окна.

Для увеличения абсолютной спектральной чувствительности тепловых приемников излучения необходимо, чтобы чувствительный элемент поглощал излучение в возможно более широком диапазоне длин волн. При этом повышение температуры должно быть прямо пропорционально полному поглощенному лучистому потоку. Для чего чувствительный элемент покрывают тонким слоем черни и придают ему, если это конструктивно выполнимо, форму, приближающую условия поглощения к идеальным – как в абсолютно черном теле.

В измерителях мощности и энергии лазерного излучения применяются следующие тепловые приемники излучения: радиационные калориметры, термоэлементы, болометры и пироприемники. По виду используемых

первичных измерительных преобразователей тепловые средства измерений энергетических параметров лазерного излучения классифицируют на калориметрические, термоэлектрические, пироэлектрические и болометрические.

Калориметрические измерители мощности и энергии лазерного излучения

Общепризнанными достоинствами калориметрического метода являются его простота, возможность абсолютной градуировки калориметрических средств измерений путем косвенных измерений энергии или мощности постоянного электрического тока (метод замещения энергии лазерного излучения энергией электрического тока) и возможность достижения высокой точности измерения.

Любая калориметрическая система содержит собственно калориметр или внутреннее калориметрическое тело K , в котором протекает процесс выделения или поглощения тепла, и внешнюю оболочку O , с которой происходит теплообмен калориметрического тела путем теплопроводности, конвекции и излучения. Теплообмен между калориметрическим телом и оболочкой определяется в первую очередь разностью температур их поверхностей:

$$\Delta T = T_K - T_O, \quad (5)$$

т.к. тепловой поток G от калориметрического тела на оболочку в широкой области температур пропорционален разности температур:

$$G = (T_K - T_O) / R_T, \quad (6)$$

где R_T – тепловое сопротивление среды между калориметрическим телом и оболочкой.

Другим важным параметром калориметра является теплоемкость калориметрического тела C , которая вместе с тепловым сопротивлением определяет постоянную времени калориметра τ и, тем самым, его быстродействие:

$$\tau = R_T C. \quad (7)$$

Из уравнения теплового равновесия калориметрического тела при постоянной мощности излучения P , рассеиваемой в неизотермическом калориметре, можно получить временную зависимость температуры калориметрического тела:

$$T(t) = R_T P [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (8)$$

Прямая пропорциональность максимальной температуры калориметрического тела выполняется и для энергии импульсного или импульсно-периодического лазерного излучения

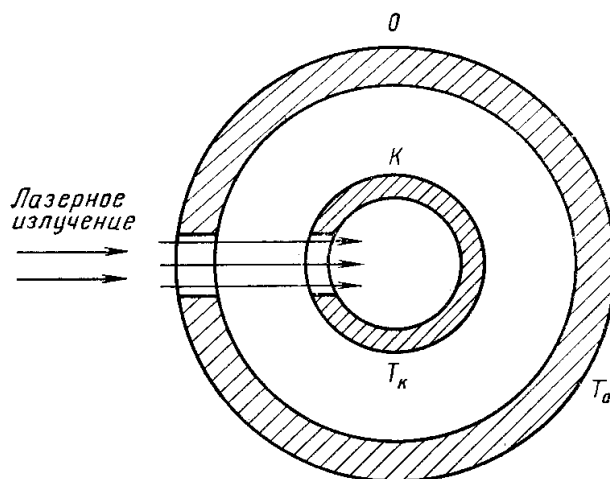


Рис. 2. Принципиальная схема калориметра

Теоретически, из выражения (8) следует, что максимальное значение температуры достигается при $t \rightarrow \infty$. Поэтому следует уменьшать постоянную времени калориметра, но лишь путем уменьшения теплоемкости калориметрического тела, т.к. уменьшение R_T вызовет уменьшение чувствительности калориметра. Уменьшение теплоемкости наталкивается на физические ограничения, обусловленные требованиями стойкости к лазерному излучению, диаметру входного окна, интегрированием температуры по поверхности калориметрического тела, т.к. лазерные пучки имеют неравномерное распределение плотности мощности по поперечному сечению. Поэтому реализованные на практике калориметрические приемники для

средств измерения мощности и энергии лазерного пучка имеют постоянную времени не менее 1 с.

Производимые серийно калориметрические измерители средней мощности и энергии лазерного излучения имеют чувствительным элементом калориметр переменной температуры, хотя можно встретить и оригинальные разработки с калориметрами постоянной температуры или изотермическими. Много подобных конструкций описано в книге (Иващенко П.А., Калинин Ю.А., Морозов Б.Н. Измерение параметров лазеров. - М.: И-во стандартов, 1982. - 168 с.). Видимо, исторический этап широкого применения калориметров для измерения энергетических параметров лазерного пучка остался позади. Объяснение широкому распространению калориметрического метода на заре развития лазерной техники может состоять в том, что калориметр как прибор довольно совершенен, и он оказался востребован с появлением мощных лазеров в конце 70-х годов 20-го века.

В радиационных калориметрах излучение поглощается развитым объемным приемным элементом – поглотителем, повышение температуры которого измеряется с помощью термопар, термосопротивлений, емкостных датчиков или пироэлементов. С одной стороны, благодаря объемному поглотителю приемные элементы выдерживают большие лучевые нагрузки и обладают интегрирующим свойством по поперечному сечению и во времени. Это делает отклик калориметра независимым от формы возможно сложной функции плотности мощности от координат в поперечном сечении падающего на них излучения и его временной структуры. С другой стороны, объемный поглотитель увеличивает постоянную времени приемника излучения и уменьшает коэффициент преобразования лучистой энергии в электрический сигнал, что особенно неблагоприятно сказывается при измерениях малых уровней энергии и мощности излучения.

По форме приемного элемента радиационные калориметры делятся на плоские и полостные. В серийных средствах измерения наибольшее

распространение получили полостные калориметры с коническим приемным элементом.

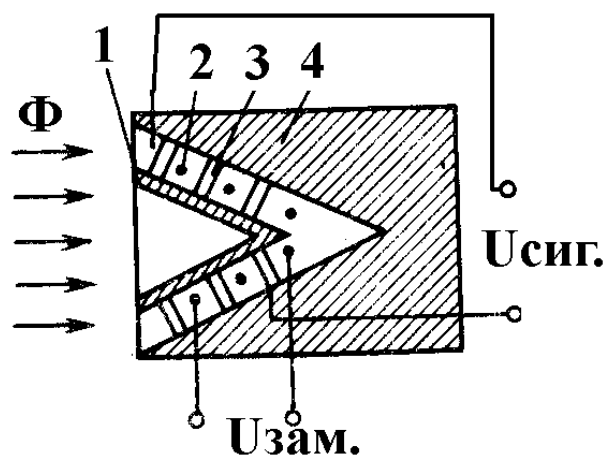


Рис. 3. Устройство полостного калориметра измерителя мощности и энергии лазерного излучения ИМО – 2Н: 1- приемный элемент; 2- электрический нагреватель замещения; 3- медь-константановая термобатарея; 4- пассивная теплоемкость

Устройство калориметрического приемника излучения серийного измерителя средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО – 2Н, выпускаемого Волгоградским экспериментальным заводом «Эталон», представлено на рис. 3. Приемный элемент 1 выполнен в виде медного конуса с внутренним поглощающим покрытием. С наружной поверхностью конуса имеют тепловой контакт электрический нагреватель замещения 2 и горячие спаи медь-константановой термобатареи 3, содержащей 2000 термопар, равномерно распределенных между наружной поверхностью приемного элемента и поверхностью пассивной теплоемкости 4. Сигнал с термобатареи $U_{ам}$ через усилитель постоянного тока подается на регистрирующий прибор. На электрический нагреватель подается напряжение замещения $U_{зам}$, которое используется для калибровки прибора.

В настоящее время Волгоградский экспериментальный завод «Эталон» выпускает средство измерения средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО – 3, средство измерения средней мощности лазерного излучения ИМО – 4 и ИМО – 4С с калориметрическими преобразователями.

Поскольку наиболее универсальным из них является ИМО – 3, то с его параметрами имеет смысл познакомиться более подробно:

диапазон измерения:

средней мощности (с ослабителем), Вт.....	$3 \cdot 10^{-4}$...100
энергии (с аттенуатором), Дж.....	$3 \cdot 10^{-7}$...750
спектральный диапазон, мкм.....	0,48...1,06 и 10,6

предел допускаемой основной погрешности, %:

в режиме измерения средней мощности.....	5...6
в режиме измерения энергии.....	5...20
диаметр пучка измеряемого излучения, мм.....	4...12
предельное время установления рабочего режима (постоянная времени), мин.....	1
время непрерывной работы в сутки, не менее, час.....	16
наработка на отказ, не менее, час.....	5000

напряжение питания, В:

от встроенного источника.....	3,5...4,5
от сети 50 Гц.....	220
потребляемая мощность, не более. Вт.....	10

габаритные размеры, не более, мм:

первичного преобразователя ПИП-1 с механизмом юстировки.....

.....170×195×315

первичного преобразователя ПИП-2.....	184 × Ø85
специализированного цифрового измерителя ЦР 6802.....	260×180×75
ослабителя мощности.....	170×210×294
аттенуатора.....	Ø90×183
масса, не более, кг.....	15

Термоэлектрические измерители мощности и энергии лазерного излучения

В основе принципа действия термоэлемента лежит принцип термопары – термоэлектрический эффект Зеебека, который заключается в появлении термо-э.д.с. в цепи, состоящей из двух разнородных по составу проводников при нагревании падающим лучистым потоком места их спая. Различие между термоэлектрическим приемником излучения и радиационным калориметром обнаруживается не всегда. Приемный преобразователь следует считать радиационным калориметром, если температура объемного поглотителя измеряется не термоэлектрически, или когда основные параметры приемного преобразователя – постоянная времени и теплоемкость определяются поглотителем, а не термопарой.

Преимущества классического термоэлектрического приемника излучения – термопарного спая – перед радиационным калориметром – на несколько порядков меньшая постоянная времени, нивелируется в энергетической фотометрии лазерных пучков малыми размерами спая. Изготавливать радиационные термоэлементы с размером чувствительного элемента более 1 см² и достаточной чувствительностью сложно. Единственным нашедшим на сегодняшний день применение в средствах измерения мощности и энергии лазерного излучения термоэлектрическим приемником является анизотропный термоэлемент.

Анизотропный термоэлемент изготавливают из пластинки одного термоэлектрически анизотропного монокристалла. Градиент температуры должен создаваться под углом к одной из кристаллографических осей, относительно которой наблюдается наибольшая анизотропия термо-э.д.с.

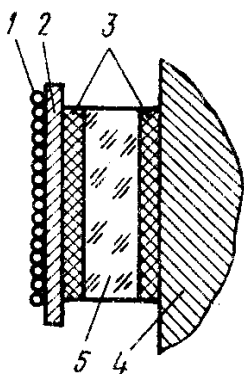


Рис. 4. Устройство анизотропного термоэлектрического приемника излучения: 1- камфорная чернь; 2- медная фольга толщиной 20 мкм; 3- теплопроводящий клей; 4- теплоотвод; 5- монокристалл сурьмянистого кадмия

Возможная конструкция анизотропного термоэлемента представлена на рис. 4.

ВНИИОФИ предлагает измерительные преобразователи лазерного излучения ан анизотропных термоэлементах – «ГРАДИЕНТ-30БН» и «ГРАДИЕНТ-70БН» с параметрами, приведенными в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Технические характеристики преобразователей «ГРАДИЕНТ-30БН» и «ГРАДИЕНТ-70БН»

Модель	ГРАДИЕНТ-30БН	ГРАДИЕНТ-70БН
Рабочий диапазон длин волн, мм	0,24...12	0,24...12
Диапазон измеряемых значений средней мощности, Вт	0,1...200	1...800
Диаметр измеряемых пучков, мм	5...30	5...70
Допустимая локальная плотность мощности, Вт/см ² , не более	1000	1000
Коэффициент преобразования, мВт/В	0,4	0,1
Внутреннее сопротивление, кОм	3	10
Предел допускаемой основной погрешности, не более, %	1,5...4	2...5
Постоянная времени, не более, с	10	15
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	2...4	3...5
Габариты, мм	Ø75×65	Ø120×95
Масса, не более, кг	0,6	6

Фирма «Астрофизика» предлагает пленочные анизотропные термоэлектрические преобразователи для преобразования непрерывного, импульсного и импульсно-периодического излучения в пропорциональное мощности значение электрического напряжения с техническими характеристиками:

рабочий диапазон длин волн, мкм.....0,3...20
 диапазон значений средней мощности, Вт
 без принудительного охлаждения.....0,5...35
 с принудительным охлаждением.....0,1...1000
 диапазон значений мгновенной мощности, Вт.....0,1...10⁶

постоянная времени, мс.....	100, 1, 0,01
коэффициент преобразования, не менее, мкВ/Вт.....	50
входная апертура, мм.....	35
погрешность измерения мощности, не более, %.....	10
масса, кг.....	0,5

Болометрические измерители мощности и энергии лазерного излучения

Принцип действия болометра основан на изменении электрического сопротивления полупроводника или металла под действием падающего на него лучистого потока при изменении его температуры. Последнее – изменение температуры – является главным отличительным признаком болометра от фоторезистора. Относясь к тепловым приемникам, болометр спектрально неселективен в широкой области. Чувствительный слой болометра выполняют обычно в виде металлической или полупроводниковой пленки, представляющей собой термосопротивление. Конструктивно чаще всего болометр содержит два термочувствительных сопротивления, одно из которых облучается лучистым потоком, а второе – компенсационное – компенсирует изменение температуры внешней среды.

В настоящее время обычные болометры редко используются в качестве приемных преобразователей средств измерения мощности и энергии лазерного излучения. Проволочные болометры, представляющие собой редкую квадратную решетку из металлической проволоки диаметром 3...50 мкм находят применение в оригинальных конструкциях приемных преобразователей средств измерения мощности и энергии излучения проходного типа, т.к. при диаметре проволоки в несколько микрон и периоде 1 мм или более легко получается коэффициент пропускания приемного преобразователя более 98%. Материалом проволоки служит платина, золото, никель. Решетка выполняется двойной с взаимно перпендикулярным расположением проволок для устранения зависимости показаний от направления поляризации измеряемого излучения.

Экспериментальный образец ваттметра проходящей мощности с приемным преобразователем в виде двойной решетки из платиновых проволок диаметром 3,8 мкм имеет следующие параметры: диаметр входного окна 25 мм, коэффициент пропускания более 99%, начальное сопротивление 10 кОм, коэффициент преобразования 0,39 Ом/Вт, погрешность относительных измерений 9%, абсолютных – 13%.

Альтернативой классическим болометрам служат болометры сверхпроводящие благодаря высокой чувствительности и быстродействию, обусловленному малой теплоемкостью материалов при низкой температуре. Такие болометры основаны на резком изменении сопротивления при переходе от нормального состояния в сверхпроводящее. В переходном диапазоне температур кратность изменения сопротивления может достигать 50 при изменении температуры всего на 1 К.

С появлением высокотемпературных сверхпроводников, переход которых в сверхпроводящее состояние наблюдается при температуре жидкого азота (73 К) и выше, стало экономически оправданным применение высокотемпературных сверхпроводящих болометров (ВТСП-болометров) в средствах измерения параметров излучения широкого применения. Так Государственный оптический институт (ГОИ) предлагает двухканальное приемное устройство на основе ВТСП-болометров (табл. 2).

Таблица 2

Технические характеристики приемного устройства на основе ВТСП-болометров

№ канала	1-й канал	2-й канал
Спектральный диапазон, мкм	1...50	100...1000
Рабочая температура, К	87,5	85
Диаметр рабочего окна, мм	20	20
Размеры болометра, мм	2x3	0,002x0,014
Постоянная времени, с	0,2	$3 \cdot 10^{-7}$
Эквивалентная мощность шума, Вт Гц ^{1/2}	$2 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$
Обнаружительная способность, см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	$1,2 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^{10}$
Габариты криостата, мм	Ø100x250	Ø100x250
Время удержания жидкого азота, час.	20	20
Объем жидкого азота, л	0,3	0,3

Оно предназначено для регистрации ИК и субмиллиметрового излучений и содержит ИК-составной болометр на слюдяной подложке и субмиллиметровый антенный микроболометр. (Обратить внимание на соотношение размеров болометра и быстродействие.)

Пироэлектрический метод измерения мощности и энергии лазерного излучения

Принцип работы пироэлектрических измерительных преобразователей основан на использовании пироэлектрического эффекта, заключающегося в изменении поляризации пироактивного кристалла при изменении его температуры. Особенность пироэлектрических кристаллов состоит в их спонтанной поляризации при отсутствии внешних электрических полей. При постоянной температуре эту поляризацию нельзя обнаружить по наличию поверхностных зарядов, т.к. последние компенсируются объемной и поверхностной проводимостями кристалла. Однако поскольку спонтанная поляризация зависит от температуры, то при ее изменении на гранях кристалла, перпендикулярных к полярной оси изменения поверхностного заряда может быть обнаружено. Поэтому при применении пироприемников в качестве первичных преобразователей средств измерения мощности непрерывного лазерного излучения поток излучения модулируется чаще всего механическим модулятором. При измерении энергии импульсного излучения модулятор не используется.

Для изготовления пироприемников применяют пироэлектрические кристаллы титаната бария, триглицинсульфата, ниобата лития и др. Чувствительный элемент пироприемника представляет собой пластинку, изготовленную из монокристалла площадью 1...5 мм² толщиной 50...150 мкм. Конструктивное оформление чувствительного элемента показано на рис. 5.

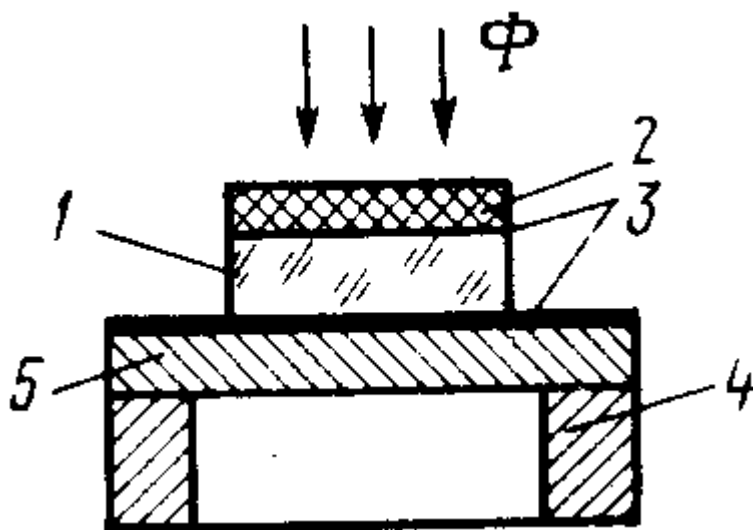


Рис. 5. Конструкция чувствительного элемента пироприемника: 1- пирокристалл; 2- поглощающее покрытие; 3- электроды; 4- опорное кольцо; 5- мейларовая прокладка.

Пироэлектрический ток – сложная функция физических характеристик кристалла, его геометрических размеров и условий теплообмена с окружающей средой. Значение пироэлектрического тока, который по самому принципу работы является переменным, зависит от двух основных факторов – среднего прироста температуры и скорости изменения прироста температуры. Средний прирост температуры пироэлектрического приемника как приемника теплового обратно пропорционален частоте модуляции, но скорость его изменения прямо пропорциональна частоте модуляции. Действие этих двух факторов уравнивается в достаточно широком диапазоне частот. Этим объясняется малая инерционность пироэлектрического приемника по сравнению с другими тепловыми.

Хотя постоянная времени пироприемников с внешним чувствительным элементом доведена до 1 мкс, а при работе на собственном поглощении - до 10 нс, частоту модуляции непрерывного излучения при измерении его мощности пироприемником выбирают в диапазоне 1...100 Гц, т.к. эти частоты соответствуют максимуму амплитудной частотной характеристики пироприемника. (По крайней мере, пироприемника с предусилителем, входное сопротивление которого должно быть большим ~ 1 ГОм.) С другой стороны,

низкие частоты модуляции обеспечиваются механическими обтюраторами, высокие метрологические характеристики которых (отношение прозрачных и непрозрачных площадей) определяются погрешностями воспроизведения геометрической формы обтюлятора.

Пироэлектрический ватт-джоульметр ПВДЦ-2 Специального конструкторско-технологического бюро физического приборостроения (Киев, Украина) представляет собой комплекс для измерения средней мощности и энергии лазерного излучения. Он состоит из двух приборов: ваттметра ПВДЦ-2 и джоульметра ПДЦ-2. В состав ПВДЦ-2 входят три измерительные головки, модулятор, измерительный блок и юстировочный столик, а в состав ПДЦ-2 – две измерительные головки, измерительный блок и юстировочный столик; его технические характеристики приведены ниже:

измеряемая средняя мощность (ПВДЦ-2), Вт.....	10^{-7} ...2
измеряемая энергия импульсов (ПДЦ-2), Дж.....	10^{-6} ...1
спектральный диапазон, мкм.....	0,25...15
апертура, мм:	
ПВДЦ-2.....	2...25
ПДЦ-2.....	2...14
допускаемая основная погрешность, %.....	8
время между двумя измерениями (ПДЦ-2), не более (может не менее?), с.....	1
габариты, мм:	
измерительная головка.....	82×82×210
модулятор.....	164×160×300
измерительный блок.....	204×130×150
юстировочный столик.....	204×130×150
масса, кг:	
ПВДЦ-2.....	9
ПДЦ-2.....	7

Российский НИИ «Полюс» предлагает пироэлектрические приемники ИК-излучения ПМ-3, ПМ-4 и ПМ-02. Они предназначены для детектирования модулированного ИК-излучения в спектральном диапазоне 2...20 мкм. Входное окно приемника просветлено для обеспечения максимальной чувствительности в диапазоне 7...14 мкм. ПМ-3 рекомендуется использовать при частотах модуляции свыше 20 Гц и повышенном уровне вибраций, а ПМ-4 и ПМ-02 – при частотах 0,1...20 Гц. Их технические характеристики приведены в табл. 3.

Таблица 3.3

Технические характеристики пироэлектрических приемников НИИ «Полюс»

Модель	ПМ-3	ПМ-4	ПМ-02
Пороговый поток (при частоте модуляции 20 Гц), Вт Гц ^{-1/2}	3 · 10 ⁻⁹		
Пороговый поток (при частоте модуляции 2...20 Гц), Вт Гц ^{-1/2}	- -	1,5 · 10 ⁻⁹	3 · 10 ⁻⁹
Вольтовая чувствительность, не менее, В/Вт			
- при частоте модуляции 20 Гц	100	100	80
- при частоте модуляции 2 Гц	300	1000	800
Диаметр приемной площадки, мм	1,5	1,5	2,6
Угол поля зрения, не менее, град	90	90	- -
Рабочая температура, °С	-60...+60		
Габариты, мм	Ø8,3×11		
Масса, г	3		

Пондеomotorный метод измерения мощности и энергии лазерного излучения

В пондеomotorных измерителях мощности и энергии лазерного излучения используется эффект давления электромагнитного излучения, открытый в начале прошлого столетия русским физиком П.Н.Лебедевым. Лазерное излучение падает на тонкую приемную металлическую или диэлектрическую пластину и давит на нее. Давление измеряется чувствительным преобразователем. Первые пондеomotorные измерители энергии и мощности лазерного излучения представляли собой, в сущности, крутильные весы с металлической приемной пластинкой на торсионном подвесе в вакуумированной камере (рис. 6).

Из решения уравнения движения крутильного маятника можно получить значение угла поворота α приемной пластины 1, уравновешенной противовесом 3, при воздействии на нее непрерывного излучения мощностью P

$$\alpha = \frac{(1 + \rho)\gamma \cdot r \cdot \cos \varphi}{c\varepsilon} P, \quad (9)$$

где ρ - коэффициент отражения пластины; γ - коэффициент пропускания входного окна; r - расстояние от оси пучка до оси вращения; φ - угол падения излучения на пластину; c - скорость света; ε - жесткость подвеса.

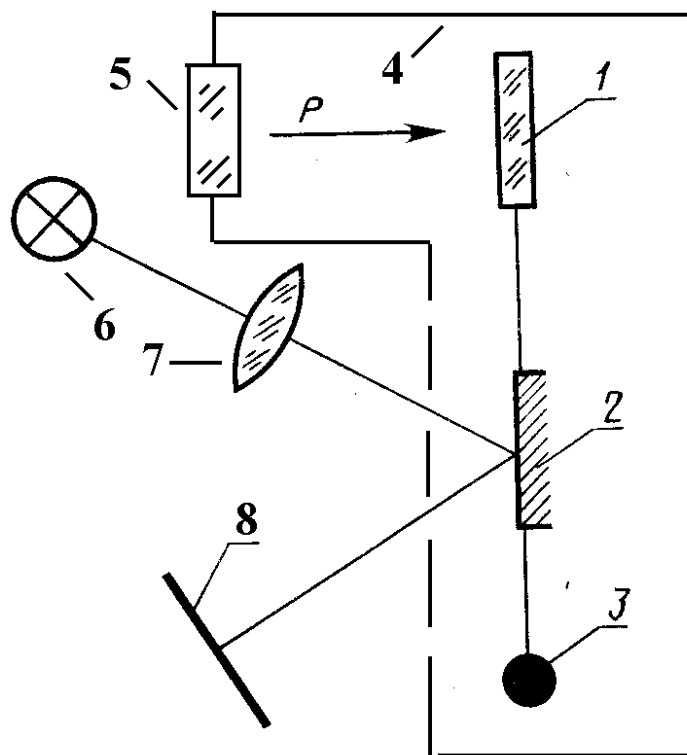


Рис. 6. Функциональная схема поддемоторного измерителя мощности и энергии лазерного излучения: 1- приемная площадка; 2- зеркало измерителя угла поворота подвеса; 3- противовес; 4- вакуумная камера; 5- входное окно; 6- источник света измерителя угла поворота; 7- линза измерителя угла поворота; 8- отсчетная шкала измерителя угла поворота

Аналогичное выражение можно получить для максимального угла отброса α_{\max} под действием импульса излучения энергией W_u :

$$\alpha_{\max} = \frac{(1 + \rho)\gamma \cdot r \cdot \cos \varphi}{c\sqrt{J\varepsilon}} W_u, \quad (10)$$

где J – момент инерции приемного элемента; α и α_{\max} отсчитываются по шкале 8 по отклонению светового зайчика от зеркальца 2, укрепленного на подвесе. Измеритель градуируется механическим способом по периоду свободных колебаний маятника. Измерив оптические параметры измерителя ρ , γ и плечо g , можно по формулам (9) и (10) определить энергию и мощность излучения в абсолютных единицах.

Крутильные весы – один из наиболее чувствительных преобразователей давления излучения. Применение их в пondeмоторных измерителях позволяет измерять мощность лазерного излучения, начиная с единиц милливатт, и энергию импульсов в десятые доли джоуля.

В настоящее время в конструкцию пondeмоторных измерителей введено много усовершенствований, которые позволили усовершенствовать их эксплуатационные, технические и метрологические параметры. Прежде всего, оказалось возможным отказаться от вакуумирования и использовать атмосферное давление воздуха в камере, что позволило устранить многие технические трудности в изготовлении и эксплуатации и значительно расширить спектральный диапазон работы прибора отказом от входного окна 5. Однако, несмотря на преимущества пondeмоторного метода, состоящие в высоком верхнем пределе измерения энергии и мощности при достаточно высокой точности абсолютных измерений и возможности независимой градуировки, малая механическая прочность и вследствие этого жесткие требования к условиям эксплуатации ограничивают широкое применение измерителей этого типа. Теми же причинами обусловлено и отсутствие их серийного производства.

Сопоставление методов измерения мощности и энергии лазерного излучения

Имеющийся отечественный и зарубежный опыт разработки и эксплуатации измерителей энергии и мощности лазерного излучения

различных типов позволяет сделать заключение об областях применения, достоинствах и недостатках различных методов.

К достоинствам теплового метода измерения энергетических параметров лазерного излучения относятся широкий спектральный и динамический диапазоны измерения, простота и надежность измерительных средств. В калориметрических тепловых измерителях достигнута наиболее высокая точность измерения.

До недавнего времени тепловые измерительные преобразователи значительно уступали по быстродействию фотоэлектрическим. Однако с появлением пироэлектрических приемников излучения и с разработкой быстродействующих термоэлементов и болометров удалось довести постоянную времени тепловых преобразователей некоторых типов до единиц наносекунд.

К недостаткам теплового метода можно отнести малое быстродействие и чувствительность как раз тех тепловых приборов, которые обеспечивают наиболее высокую точность измерения. И здесь своеобразно проявляется принцип дополненности.

В приборах, основанных на фотоэлектрическом действии излучения, достигаются максимальная чувствительность и быстродействие, что позволяет использовать их в качестве измерителей формы импульсов и импульсной мощности вплоть до наносекундного диапазона. Недостатком фотоэлектрических приборов является сравнительно узкий спектральный диапазон и обычно невысокий верхний предел измерения мощности и энергии. Как правило, фотоэлектрические измерители имеют меньшую по сравнению с тепловыми приборами воспроизводимость показаний и большую погрешность измерений.

Литература

1. Системы контроля лазерного излучения: Каталог-справочник по странам СНГ и Балтии. – М.: НТИУЦ ЛАС, 2000. – 36 с.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность – один из наиболее важных, определяющих функциональных показателей любых технических устройств и систем. От надежности зависят безопасность, экономичность, ресурс работы (а значит, ресурсосбережения), конкурентоспособность. Ведущей концепцией, на основе которой решается задача повышения надежности техники на современном этапе ее развития, является системность. Системы обеспечения надежности, составляя важнейшую часть системы обеспечения качества, охватывают весь жизненный цикл изделия от разработки до эксплуатации. При этом методы достижения надлежащего уровня надежности специфичны для каждого этапа жизненного цикла. Так, ключевыми методами обеспечения проектной надежности являются: а) выбор соответствующих материалов; б) выбор запасов прочности; в) применение конструкций, исключающих взаимовлияние отдельных элементов; г) различные схемы резервирования; д) неразъёмуемые оптические схемы и т.п.

Инженерные методы обеспечения надежности

Технологическая надежность обеспечивается бездефектными стабильными технологическими процессами производства. Эксплуатационная надежность определяется организацией технического обслуживания, где сейчас прослеживается несколько тенденций. Одна из них – классическая, основанная на статистической теории надежности, сложившаяся в условиях массового производства, позволяет планировать стратегии обслуживания в среднем для партии идентичных изделий и не гарантирует оптимальное обслуживание каждого отдельного изделия этой партии. Результатом планирования при таком подходе является определение некоторых нормативных показателей, например, назначенного ресурса. Однако накопление статистических данных об отказах различного вида техники показало, что отказы происходят как в период назначенного ресурса, так и за его пределами. Поэтому наблюдается устойчиво

растущая потребность в разработке методов обслуживания каждого конкретного изделия по его фактическому состоянию.

Зародившись при развитии учения о качестве как условии обеспечения бездефектного производства, данное направление особенно актуально для сложных технических систем, отказы которых связаны с прямой угрозой для человеческой жизни (наземный и водный транспорт, авиация, ракетно-космическая техника) или экологическими последствиями (химическая, газо- и нефтеперерабатывающая промышленность, ядерная энергетика). Фирма «Боинг» считает обслуживание по фактическому состоянию технологией 21-го века.

Потенциальная безотказность, заложенная при проектировании системы, должна обеспечиваться в производстве. Дефекты, допущенные в производстве и вовремя не выявленные контролем и испытаниями, могут привести к отказам в процессе эксплуатации и снижению качества. Концепция качества в своем развитии прошла два этапа. Основу обеспечения качества на первом этапе можно кратко сформулировать так: потребитель должен покупать только годные изделия; основные усилия были направлены на то, чтобы негодные изделия (брак) были отсечены от потребителя.

Последовательное воплощение в жизнь этой концепции привело к тому, что в 20-е годы численность контролеров в высокотехнологичных отраслях (авиационной, военной промышленности) стала составлять 30-40% от численности производственных рабочих. В рамках этой концепции повышение надежности, а следовательно и качества, всегда сопровождалось ростом затрат на ее обеспечение, т.е. цели повышения надежности изделий и эффективности производства являлись противоречивыми. Место концепции недопущения брака потребителю в 50-е годы заняла концепция «ноль дефектов».

Основной упор в концепции «ноль дефектов» делается на предупреждении появления дефектов, а не на их обнаружении и исправлении (превентивный подход, как в медицине – профилактика, а не лечение заболеваний). Центральной идеей концепции является измерение уровня

качества, т.е. выявление потенциальных несоответствий, разработка способов их объективной оценки и методов эффективных корректирующих воздействий.

Появление брака, дефектов и отказов свидетельствует о недостаточной надежности некоторых элементов технологической системы и требует оперативного проведения мероприятий по их предотвращению. Трудности на этом пути состоят в том, что многие дефекты носят скрытый характер и установление причин их появления представляет сложную задачу. Дело в том, что один и тот же дефект (например, трещина) может быть обусловлен различными причинами конструктивного, производственно-технологического или эксплуатационного характера. С другой стороны, достоверность причины возникновения дефекта определяет эффективность вырабатываемых мероприятий по их устранению. Следствием указанных трудностей является то, что разработка мероприятий по предотвращению дефектов в авиадвигателестроении требует в среднем 135 дней, а в ряде случаев и 3 – 3,5 года.

Для целенаправленного решения вопросов по обеспечению надежности продукции необходимо, в первую очередь, выявить причины ее недоброкачества. Важную роль в выявлении указанных причин играет диаграмма Парето, которая отражает весомость различных факторов по их вкладу в снижение надежности. Факторы, влияющие на надежность продукции, – детали из состава сборочной единицы, дефекты детали, причины дефекта, технологические операции, исполнители и т.д. – располагаются на диаграмме по оси абсцисс по убывающей степени их влияния на уровень негативных последствий, в качестве которых могут быть те или иные показатели надежности – интенсивность отказов, число отказов и т.п., которые откладываются по оси ординат. Таким образом, в левой части диаграммы группируются факторы, которые в большей степени должны быть подвергнуты анализу.

Допустим, сборка содержит 10 деталей, число отказов по причине поломки каждой из них приведено в табл. 1. По этой таблице строится

диаграмма Парето, причем 7-ю деталь мы должны поставить на первое место, 3-ю – на второе, 2-ю – на третье и т.д. Из диаграммы Парето видно 7-я и 3-я детали дают 75% общего числа отказов (см. рис. 1).

Таблица 1

Количество дефектных деталей в сборке

№ дет.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>N</i>	5	10	25	1	2	2	50	3	1	1



Рис. 1. Распределение количества дефектных деталей по их номерам

Подобным образом строят диаграммы, у которых по оси абсцисс вместо наименований или номеров деталей фигурируют дефекты одной детали, например, занижен наружный диаметр, увеличен скос кромки и т.п. Далее следует построить диаграмму Парето по причинам конкретного дефекта: износ режущего инструмента при обработке, неточность станка, ошибки в управлении станком, неопытность оператора, устаревший чертеж и т.п. В ряде случаев на основе проведенных таким образом исследований удастся выделить доминирующий фактор. Так при механической обработке таким доминирующим фактором является состояние режущего инструмента.

Затраты на обеспечение качества и надежности продукции распределяются следующим образом: а) на предупредительные мероприятия

(анализ производственных процессов, исследования в области надежности, создание системы сбора информации, содержание управленческого аппарата по качеству продукции и др.) 5 – 10%; б) на оценку качества продукции (входной контроль, проведение текущего контроля и испытаний, содержание контрольно-измерительной лаборатории и т.п.) 16 – 32%; в) мероприятия, связанные с браком (анализ дефектов, потери от брака, изготовление деталей взамен негодных, содержание станций обслуживания и т.п.) 79 – 58%.

В промышленно развитых странах отмечается тенденция перераспределения средств из группы затрат в) в группу а), т.е. на бездефектное изготовление продукции, при этом сокращаются общие затраты на качество. Особых успехов в этом направлении достигла промышленность Японии, что позволило ей снизить долю контролеров до 5%, а на ведущих фирмах до 1%. В промышленности Западной Европы эта доля составляет 15%.

Основные определения теории надежности

Под надежностью понимается свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих установленным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования (ГОСТ 13377-75). В соответствии с действующими нормативными документами (ГОСТ 13216-74) надежность является одной из составляющих качества.

Надежность – это комплексное свойство и в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации она может включать четыре составляющих: а) безотказность; б) ремонтпригодность; в) сохраняемость; г) долговечность. Определения этих составляющих даны в ГОСТ 27.002-83.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени (или наработки).

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения

отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонта и технического обслуживания.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение хранения и после него и при транспортировке.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Простыми называются изделия, эффективность которых при отказе равна нулю.

Для сложных изделий характерно постепенное снижение эффективности. Для определения отказа сложного изделия необходимо задать допустимую границу снижения эффективности. Тогда состояние выхода ее значений за эту границу можно считать отказом. Так, например, для лазерной технологической установки может быть задано предельное значение погрешности позиционирования. Изделия, в которых (или для которых) может быть задана допустимая граница эффективности, называют квазипростыми.

Существует большое число изделий, для которых указать строго границу допустимой эффективности нельзя. Так, например, при поломке робота в производственном модуле подача заготовок может производиться вручную, т.е. отказа модуля не происходит. В случае, когда понятие отказа не определено, используется другая интерпретация показателя надежности. В этом случае в качестве показателя надежности принимается отношение реального и идеального изделий. Данный показатель называется коэффициентом снижения эффективности или относительной эффективностью сложного изделия. (Т.е. здесь все происходит как и с назначением уровней для измерения расходимости.)

Поскольку появление отказов, а также изменение характеристик лазерной установки в процессе эксплуатации носят случайный характер, то для

количественной оценки параметров надежности широко используются вероятностные методы.

Литература

1. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. – М.: Логос, 2001. – 208 с.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА ПУЧКА

Вновь обращаемся к ГОСТу 24453 - 80. Измерение параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин, где диаметр пучка определяется как диаметр поперечного сечения пучка лазерного излучения, внутри которого проходит заданная доля энергии или мощности лазерного излучения. Обозначается диаметр буквой d . Следовательно для измерения диаметра пучка нужно, во-первых, задать эту долю энергии или мощности пучка, по которой будет определяться диаметр пучка, и, во-вторых, каким-либо методом измерить этот диаметр. Поскольку существует ГОСТ 26086-84 Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения, то с методами все нормировано и есть руководство к действию. Что же касается той доли мощности или энергии, то для ее выбора единых требований нет, а есть просто отсылка к стандартам или техническим условиям на лазеры конкретных типов.

ГОСТ 26086-84 Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения распространяется на лазеры непрерывного и импульсного режимов работы и устанавливает два метода измерения диаметра пучка излучения: а) метод калиброванных диафрагм; б) метод распределения плотности мощности (энергии) лазерного излучения. (Далее будем употреблять термин "мощность", хотя в ГОСТе в скобках почти всюду присутствует термин "энергия". Если вдруг какое-то положение окажется справедливым лишь для одного из них, то на это будет обращено внимание.)

Стиль изложения ГОСТа 26086-84 Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения приблизительно такой же, как и предыдущего, касающегося методов измерения ОРПМ. Причем, один из методов измерения диаметров, а именно, метод измерения распределения плотности мощности лазерного излучения прямо отсылает к ГОСТ 25917-83. Методы измерения относительного распределения плотности энергии (мощности) излучения и различие состоит лишь в обработке результатов

измерения. Поэтому рассмотрим суть гостированных методов и затронем интересные и важные взгляд особенности ГОСТа 26086-84.

Метод калиброванных диафрагм

Измерение основано на определении диаметра диафрагмы, через которую проходит заданная доля мощности лазерного излучения. Схема расположения средств измерения и вспомогательных устройств приведена на рис.1.

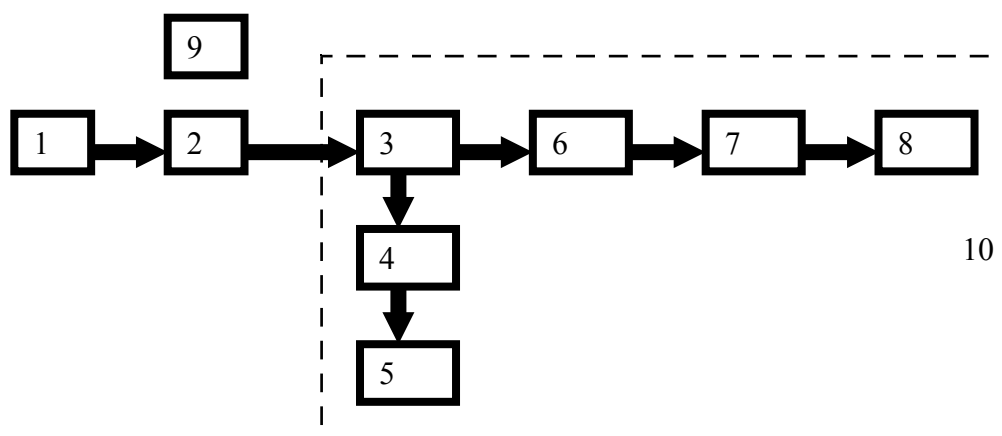


Рис.1. Схема расположения средств измерения: 1-лазер; 2-ослабитель; 3-ответвитель; 4,7-оптическая система; 5,8-средства измерения мощности (энергии); 6-калиброванная диафрагма; 9-средство юстировки; 10-устройство для измерения диаметра пучка излучения

Тут по сравнению со схемой измерения ОРПМ три новых элемента: а) ответвитель, б) второй измеритель мощности пучка, в) диафрагма. Хотя диафрагма была и в измерителе ОРПМ, но здесь она имеет другое назначение и требования к ней иные.

Ответвитель должен обеспечивать разделение пучка излучения с погрешностью (имеется ввиду пространственная неоднородность) в пределах $\pm 3\%$. Ответвителем может служить полупрозрачная пластинка с коэффициентом ответвления определяемым соотношением чувствительности средств измерения мощности излучения 5 и 8. Если они одинаковые, то ответвлять нужно $\approx 50\%$ (в отличие от контроля мощности технологических лазеров, где ответвляется 1...2%).

Диафрагма при измерении диаметра пучка и расходимости устанавливается перпендикулярно направлению распространения пучка и

должна обеспечивать: а) пропускание мощности лазерного излучения в диапазоне от z_1 до $(0,7 \gamma_n z_1)$ (z_1 - полная мощность пучка, γ_n - установленный в стандартах или ТУ на лазеры конкретных типов уровень мощности по которому измеряется диаметр пучка); б) плавное или ступенчатое изменение диаметра поперечного сечения пучка лазерного излучения, попадающего на средство измерения мощности 8, с шагом не более $0,2d$, d - диаметр пучка, указанный в стандартах или ТУ на лазер; в) погрешность определения диаметра отверстия диафрагмы D должна быть в пределах $\pm 3\%$. Допускается использовать набор сменных калиброванных диафрагм.

Измерения проводят следующим образом: а) проводят юстировку, добиваясь попадания пучка лазерного излучения в центральную часть диафрагмы, приемных площадок ослабителя, ответвителя, оптических систем и средств измерения мощности (Вот здесь можно отметить недостаток ГОСТа, заключающийся в том, что юстировка производится "на глазок" и никак не учитываются ни координаты ОДН, ни ее нестабильность); б) устанавливают диаметр диафрагмы D_1 , при котором через диафрагму проходит полная мощность излучения z_1 ; в) измеряют мощность лазерного излучения z_1 и z'_1 средствами измерения 8 и 5 соответственно; г) уменьшая диаметр диафрагмы, определяют z_i и z'_i , где $i = 2, 3, \dots, n$. Измерения проводят не менее чем при пяти различных диаметрах диафрагмы, если иное не установлено в стандартах и ТУ на лазер.

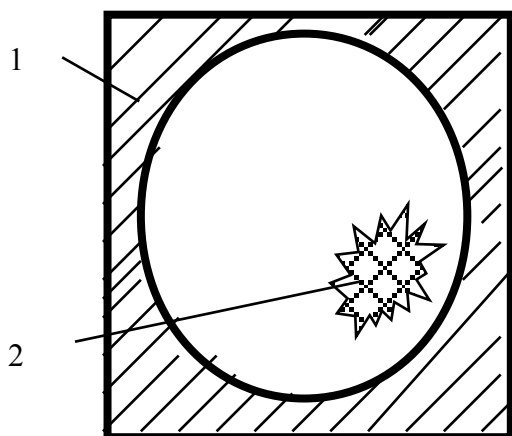


Рис.2. Пример неправильной установки диафрагмы:
1 - диафрагма; 2 - пучок

По показаниям z_1 и z'_1 рассчитывается коэффициент ответвления $\alpha = z'_1/z_1$, а затем, для каждого i -го диаметра диафрагмы D_i вычисляют отношение $\gamma_i = \alpha(z_i / z'_i)$. Полученные данные аппроксимируют зависимостью $\gamma = F(D)$ и определяют диаметр диафрагмы, соответствующий уровню энергии γ_n . Найденный диаметр диафрагмы и принимают за диаметр пучка лазерного излучения по уровню γ_n .

Теперь становится ясным назначение второго измерителя мощности 5 и ответвителя пучка 3. По второму измерителю мощности контролируют стабильность мощности излучения лазера, когда часть поперечного сечения пучка перекрывается диафрагмой. По измерителю мощности 8 не представляется возможным разделить причины уменьшения показаний измерителя мощности 8 из-за уменьшения диаметра диафрагмы или мощности излучения лазера 1. Причем ГОСТ 26086-84 допускает отказ от применения измерителя 5 и ответвителя 3 в случае, если относительная нестабильность мощности или энергии лазерного пучка не превышает $\pm 5\%$.

При выполнении требований ГОСТа 26086-84 погрешность измерения диаметра пучка находится в интервале $\pm 24\%$ с установленной вероятностью 0,95.

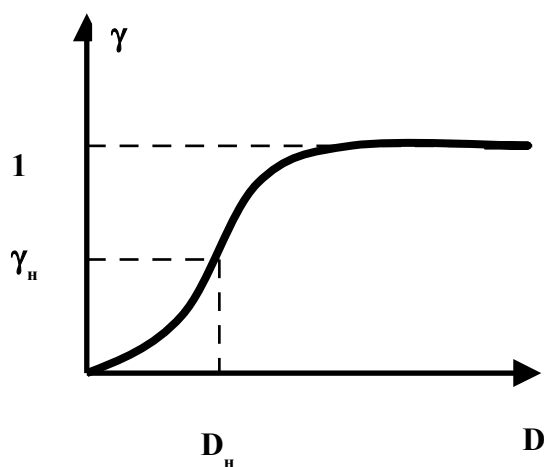


Рис. 3. Зависимость $\gamma = F(D)$

Метод распределения плотности мощности

Измерение основано на измерении диаметра круга (а не диафрагмы, как в методе калиброванных диафрагм), в котором заключена заданная доля мощности лазерного пучка. Центр этого круга должен соответствовать точке сечения пучка лазерного излучения, совпадающей с энергетическим центром ОРПМ. В этом методе измерения уже дается привязка к энергетическому центру пучка. С другой стороны, в этом и заключается преимущество матричных методов измерения пространственно-энергетических характеристик излучения, которые, во-первых, дают привязку к пространственным координатам пучка и, во-вторых, применимы как к непрерывному, так и импульсному излучению.

Вначале измеряют ОРПМ либо способом А (по точкам), либо матричным Б. Затем строят матрицу значений ОРПМ β_{kl} в различных точках сечения пучка, k и l номера отсчетов по координатам x и y . Далее измерение диаметра пучка сводится к обработке матрицы значений ОРПМ в соответствии с определением диаметра, как диаметра поперечного сечения пучка, внутри которого проходит заданная доля мощности излучения (рис. 4). Вычисляется полная мощность пучка, правда не в единицах мощности, а в относительных единицах. Отсчет β_{kl} относят к центру площадки с равномерными шагами Δ_x , Δ_y между соседними точками ОРПМ. Если реальная матрица, посредством которой были получены значения β_{kl} имела неравномерные шаги по координатам x и y , то удобнее пересчитать на равномерные.

(Отдельный фоточувствительный элемент матричного фотоприемника при пучке, накрывающем несколько фоточувствительных элементов, по сути измеряет мощность или энергию пучка, вписывающегося в его фоточувствительную площадку. Поэтому сигнал с одного фоточувствительного элемента пропорционален произведению плотности мощности пучка в области расположения этого элемента на его площадь. При измерениях мощности матричным фотоприемником принимается, что та же плотность мощности имеется во всех точках в пределах площадки ($\Delta_x * \Delta_y$.)

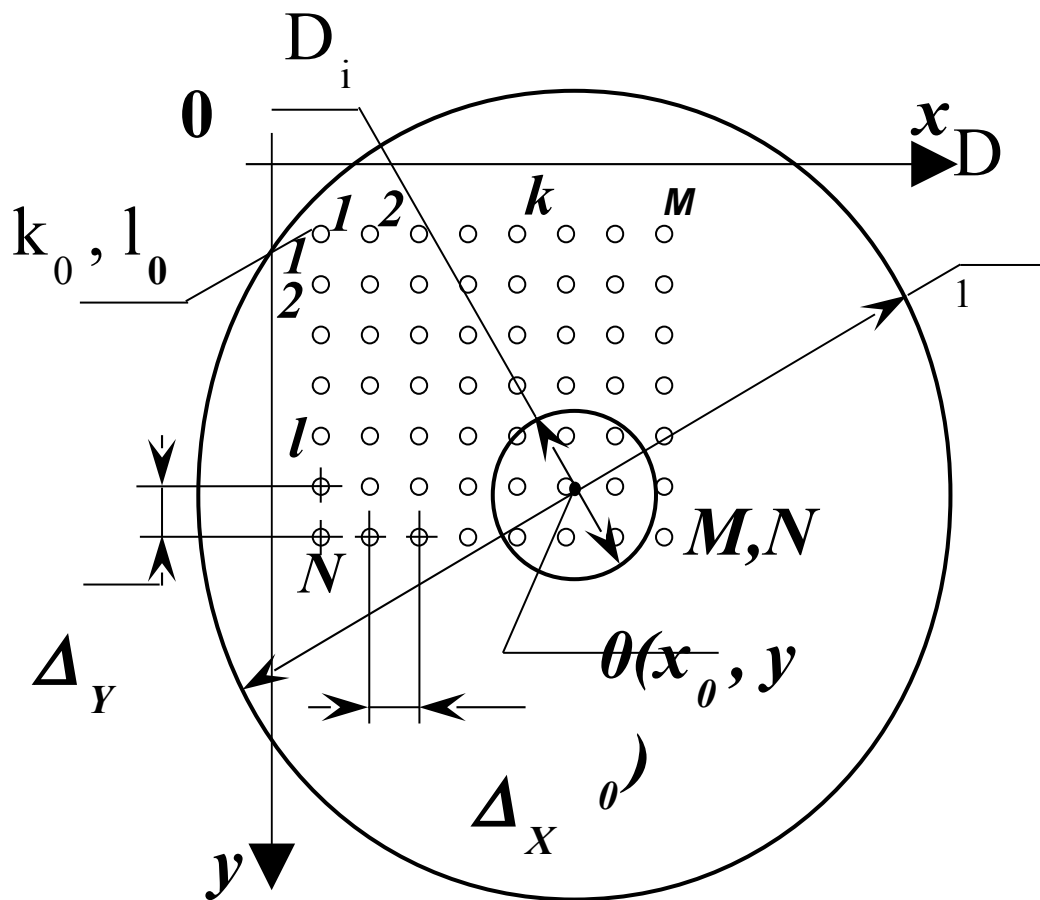


Рис. 4. К расчету диаметра пучка методом распределения плотности энергии (мощности)

$$z_1 = \Delta_x \Delta_y \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \beta_{kl}, \quad (1)$$

M, N - количество точек в сечении пучка по строке и столбцу соответственно.

Затем вычисляются координаты энергетического центра пучка:

$$x_0 = \Delta_x \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N (k\beta_{kl})}{\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \beta_{kl}} ;$$

$$y_0 = \Delta_y \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N (l\beta_{kl})}{\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \beta_{kl}} . \quad (2)$$

Диаметр окружности, в которую вписывается матрица значений β_{kl} , т.е. диаметр окружности, через которую проходит полная мощность лазерного пучка, вычисляется по формуле:

$$D_1 = 2\sqrt{(k_0\Delta_x - x_0)^2 + (l_0\Delta_y - y_0)^2} , \quad (3)$$

где $k_0\Delta_x$ и $l_0\Delta_y$ - координаты наиболее удаленного от энергетического центра элемента матрицы.

Уменьшают диаметр D_i (где $i = 1,2,3,\dots$) таким образом, чтобы окружность с центром в точке $O(x_0, y_0)$ (энергетическом центре) охватывала хотя бы на одну измеренную точку меньше, чем окружность диаметром D_{i-1} . Реально при большом числе отсчетов β_{kl} (ПЗС-матрицы имеют как минимум 256×256

элементов и при измерениях настраиваются так, чтобы пучок занимал хотя бы 100×100 элементов) можно выбрать максимальное значение из k_0 и l_0 , а затем последовательно уменьшать его на единицу.

Затем рассчитывают мощность z_i с помощью модифицированного выражения (1). Модификация заключается в том, что суммирование проводят лишь по отсчетам, попавшим в круг диаметром D_i . Далее уже поступают как в методе калиброванных диафрагм, т.е. находят отношения $\gamma_i = (z_i / z_l)$ и строят зависимость вида, представленного на рис.3. Здесь уже не нужен коэффициент ответвления α , поскольку все мощности определяются по отсчетам β_{kl} .

В матричном методе при выполнении всех ограничений ГОСТ 26086-84 и ГОСТ 25917-83 погрешность измерения диаметра пучка находится в интервале $\pm 25\%$ с установленной вероятностью 0,95.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ И ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Измерения длин волн лазеров необходимы для их эффективного использования в метрологии и измерительной технике, спектроскопии, разделении изотопов, фотохимии и охране окружающей среды, уточнения значений фундаментальных физических констант (скорости света, постоянной Ридберга и т.п.). В лазерной спектроскопии измерение длин волн требуется для определения положения спектральных линий, в фотохимии и разделении изотопов – для избирательного возбуждения определенного сорта атомов и молекул, в метрологии – для использования стабилизированных по частоте лазеров в качестве новых более совершенных эталонов единицы длины.

Длина волны генерации почти всех лазеров, за исключением лазеров на растворах красителей и, в меньшей степени, полупроводниковых лазеров, с достаточной для большинства практических случаев точностью однозначно определяется используемой активной средой. Поскольку частота лазерного излучения ν наиболее распространенных типов лазеров составляет $10^{12} - 10^{15}$ Гц, то в оптическом диапазоне не удастся реализовать прямые методы измерения частоты, состоящие в счете количества периодов электромагнитных колебаний за данный промежуток времени, как это принято в радиодиапазоне. Это связано с тем, что ни один из имеющихся в настоящее время фотоприемников не обладает достаточно малой постоянной времени, чтобы он мог реагировать на колебания оптического диапазона частоты. Поэтому для получения данных об абсолютных значениях частоты лазерного излучения обычно измеряют длину волны излучения λ и, пользуясь соотношением $\lambda\nu = c$, где c – скорость света, определяют частоту излучения. Из этого же соотношения, выражая ν через λ или λ через ν и дифференцируя, можно получить формулы, связывающие ширину линии генерации в частотной области $\Delta\nu$ с ее шириной в спектральной $\Delta\lambda$:

$$\Delta\nu = -(c/\lambda^2) \Delta\lambda;$$

$$\Delta\lambda = -(c/\nu^2) \Delta\nu.$$

Таким образом, в оптическом диапазоне вести речь об измерении длины волны или частоты является вопросом терминологических традиций. Если для измерения длины волны или частоты используют спектральные или интерференционные приборы, то чаще употребляют термины: длина волны, ширина линии в единицах измерения длины. Если используют методы гетеродинирования, переноса частотного спектра из одного диапазона в другой, то употребляют частотные термины в том числе и для названий и описаний методов измерения.

С появлением стабильных по частоте лазеров стали развиваться два направления в измерениях длин волн: абсолютные и относительные. Под абсолютными понимается непосредственное сравнение длины волны лазерного излучения с одной или несколькими юридически узаконенными стандартными длинами волн ламповых источников (обычно оранжевой линией 0,605 мкм криптона-86), под относительным – сравнение длин волн стабилизированных по частоте лазеров. Иногда для достижения необходимой точности абсолютные измерения комбинируются с относительными.

К средствам измерения длин волн в зависимости от решаемой задачи предъявляются различные требования. Так, допустимая погрешность измерений колеблется в широких пределах – от 10^{-4} до $10^{-10} \dots 10^{-11}$ мкм. Например, для ряда атмосферных лидарных исследований достаточно знать длину волны генерируемого излучения с погрешностью 10^{-4} мкм, для большинства спектроскопических задач – $10^{-6} \dots 10^{-7}$ мкм, а для исследования и установления новых эталонов единиц длин волн и частот и фундаментальных исследований требования к точности измерений намного выше.

Поэтому измерение длины волны и частоты лазерного излучения может быть разделено на три группы по мере нарастания разрешающей способности проводимого анализа:

1. Измерение спектра излучения многомодовых лазеров непрерывного действия и пикосекундных лазеров; для этой цели вполне достаточно традиционных методов спектрометрии.

2. Прецизионное измерение длины волны или частоты генерации стабилизированных по частоте лазеров, для чего применяют интерферометры, наиболее распространенным из которых для этой цели является интерферометр Фабри-Перо.

3. Измерение ширины полосы генерации одночастотного лазера или разности частот генерации двух однопериодных частотостабилизированных лазеров, что осуществляется с помощью радиофизического метода фотобиений или, синоним, гетеродинного фотоприема и радиофизическими методами переноса частоты от цезиевого стандарта (9192631770 Гц) или водородного лазера (14204057518 Гц) в оптический диапазон.

Тут еще надо различать понятия абсолютного значения длины волны и спектральную ширину линии излучения, абсолютное значение частоты излучения и ширину частотного спектра. Ширина линии и ширина частотного спектра тесно связаны с когерентностью и могут быть измерены интерференционными методами, посредством которых измеряются пространственная и временная когерентности.

При работе с высокостабильными лазерами непрерывного действия быстроедействие измерительной аппаратуры не имеет какого-либо значения, тогда как при измерениях длин волн импульсных лазеров, особенно при свипировании частоты в течение импульса генерации, это условие становится решающим. Что касается требований к спектральному диапазону средства измерения длин волн, то существующие способы управления длиной волны генерации различных типов лазеров (газовых, твердотельных, полупроводниковых, параметрических генераторов света, на растворах органических соединений и т.п.), позволяющие получать генерацию практически в любой области спектра – от ультрафиолетовой до субмиллиметровых волн. Наиболее разработанными являются средства измерения длин волн стабилизированных газовых и импульсных твердотельных лазеров.

Эталоны длин волн и спектральные приборы

В традиционных методах спектрометрии и интерферометре Фабри-Перо применяют сравнение длины волны исследуемого излучения λ_x с длиной волны эталонного источника $\lambda_э$. В качестве эталона длины волны принята длина волны в вакууме 605,7802105 нм оранжевой линии изотопа криптона-86 с воспроизводимостью $1 \cdot 10^{-8}$.

Более того, эталонами длины волны могут служить длины волн двух газоразрядных лазеров, стабилизированных по частоте излучения соответствующей поглощающей ячейкой. Аргоновый лазер, стабилизированный ячейкой с парами $^{127}\text{I}_2$, является источником эталонного излучения с $\lambda = 0,515$ мкм с воспроизводимостью $1,3 \cdot 10^{-9}$; вторая гармоника излучения гелий-неонового лазера, стабилизированного тем же $^{127}\text{I}_2$, имеет $\lambda = 0,5762 \dots$ мкм с воспроизводимостью $6 \cdot 10^{-10}$; обе красные линии того же гелий-неонового лазера $\lambda = 0,612$ мкм и $\lambda = 0,6329$ мкм с воспроизводимостью $1 \cdot 10^{-9}$ и $1,1 \cdot 10^{-9}$, соответственно. Наконец, в ИК диапазоне гелий-неоновый лазер, стабилизированный парами метана CH_4 , $\lambda = 3,39$ мкм с воспроизводимостью $1,3 \cdot 10^{-10}$.

В качестве вторичных эталонов длины волны в повседневной практике используют многие другие излучатели, например, зеленую линию ртути-198 или красную линию кадмия-114.

В инфракрасной области спектра спектральную аппаратуру градуируют по линиям поглощения спектров некоторых веществ, например, в спектральном диапазоне 5,0 - 7,9 мкм по линиям поглощения воды. В дальней ИК области для градуировки по длинам волн используют эффект селективного отражения от кристаллов солей: для $\lambda = 26$ мкм - от кристалла фтористого лития; для $\lambda = 79$ мкм - от кристалла бромистого калия.

В табл. 1 приведены длины волн частотно стабилизированных лазеров, которые потенциально подходят на роль реперных источников при измерении

длин волн. Они охватывают весь видимый диапазон и простираются до среднего инфракрасного.

Таблица 1

Длины волн некоторых стабилизированных лазеров для практической реализации единицы длины

Длина волны, нм	Частота, МГц	Энергия фотона, эВ
354,8300241	844890335,0	3,494225
514,6734664	582490603,37	2,409015
532,24503614	563260223,5	2,329483
543,516333	551579482,96	2,281175
611,970770	489880354,9	2,026005
632,99139822	473612214,7047	1,958725
640,283468	468218332,4	1,936417
1064,490072	281630111,5	1,16475
3392,231397	88376181,600	0,365499
10303,465	29096274,95234	0,120446

В традиционных методах спектрометрии для измерения длин волн применяются спектральные приборы: спектрографы, спектрометры, интерферометры, в частности интерферометр Фабри-Перо. Спектрографы и спектрометры содержат диспергирующий элемент: призму или дифракционную решетку и регистрирующий элемент: спектрограф - фотопластинку, а спектрометр - фотоэлектрический или тепловой фотопреобразователь. Важнейшей характеристикой спектральных и интерференционных приборов для измерения длины волны является разрешающая способность, определяемая на основе критерия Релея.

Наиболее наглядно суть и происхождение критерия Релея можно пояснить на основе следующего мысленного эксперимента. Пусть на дифракционную решетку падает излучение, состоящее из двух монохроматических компонент равной интенсивности. Будем считать, что различие в их длинах волн постепенно возрастает. Считается, по критерию Рэлея, что наличие двух компонент будет замечено, когда максимум в

интерференционной картине одной компоненты совпадет с первым минимумом другой (см. рис.1).

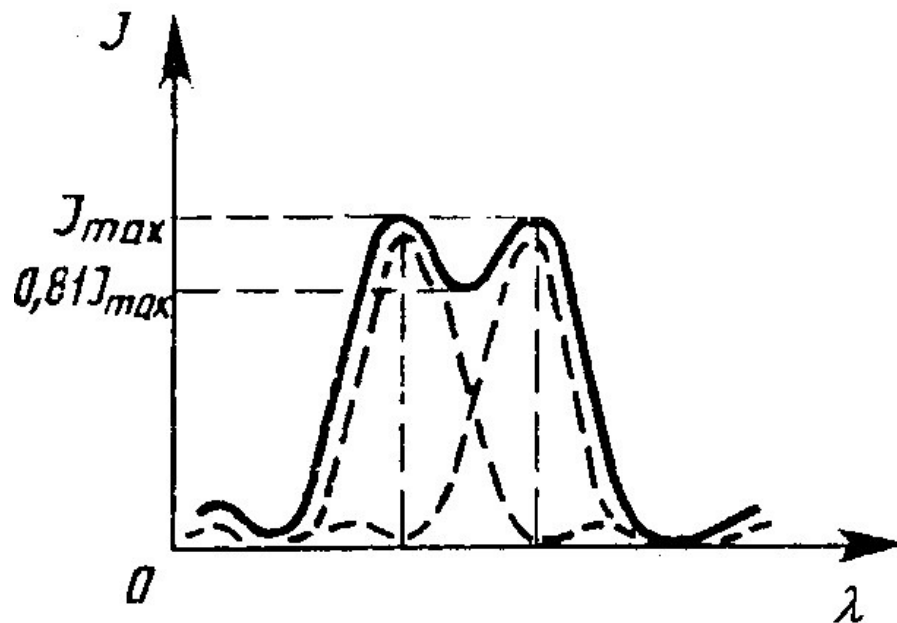


Рис. 1. К определению разрешающей способности спектральных приборов на основе критерия Рэлея

При этом провал интенсивности в средней точке к интенсивности в максимуме составит $8/\pi^2 = 0,811$. Если длина волны одной компоненты $\lambda - 0,5\Delta\lambda$, а другой $\lambda + 0,5\Delta\lambda$, то отношение $\lambda/\Delta\lambda$ - безразмерная величина - и есть критерий Рэлея. Далее его стали применять не только к спектральным приборам с дифракционной решеткой, но и к другим тоже. Разрешающая способность призмных приборов $\sim 10^5$, приборов с дифракционной решеткой $\sim 10^6$, пассивных интерферометрических $\sim 10^7 \dots 10^8$.

Из сравнительно простых спектральных приборов наибольшей разрешающей способностью обладает интерферометр Фабри-Перо (ИФП) (рис.2). Он состоит из двух стеклянных или кварцевых пластин с плоскими поверхностями. Внутренние поверхности пластин покрыты частично отражающими прозрачными пленками с высоким коэффициентом отражения, причем пластины строго параллельны между собой. Сами пластины делают слегка клиновидными, чтобы устранить вредное влияние излучения

отраженного внешними поверхностями пластин. Пластины разделены кольцом из инвара и плотно прижаты к его торцам.

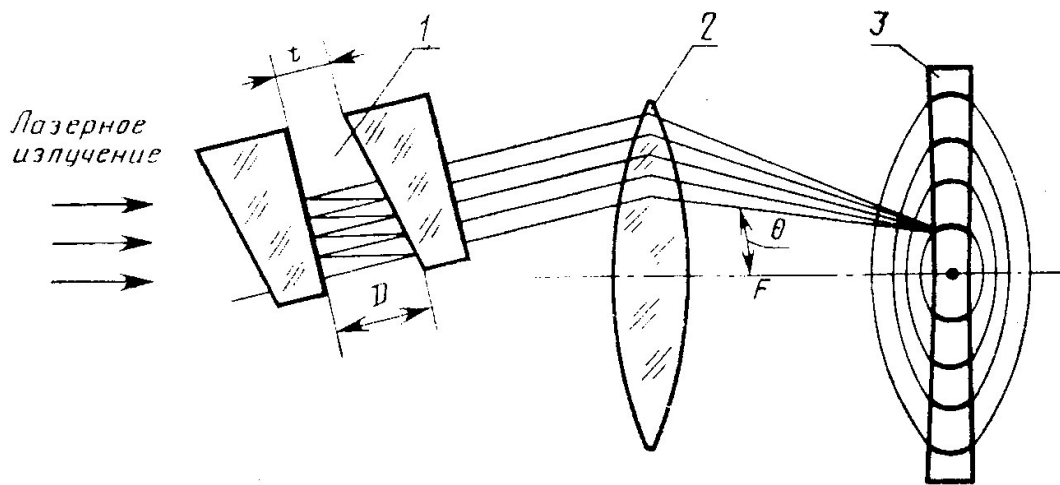


Рис. 2. Функциональная схема установки для измерения длины волны лазерного излучения посредством эталона Фабри-Перо: 1- интерферометр Фабри-Перо; 2- линза; 3- экран

Принцип измерения длины волны ИФП основан на явлении многолучевой интерференции. В ИФП пучок излучения делится на несколько пучков частично отражающими и частично пропускающими поверхностями пластин, а затем собираются линзой на регистрирующий экран. В результате наложения пучков на экране 3, расположенном в фокальной плоскости линзы 2 образуется интерференционная картина в виде колец.

Измерение длины волны и частоты непрерывного лазерного излучения

На рис.3 изображена схема измерения длины волны лазерного излучения ИФП, установленным внутри спектрографа.

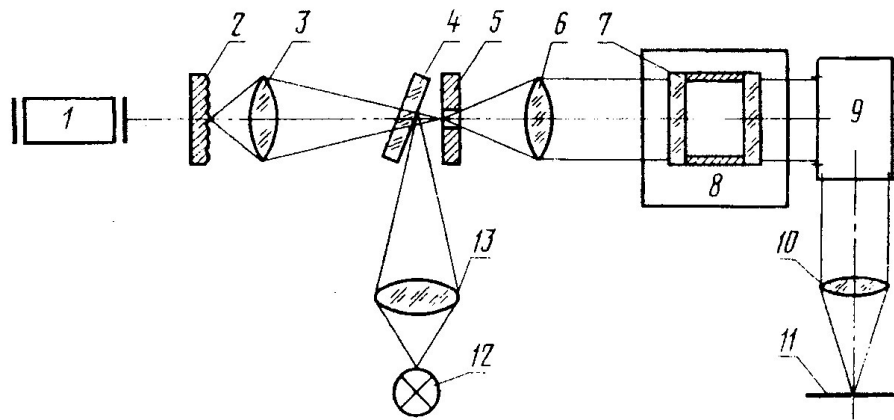
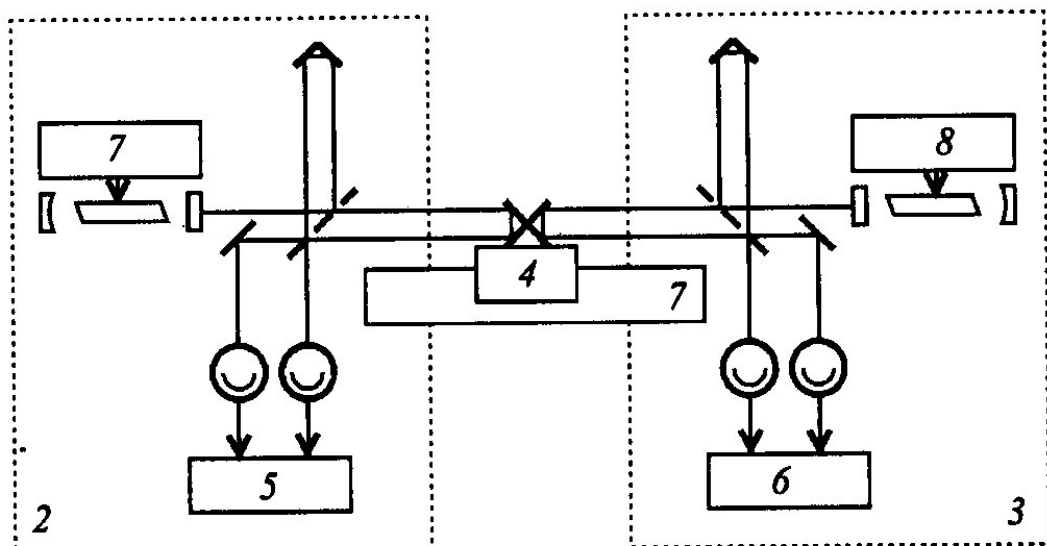


Рис. 3. Функциональная схема установки для измерения длины волны лазерного излучения с интерферометром Фабри-Перо, установленным внутри спектрографа

Излучение криптоновой лампы 12 падает на полупрозрачную пластину 4, на которую поступает после прохождения диффузного рассеивателя 2 и конденсорной линзы 3 излучение исследуемого лазера 1. Пройдя входную щель спектрографа 5 и коллиматор 6, оба пучка излучения попадают в ИФП 7, размещенный в вакуумной камере 8. Интерференционную картину наблюдают на регистрирующем экране 11, расположенном в фокальной плоскости объектива 10, установленного на выходе спектрографа 9.

Довольно точные измерения длины волны лазерного излучения осуществляются и методом двухлучевой интерферометрии с использованием вспомогательного, аттестованного по длине волны лазера. Для задания переменной разности хода удобно применять лазерный интерферометр перемещений. На рис. 4 приведена схема установки для измерения длины волны 0,44 мкм He-Cd лазера с использованием двух лазерных



интерферометров 2, 3 типа интерферометра Майкельсона, измеряющих перемещение одного объекта – подвижной каретки 4.

Рис. 4. Схема измерения длины волны лазера с интерферометром перемещений: 1- направляющая движения; 2, 3- лазерные интерферометры на 0,63 и 0,44 мкм; 4- подвижная каретка с двумя отражателями; 5, 6- реверсивные счётчики полос; 7, 8- блоки стабилизации частоты эталонного и исследуемого лазеров

В одном из них источником излучения служил гелий-неоновый лазер 7, стабилизированный по провалу Лэмба, с аттестованным значением длины волны 0,63 мкм. Во втором интерферометре использовался гелий-кадмиевый лазер 8, стабилизированный подобным же образом, с неизвестным значением длины волны. Схема обладает тем преимуществом, что счет полос в обоих интерферометрах может быть начат и закончен при любых произвольных положениях каретки. Измерения проводились на воздухе при вводе в счетные устройства значений показателя преломления для нормального воздуха, давления и температуры. В результате измерений получено значение $0,4415697 \pm 0,0000001$ мкм. Погрешность полученного результата определялась точностью измерения длины лазерным интерферометром.

Измерение длины волны и частоты импульсного лазерного излучения

Измерения длин волн излучения импульсных лазеров производятся, как правило, с большей погрешностью $10^{-4} \dots 10^{-6}$ мкм, что обусловлено шириной линии их генерации и областями применений. Из-за малой длительности импульсов генерации и невозможности осуществления какого-либо сканирования в спектральных приборах необходима регистрация пространственной спектральной картины или пространственной интерференционной картины. Это и реализуется на практике, в том числе и с использованием матричных фотоприемников.

Наиболее универсальными в применениях и здесь являются установки с совместным использованием призмного или дифракционного прибора с интерферометром Фабри-Перо, спектры на выходе которых регистрируются

электронно-оптическими средствами. Дифракционный или призмный прибор служит для ориентировочной оценки длины волны, с тем, чтобы ликвидировать неопределенность в количестве целых значений полуволн, укладываемых между пластинами интерферометра Фабри-Перо. Структурная схема установки такого типа представлена на рис. 5. Она предназначена для измерения длин волн перестраиваемых лазеров в диапазоне длин волн $0,3 \dots 0,8$ мкм. В канале 3-5-6 автоматически осуществляется сравнение с помощью монохроматора МДР-3 неизвестной линии излучения импульсного лазера 2 с известными спектральными линиями эталонной лампы 1 при считывании изображения телекамерой 6. В канале 4-5-6 измеряются диаметры колец аттестованного интерферометра Фабри-Перо 4. Относительная погрешность измерений $10^{-5} \dots 10^{-6}$. Она определяется главным образом шириной линии излучения импульсного лазера и инструментальными факторами: базой интерферометра, нелинейностью развертки, размером спектральной картины на матричном фотоприемнике, вклад которых в данном случае является сравнимым.

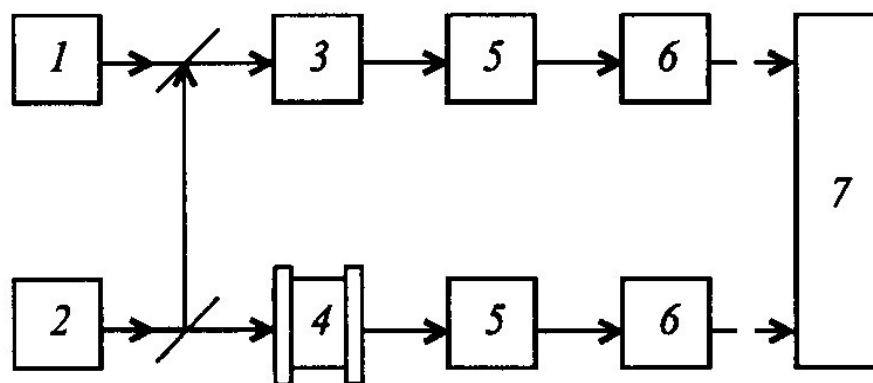


Рис. 5. Структурная схема измерителя длин волн импульсных лазеров: 1- эталонная лампа; 2- исследуемый лазер; 3- монохроматор; 4- интерферометр Фабри-Перо; 5, 6- регистрирующие изображения камеры; 7- ПЭВМ

Литература

1. Основы оптической радиометрии / Под ред. А.Ф.Котюка. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 514 с.
2. Рожков О.В., Щетинкин В.С. Измерение параметров лазеров: Учебное пособие. - М.: И-во МВТУ им.Н.Э.Баумана, 1988. - 70 с.

3. Иващенко П.А., Калинин Ю.А., Морозов Б.Н. Измерение параметров лазеров. - М.: И-во стандартов, 1982. - 168 с.

ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Форма импульсов лазерного излучения характеризуется тремя параметрами - длительностями фронта и среза импульсов и собственно импульса. Обратимся к рис.1.

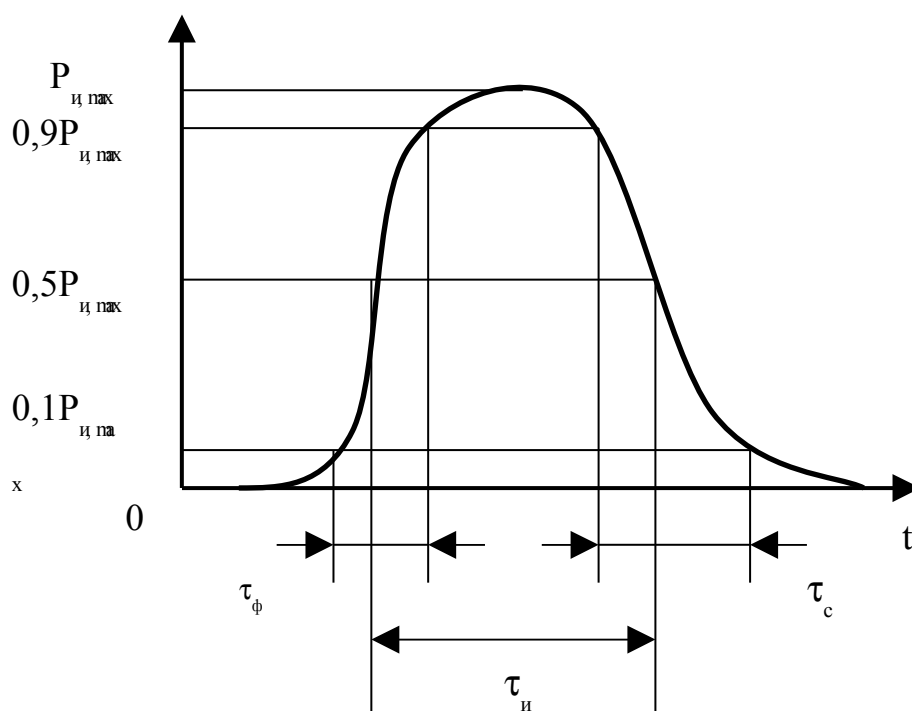


Рис. 1. К определению параметров, характеризующих форму импульса

Длительностью фронта импульса лазерного излучения называется интервал времени, в течение которого мощность лазерного излучения возрастает в пределах уровней $0,1 - 0,9$ максимального значения. Длительностью среза импульса лазерного излучения называется интервал времени, в течение которого мощность лазерного излучения падает в пределах уровней $0,9 - 0,1$ максимального значения. И, наконец, длительность импульса лазерного излучения – интервал времени, в течение которого мгновенная мощность лазерного излучения превышает значение, соответствующее уровню $0,5$ максимальной мощности. Все эти определения зафиксированы в ГОСТе 24453 - 80. Измерение параметров и характеристик лазерного излучения.

Термины, определения и буквенные обозначения величин. В определении длительности импульса могут использоваться и иные уровни, например, 0,9.

Измерение формы и длительности милли-, микро- и наносекундных импульсов лазерного излучения

Существует и ГОСТ 25213 - 82. Лазеры. Методы измерения длительности и частоты повторения импульсов излучения. Этот стандарт устанавливает два метода измерения длительности и частоты повторения импульсов излучения лазеров, работающих в режиме однократного импульса, серии импульсов с периодической последовательности импульсов, т.е. частотном: А – метод непосредственной оценки; Б – метод, основанный на воспроизведении формы импульса излучения. Оба метода основаны на преобразовании лазерного излучения в электрический сигнал и измерении длительности и частоты повторения импульса электрического сигнала. Таким образом, в соответствии с существующим стандартом следует, во-первых, подобрать фотоприемник – преобразователь излучения в электрический сигнал, обладающий требуемым быстродействием, и, во-вторых, изучить предложения современного приборостроения по измерениям длительности и формы электрических импульсов. Частично, с поправкой на 1982 год издания ответ на оба эти вопроса можно найти в том же ГОСТе 25213 - 82.

Фотоприемники:

Фотоэмиссионные:

Фотоэлементы: Ф 32 ($\lambda = 0,215 - 1,1$ мкм; $U = 2000$ В; время нарастания переходной характеристики (временное разрешение) $\tau_n = 0,15$ нс; диаметр приемной площадки $D = 10$ мм); ФК 30 ($\lambda = 0,38 - 1,3$ мкм; $U = 1000$ В; время нарастания переходной характеристики (временное разрешение) $\tau_n = 0,8$ нс; диаметр приемной площадки $D = 100$ мм);

Фотоумножители: ФЭУ 84-6 ($\lambda = 0,4 - 0,83$ мкм; $U = 1900$ В; время нарастания переходной характеристики (временное разрешение) $\tau_n = 20$ нс; диаметр приемной площадки $D = 25$ мм);

С внутренним фотоэффектом:

Фотодиоды: ФПЗ-3 ($\lambda = 0,4 - 1,1$ мкм; $U = 10$ В; время нарастания переходной характеристики (временное разрешение) $\tau_n = 3$ нс; диаметр приемной площадки $D = 2,1$ мм); ФД-24К(ФД182) ($\lambda = 0,4 - 1,1$ мкм; $U = 27$ В; время нарастания переходной характеристики (временное разрешение) $\tau_n = 200$ нс; диаметр приемной площадки $D = 10$ мм).

Если учесть, что в соответствии с ГОСТ 25213 - 82 время нарастания переходной характеристики фотоприемника должно быть не менее чем в три раза меньше длительности импульса лазерного излучения ($\tau_n \geq 3\tau_n$), то рекомендуемые в ГОСТе 25213 - 82 фотоприемники способны обеспечить измерения длительностей импульсов лазерного излучения, начиная с 0,5 нс, охватывая лишь видимый и ближние ИК и УФ диапазоны спектра. Причем временные параметры фотоэлементов вплотную приблизились к своему физическому пределу, обусловленному разбросом времени пролета фотоэлектронов между фотокатодом и анодом, которое оценивается в 0,12 нс. Вторым ограничивающим фактором является полоса пропускания электронных усилительных трактов. Кроме того, на практике приходится решать проблемы согласования параметров линий передачи электрических сигналов от фотоприемника к регистрирующему прибору.

Наиболее распространенными режимами работы импульсных лазеров являются: свободной генерации, модуляции добротности и синхронизации мод. Характерные значения длительности импульсов для этих режимов соответственно равны 1...10 мс, 1...10 нс и 1...10 пс. Отсюда видно, что путем преобразования мощности лазерного излучения в электрический сигнал возможно измерение параметров импульсов лазерного излучения лишь для первых двух режимов работы импульсных лазеров при условии правильного выбора фотоприемника.

Измерение формы и длительности пико- и фемтосекундных импульсов лазерного излучения

Переход в пикосекундный диапазон осуществляется с помощью устройств электронно-оптической хронографии. Достижимое в них временное разрешение ограничено постоянной времени внешнего фотоэффекта 10^{-13} с и разбросом начальных скоростей фотоэлектронов. Схема одного из этих устройств - электронно-оптической камеры с щелевой разверткой - приведена на рис. 2.

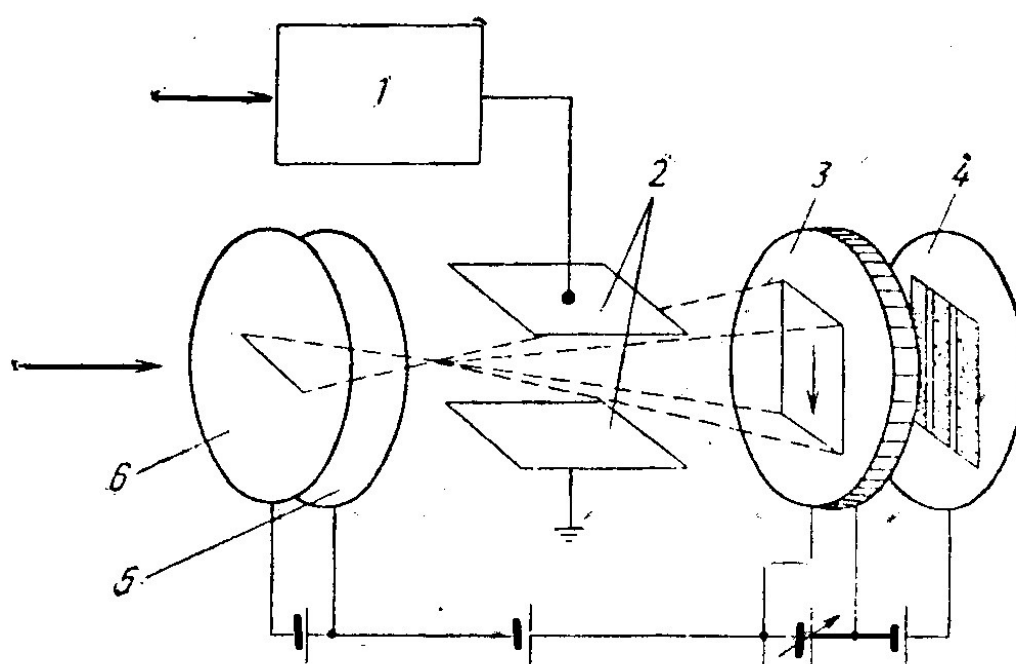


Рис. 2. Электронно-оптическая камера со щелевой развёрткой: 1- генератор развёртки; 2- отклоняющие пластины; 3- микроканальные пластины; 4- люминесцентный экран; 5- ускоряющий электрод; 6- фотокатод

В этом преобразователе происходит преобразование длительности импульса лазерного излучения, падающего на входной фотокатод, в длину пути на выходном люминесцентном экране. Распределение яркости, возникающей люминесцентной полосы, определенное в направлении отклонения, соответствует временному профилю импульса. Для получения высокого временного разрешения необходимо усиление яркости изображения на

люминесцентном экране, которое осуществляется путем применения микроканальной пластины. Щелевая развертка осуществляет селекцию первичных фотоэлектронов по скоростям, а отсутствие преобразования оптической мощности первичного импульса в электрический сигнал той же длительности и его усиления, снимает отмеченные выше ограничения, присущие методам, основанным на преобразовании оптического импульса в электрический и измерении длительности этого электрического импульса.

Дальнейшее продвижение в направлении измерения длительности ультракоротких импульсов связано с преобразованием длительности импульсов в линейные размеры или смещения. Приняв скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, длины световых цугов в направлении распространения будет иметь значения, приведенные в табл.1.

Таблица 1

Соотношения между длительностями импульсов и протяженностями волновых цугов электромагнитного излучения в вакууме

τ_n	1 нс	100 пс	10 пс	1 пс	100 фс
L	30 см	3 см	3 мм	0,3 мм	30 мкм

Как видим, сами по себе длины вполне поддаются измерениям распространенными средствами измерения линейных размеров. Вопрос лишь в том, как измерить эту длину светового цуга.

Длительность коротких одиночных импульсов можно определить с использованием явления двухфотонной флуоресценции /16/. В измерительном устройстве (рис.3) измеряемый импульс расщепляется с помощью светоделительного зеркала 1 на две части одинаковой интенсивности, которые накладываются друг на друга в измерительной кювете 3 при их встречном распространении. Благодаря двухфотонному поглощению возбуждается находящийся в кювете раствор красителя. Интенсивность флуоресценции больше в области наложения обоих импульсов, идущих справа и слева, чем вне ее. Интегральная картина флуоресценции фиксируется сбоку фотографическим или иным (матричным фотоприемником, например) способом как функция

пространственной координаты. Полученный таким способом след соответствует корреляционной функции второго порядка, которая позволяет по ширине области наложения Δ судить о длительности импульса $\tau_{и}$.

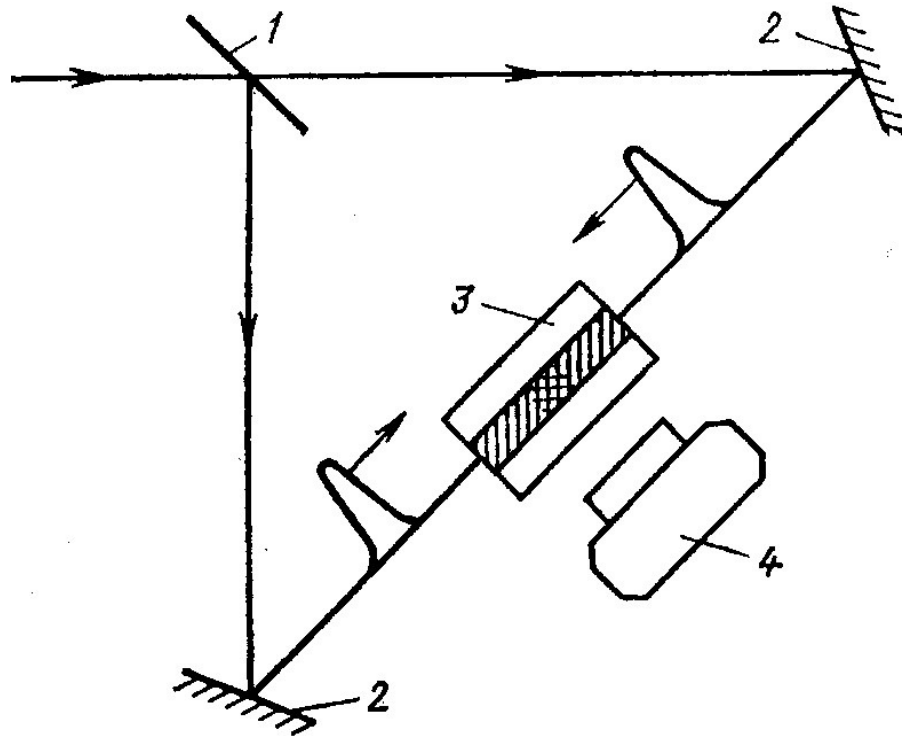


Рис. 3. Схема измерения длительности пико- и фемтосекундных импульсов методом двухфотонной люминесценции: 1- 50% светоделитель; 2- зеркала; 3- кювета с раствором или кристалл; 4- регистратор (цифровой фотоаппарат, цифровая камера и т.п.)

Пусть имеется два встречных световых прямоугольных цуга длиной L и мощностью P , распространяющихся со скоростью c/n (n - показатель преломления среды распространения), встречающиеся своими передними фронтами в точке $x = 0$. Флуоресценция в среде распространения наблюдается лишь в области, где мощность излучения достигает значения $2P$. Тогда энергия свечения люминесценции E будет прямо пропорциональна времени t , в течение которого мощность возбуждающего излучения составит $2P$.

$$E = kt,$$

$$t = (L - 2|\Delta x|)n/c,$$

$$E = k(L - 2|\Delta x|)n/c.$$

Зависимость энергии флюоресценции от x будет иметь вид треугольной функции (см. рис.4) отличной от нуля на отрезке $[-L/2; L/2]$, длина которого равна L . Измерив по фотографии эту длину $L = 2|\Delta x|$ и разделив ее на скорость c/n и получим искомое значение длительности импульса лазерного излучения:

$$\tau_{\text{и}} (\text{прямоуг.}) = 2|\Delta x|n/c.$$

Если импульс не прямоугольный, а имеет гауссову форму, то измениться лишь коэффициент в последней формуле:

$$\tau_{\text{и}} (\text{гаусс.}) = 2^{0,5} |\Delta x|n/c.$$

Периодически повторяющиеся короткие импульсы исследуются главным образом путем измерения интенсивности генерации второй гармоники. При этом измеряемое излучение также расщепляется на две части одинаковой интенсивности, которые для получения переменной оптической задержки проходят различные пути. Благодаря изменению их относительной задержки достигается более или менее полное перекрытие, и в соответствии с изменяющейся интенсивностью второй гармоники снова получается корреляционная функция второго порядка измеряемого импульса. По ней и рассчитывают длительность импульса лазерного излучения.

Литература

1. Иващенко П.А., Калинин Ю.А., Морозов Б.Н. Измерение параметров лазеров. - М.: И-во стандартов, 1982. - 168 с.
2. Справочник по лазерной технике: Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. - 544 с.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ (МОЩНОСТИ) ИЗЛУЧЕНИЯ

Относительное распределение плотности энергии (ОРПЭ) или мощности (ОРПМ) по ГОСТ 24453 - 80 (Измерение параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин) есть распределение плотности энергии (мощности) по сечению лазерного пучка, нормированное относительно максимального значения плотности энергии (мощности). Существует и ГОСТ 25917-83 Методы измерения относительного распределения плотности энергии (мощности) излучения, который устанавливает два метода измерения ОРПМ для лазеров непрерывного и импульсного режимов работы: А – метод последовательного анализа; Б – матричный метод. Метод А не применим для лазеров, работающих в режиме одиночных импульсов излучения.

Метод А.

В методе А измерение ОРПМ основано на последовательном преобразовании мощности излучения в различных точках поперечного сечения лазерного пучка при сканировании измерительного преобразователя перпендикулярно направлению распространения излучения. Допускается сканирование лазерного пучка по приемной площадке измерительного преобразователя. Схема расположения средств измерений и вспомогательных устройств должна соответствовать приведенной на рис.1.

Ослабитель должен обеспечивать пропускание мощности лазерного излучения, чтобы ее величина находилась в пределах энергетического диапазона применяемого измерительного преобразователя. Пространственная неравномерность коэффициента ослабления ослабителя должна быть в пределах $\pm 5\%$. Если мощность лазерного излучения не превышает верхнего предела энергетического диапазона измерительного преобразователя, ослабитель не применяют.

Оптическая система должна обеспечивать перенос изображения поля в заданном сечении пучка на плоскость апертуры измерительного преобразователя. В качестве оптической системы могут применяться линзы, зеркала и другие вспомогательные устройства. Оптическая система также может отсутствовать. Она необходима для согласования размеров пучка и апертурной диафрагмы.

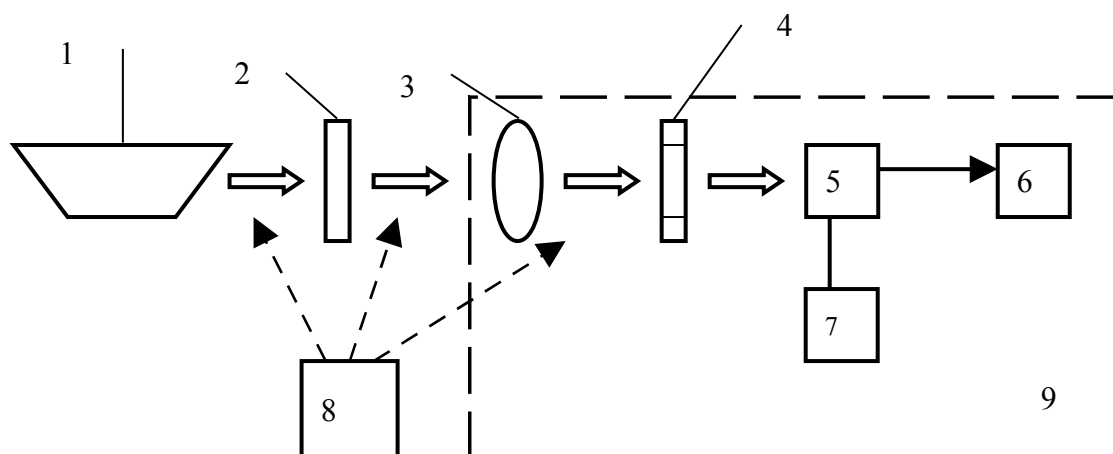


Рис. 1. Схема расположения средств измерений и вспомогательных устройств при измерении ОРПЭ(М) по методу А: 1- лазер; 2- ослабитель; 3- оптическая система; 4- апертурная диафрагма; 5- измерительный преобразователь; 6- измерительный прибор; 7- устройство сканирования; 8- средство юстировки; 9- средство измерения ОРПЭ(М) (фигурными стрелками обозначен поток излучения, сплошной – электрический сигнал)

Апертурная диафрагма должна быть жестко соединена с измерительным преобразователем так, чтобы ее отверстие находилось в центральной части его приемной площадки. Диаметр или размер большой стороны отверстия диафрагмы должен быть не более 0,1 диаметра пучка лазерного излучения. Поскольку ранее говорилось о том, что при измерениях ОРПМ допустимо сканирование пучка по приемной площадке, то здесь мы либо сталкиваемся с противоречием ГОСТа, либо замечание о жесткой связи не является обязательным. Но, видимо, при сканировании нужно оценить зонную неравномерность измерительного преобразователя.

Измерительный преобразователь должен преобразовывать энергию лазерного излучения в электрический сигнал (т.е. здесь уже ни о каких других видах энергии не говорится) и удовлетворять следующим требованиям: а) спектральный диапазон должен охватывать спектр лазерного излучения (вполне очевидное требование); б) динамический диапазон должен быть не менее 20 (отношение верхнего предела измерения к нижнему); в) нелинейность характеристики преобразования должна быть не более 7%; г) время нарастания переходной характеристики измерительного преобразователя, применяемого при измерении ОРПЭ лазеров импульсно-периодического режима, должно в три и более раз превышать длительность импульса лазерного излучения, если иные требования не установлены в стандартах или технических условиях на лазеры конкретных типов. (В этом случае действие импульсно-периодического излучения на измерительный преобразователь будет эквивалентно действию непрерывного излучения.)

Поскольку метод А сводится к поточечному измерению средней мощности лазерного излучения по поперечному сечению пучка, то в качестве измерительного преобразователя может быть использован практически любой из рассмотренных в предыдущей лекции преобразователь, либо средство измерения мощности или энергии лазерного пучка, если они удовлетворяют перечисленным выше условиям. Причем при измерениях ОРПМ(Э) основное внимание следует уделить не погрешности абсолютных измерений мощности или энергии излучения СИ, а его линейности или погрешности относительных измерений, которые в 5...10 раз меньше. Поэтому при измерениях ОРПМ достаточна метрологическая аттестация СИ по линейности и динамическому диапазону.

Устройство сканирования должно обеспечивать плавное или дискретное перемещение измерительного преобразователя перпендикулярно направлению распространения лазерного излучения и измерение координаты контролируемой точки сечения с погрешностью в пределах $\pm 4\%$. Направление сканирования, скорость и время плавного сканирования, количество

контролируемых точек сечения лазерного пучка и время измерения в каждой точке при дискретном сканировании должны соответствовать установленным в стандартах или ТУ на лазеры конкретных типов. (Это хитрая формулировка, которая заставляет искать какую-то дополнительную литературу. Если ГОСТы еще можно попытаться поднять, то найти какие-то ТУ очень сложно. Поэтому: а) что касается направления сканирования, то результаты измерения должны быть инвариантны по отношению к нему; б) количество точек измерения следует оценить исходя из априорной информации о ОРПМ и спектрального анализа (погрешности дискретизации по пространству); в) для обоснования времени измерения также нужно использовать априорную информацию об объекте измерения, например, данные об относительной нестабильности мощности излучения, типе и конструкции лазера или, в конце концов, сопроводить свои данные по ОРПМ информацией о времени измерения.) Здесь опять приходим к тому, что нужно либо иметь модель лазерного пучка, либо ее построить, например, итерационным путем, который может состоять из серии пробных измерений.

В качестве устройства сканирования может быть использован электромеханический дефлектор с поворотным зеркалом. Подобный дефлектор способен произвести сканирование поперечного сечения пучка за промежуток времени менее 1 с, а качественное зеркало не внесет существенного вклада в погрешность измерения. При использовании дефлектора следует оценить влияние изменения угла падения измеряемого пучка на входную апертуру измерительного преобразователя.

Измерительный прибор должен обеспечивать измерение электрического сигнала, соответствующего всему диапазону значений мощности лазерного излучения по сечению пучка с погрешностью в пределах $\pm 5\%$. В качестве измерительного прибора рекомендуется применять осциллографы, самописцы, вольтметры и др.

В случае использования СИ ОРПМ, включающего в себя оптическую систему, сканирующее устройство, апертурную диафрагму, измерительный

преобразователь и измерительный прибор, т.е. все приведенные на рис.1 структурные элементы, его погрешность должна быть в пределах $\pm 20\%$. Отсюда следует, что ГОСТ 25917-83 Методы измерения относительного распределения плотности энергии (мощности) излучения допускает существование СИ ОРПМ, причем каких-то рекордных значений погрешности от них не требуется.

Средство юстировки должно обеспечивать попадание лазерного излучения в центральную часть приемных площадок ослабителя, оптической системы и измерительного преобразователя перпендикулярно их входной поверхности. В качестве средств юстировки следует применять визуализаторы, газовые лазеры непрерывного режима работы в видимом диапазоне с расходимостью не более $10'$ или другие устройства.

ГОСТ 25917-83 Методы измерения относительного распределения плотности энергии (мощности) излучения дает методики проведения измерений, обработки результатов и расчета погрешностей, а также рекомендует использование конкретных СИ и устройств.

Подготовка и проведение измерений производится в последовательности:

Устанавливают лазер, СИ и вспомогательные устройства и подготавливают их к работе в соответствии с эксплуатационной документацией. Включают лазер и прогревают его в течение времени готовности. Проводят юстировку, добиваясь попадания лазерного пучка в центральную часть приемных площадок оптической системы, ослабителя, измерительного преобразователя (перпендикулярно его поверхности). Контроль прохождения лазерного излучения осуществляют визуально или с помощью визуализатора. Затем включают сканирующее устройство, измеряют значение электрического сигнала на выходе измерительного преобразователя и регистрируют координаты соответствующих точек поперечного сечения пучка излучения.

Для каждой i -й точки сечения пучка определяют отношение

$$\beta_i = I_i/I_{max}, \quad (1)$$

где I_i – значение электрического сигнала в i – й точке сечения; I_{max} – наибольшее из измеренных значений электрического сигнала. При необходимости строят матрицу или семейство изолиний и графиков распределений значений β_i для различных направлений сканирования. При выполнении всех требований настоящего ГОСТа /8/ погрешность измерения ОРПМ находится в интервале $\pm 24\%$ с установленной вероятностью 0,95. (Т.е. если у Вас не СИ ОРПМ, для которого допускается лишь 20% погрешность, а собранная Вами установка, то для нее допускается большая погрешность измерений.)

Погрешность измерения ОРПМ(Э) для метода А вычисляют по формуле, которая включает в себя вклад всех составляющих установку средств измерения и вспомогательных устройств с учетом того, что искомая величина β_i является отношением двух экспериментальных значений и законы распределения частных случайных погрешностей могут быть различными.

$$\delta_A = \pm K_c \left\{ 2 \left[\left(\frac{\delta_{oc}}{K_{oc}} \right)^2 + \left(\frac{\delta_o}{K_o} \right)^2 + \left(\frac{\delta_n}{K_n} \right)^2 + \left(\frac{\delta_u}{K_u} \right)^2 \right] + \left(\frac{\delta_T}{K_T} \right)^2 + \left(\frac{\delta_d}{K_d} \right)^2 + \left(\frac{\delta_{\eta}}{K_{\eta}} \right)^2 + \left(\frac{\delta_a}{K_a} \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

где δ_{oc} – погрешность, обусловленная неравномерностью коэффициента ослабления ослабителя (находится в пределах $\pm 5\%$); δ_o – погрешность, вносимая оптической системой (находится в пределах $\pm 5\%$); δ_n – погрешность, обусловленная нелинейностью характеристики преобразования измерительного преобразователя (находится в пределах $\pm 7\%$); δ_{η} – погрешность измерительного прибора (находится в пределах $\pm 5\%$); δ_T – погрешность, обусловленная неточностью определения координат контролируемой точки сечения пучка (находится в пределах $\pm 4\%$); δ_d – погрешность, обусловленная конечностью размеров апертурной диафрагмы (находится в пределах $\pm 2\%$); δ_{η} – погрешность, обусловленная нестабильностью мощности (энергии) лазерного излучения за время измерения (находится в пределах $\pm 10\%$); δ_a – погрешность аппроксимации при построении графических

зависимостей распределения значений β_i в различных направлениях сканирования (находится в пределах $\pm 10\%$); $K_c, K_{oc}, K_o, K_p, K_n, K_T, K_d, K_n, K_a$ – коэффициенты, зависящие от закона распределения соответствующих погрешностей и установленной вероятности.

Если распределение всех частных погрешностей равномерное, то предельное значение соответствующих коэффициентов 1,73. Поскольку δ_A представляет собой сумму 8 случайных слагаемых, то она с большой вероятностью распределена по нормальному закону. В этом случае для установленной вероятности 0,95 - $K_c = 1,96$. При выполнении всех описанных выше условий $\delta_A = \pm 20\%$. Коэффициент 2 является следствием расчетного соотношения (1) для искомых значений β_i , т.к. в него входят экспериментальные значения I_i и I_{max} , каждое из которых определяется с соответствующей погрешностью.

Погрешность, обусловленная нестабильностью мощности или энергии лазерного излучения, снижается усложнением схемы измерения путем введения канала измерения нестабильности мощности или энергии. Погрешность аппроксимации обусловлена принятым методом аппроксимации. При использовании метода наименьших квадратов она рассчитывается по среднему квадратичному отклонению аппроксимирующей кривой от экспериментальных точек.

Метод Б

В нем измерение ОРПМ основано на параллельном преобразовании мощности излучения в различных точках сечения пучка лазерного излучения матричным измерительным преобразователем.

Схема расположения средств измерения и вспомогательных устройств должна соответствовать рис. 2.

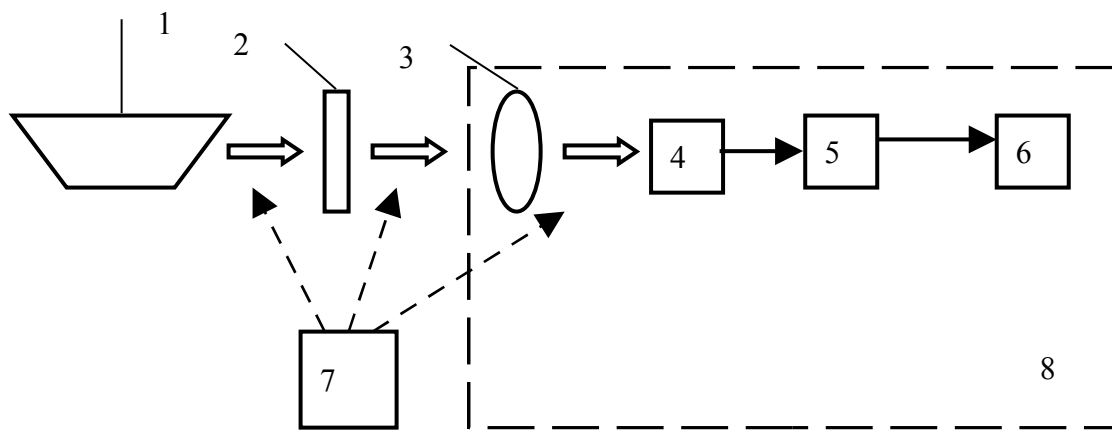


Рис. 2. Схема расположения средств измерений и вспомогательных устройств при измерении ОРПЭ(М) по методу Б: 1- лазер; 2- ослабитель; 3- оптическая система; 4- матричный измерительный преобразователь; 5- коммутирующее устройство; 6- измерительный прибор; 7- средство юстировки; 8- средство измерения ОРПЭ(М) (фигурными стрелками обозначен поток излучения, сплошной – электрический сигнал)

Требования к ослабителю, оптической системе и измерительному прибору те же, что и в методе А. Та же погрешность в 20% допустима, если используется СИ ОРПМ с матричным измерительным преобразователем. Методика подготовки к проведению измерения, самого измерения (без сканирования) и обработки результатов те же. Поэтому остановимся на особенностях метода Б.

Матричный преобразователь должен иметь характерный размер одного фоточувствительного элемента не более 0,1 диаметра пучка и обеспечивать сохранение информации об измеряемой мощности лазерного излучения в течение времени, необходимого для его считывания. Вопрос о количестве элементов опять должен решаться исходя из стандартов и ТУ на лазер, т.е. также как и в методе А. Неравномерность коэффициента преобразования должна быть в пределах $\pm 6\%$.

Матричным преобразователем в спектральном диапазоне 0,4...1,1 мкм могут служить получившие широкое распространение телекамеры с фоточувствительными матрицами на приборах с зарядовой связью, так называемыми ПЗС-матрицами. Если учесть, что простые системы ввода

сигналов этих телекамер в ПЭВМ, получившие название фрейм-граберы, недороги, то метод Б оказывается предпочтительным, по крайней мере, в указанном выше спектральном диапазоне.

Для работы в широком спектральном диапазоне, захватывающем и спектр излучения углекислотных лазеров разработаны термоэлектрические матричные приемники, например, МПЭПИ-100. Этот термоэлектрический матричный преобразователь имеет следующие параметры: спектральный диапазон 0,4...25 мкм; верхний предел измеряемых значений энергии излучения 1 Дж; количество чувствительных элементов 100; размер фоточувствительной поверхности 100×100 мм; размер одного фоточувствительного элемента 10×10 мм, коэффициент преобразования 8 В/Дж.

Погрешность измерения ОРПЭ(М) по методу Б описывается следующей формулой:

$$\delta_A = \pm K_c \left\{ 2 \left[\left(\frac{\delta_{oc}}{K_{oc}} \right)^2 + \left(\frac{\delta_o}{K_o} \right)^2 + \left(\frac{\delta_{mn}}{K_{mn}} \right)^2 + \left(\frac{\delta_u}{K_u} \right)^2 \right] + \left(\frac{\delta_k}{K_k} \right)^2 + \left(\frac{\delta_a}{K_a} \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

где δ_{mn} – погрешность, вносимая матричным преобразователем (находится в пределах $\pm 6\%$); δ_k – погрешность, обусловленная конечностью размера элементов матрицы (находится в пределах $\pm 5\%$); K_{mn} и K_k – коэффициенты, зависящие от законов распределения соответствующих погрешностей и установленной вероятности. Их значения те же, что и в формуле (2).

Погрешность измерения ОРПМ при использовании матричного преобразователя находится в пределах $\pm 20\%$ с установленной вероятностью 0,95, т.е. меньше чем в методе А.

Имеется разновидность метода Б, заключающаяся в использовании фотопленки в качестве матричного измерительного преобразователя.

Допускается в качестве матричного преобразователя применять фотопленку, характеристики которой (спектральная чувствительность, разрешающая способность, фотографическая широта, коэффициент

контрастности, плотность вуали) позволяют измерять ОРПМ лазерного излучения по всему сечению пучка. Погрешность определения характеристической кривой фотопленки, приведенной в эксплуатационной документации на нее, должна быть в пределах $\pm 12\%$. При отсутствии характеристической кривой в эксплуатационной документации ее необходимо определить по ГОСТ 10691.0-73. Для фотометрирования фотопленки применяют денситометры и микрофотометры с погрешностью фотометрирования в пределах $\pm 6\%$.

Фотопленка же и обуславливает особенности проведения измерений и обработки результатов. При ее использовании погрешность допускается в $\pm 25\%$. По документированию, стоимости и пространственной разрешающей способности фотопленка успешно конкурирует с другими методами.

Как видим, ГОСТ с одной стороны дает достаточно исходных данных для проектирования СИ, а с другой оставляет широкое поле для его создания.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ (КОЭФФИЦИЕНТА) РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЧКА

В 1999 году появился стандарт Международной организации по стандартизации International Standard ISO 11146. Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam parameters-Beam widths, divergence angle and beam propagation factor. 28.01.1999 (ИСО 11146), касающийся определений и методов измерения пространственно-энергетических параметров и характеристик лазерного излучения. Он является более свежим по сравнению с российскими стандартами на эту тему, содержит современное видение этого вопроса и отражает современный опыт метрологии лазерного излучения. Поскольку его берут на вооружение законодатели метрологической моды России в области метрологии лазерного излучения – ведущие сотрудники ВНИИОФИ, то можно предположить, что он будет или 1:1 или с небольшими вариациями узаконен и у нас. Он представляется вполне логичным и связывающим воедино комплекс пространственно-энергетических параметров пучка, которые позволяют предсказывать его геометрию при распространении в свободном пространстве и результаты взаимодействия с оптическими элементами.

Во введении к стандарту пучки лазерного излучения делятся на три вида: радиально-симметричные, радиально-несимметричные и астигматичные (скрученные или изогнутые). Стандарт ИСО 11146 не распространяется на пучки третьего вида. Судя по содержанию стандарта, предусматривающего для радиально-несимметричных пучков измерение местоположения перетяжек пучка в двух взаимно перпендикулярных плоскостях z_{0x} и z_{0y} , т.е. случаи простого астигматизма подпадают под действие этого стандарта.

Любой радиально-симметричный пучок лазерного излучения описывается тремя параметрами:

- местоположением перетяжки пучка z_0 ;
- диаметром пучка в перетяжке $d_{\sigma 0}$;

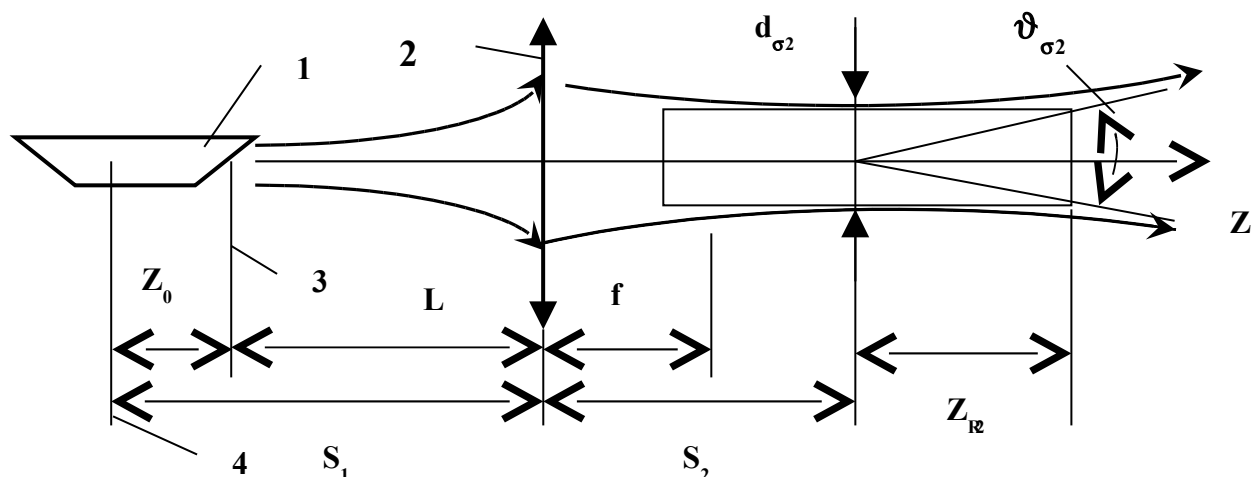
- углом расходимости пучка в дальней зоне ϑ_{σ} .

Зная три вышеупомянутых параметра, можно для углов расходимости менее 0,8 рад записать в первом приближении уравнение распространения пучка вдоль его оси:

$$d_{\sigma}^2(z) = d_{\sigma 0}^2 + (z - z_0)^2 \cdot \vartheta_{\sigma}^2, \quad (1)$$

где z_0 – расстояние, на которое удалено от начала оси z местоположение перетяжки; обычно начало оси z расположено в опорной плоскости xOy , совпадающей, например, с передней торцевой поверхностью корпуса лазера (см. рис. 1).

Рис. 1. Измерение местоположения перетяжки и ее диаметра: 1- лазер; 2-



безабберационная собирающая линза; 3- опорная плоскость лазерного излучателя, от которой отсчитываются расстояния по оси z ; 4- плоскость, в которой расположена перетяжка лазерного пучка; f - фокусное расстояние линзы; L – расстояние от линзы до опорной плоскости лазера s_1 – расстояние от линзы до недоступной для измерений перетяжки; s_2 – расстояние от линзы до сформированной ею перетяжки; z_{R2} – релеевское расстояние сформированного линзой пучка; $d_{\sigma 2}$ – диаметр перетяжки, сформированного линзой пучка; $\vartheta_{\sigma 2}$ – расходимость сформированного линзой пучка; z_0 – расстояние от опорной плоскости до исходной перетяжки; z – направление распространения пучка.

Последнее замечание тоже очень ценно именно для конструктора, т.к. по стандарту ИСО 11146 должна быть материализована система координат, в

которой описывается пучок, т.е. задана материальная база, от которой отсчитываются все расстояния.

Перетяжкой пучка именуется его сечение с минимальными поперечными размерами. В отличие от наших российских стандартов, как показывает анализ ситуации, в стандарте ИСО 11146 под $d_{\sigma 0}$ и ϑ_{σ} подразумеваются диаметр и расходимость по заданному уровню энергии или мощности, которая проходит через диафрагму или которая распространяется внутри телесного угла, характеризуемого плоским углом.

Уравнение (1) справедливо при условии, что для определения поперечного размера (диаметра или ширины) и расходимости пучка используются моменты второго порядка функции распределения плотности мощности (энергии) пучка в его поперечном сечении.

Качество пучка в процессе распространения в стандарте ИСО 11146 предложено характеризовать показателем (коэффициентом) K распространения пучка или обратной ему величиной M^2 , являющейся мерой близости произведения параметров измеряемого пучка к аналогичному произведению для идеального гауссовского пучка. В результате появилось расхожее выражение «критерий M^2 », причем лишь у идеального гауссовского пучка $M^2 = 1$, у реальных пучков - $M^2 > 1$.

Именно этот «критерий M^2 » принято считать характеристикой «ухудшения» качества реального пучка лазерного излучения по сравнению с идеальным, обладающим чисто дифракционной расходимостью, у которого $M^2 = 1$. Реальный пучок, даже если он представляется предельно «гауссоподобным», принципиально не может достичь идеала с $M^2 = 1$, т.к. выходное отверстие лазера ограничено и неизбежно отсекаются моды высших порядков, излучаемые по периферии сечения пучка. Есть и ряд других факторов, подавляющих излучение более высоких дифракционных порядков и тем самым искажающих теоретически идеальную сферическую форму волнового фронта. Стремление к достижению $M^2 = 1$ аналогично попытке приблизиться к нулевой температуре по шкале Кельвина или разогнать

материальную частицу до скорости света. Для гауссова пучка ($M^2 = 1$) справедлив фундаментальный предел:

$$(d_{\sigma 0})_G \cdot (\vartheta_{\sigma})_G = 4\lambda/\pi, \quad (18.13)$$

где $(d_{\sigma 0})_G$ и $(\vartheta_{\sigma})_G$ – диаметр в перетяжке и угол расходимости гауссова пучка, соответственно; λ – длина волны лазерного излучения.

У реальных пучков произведение диаметра (или ширины для радиально-несимметричных) пучка в перетяжке и угла расходимости больше фундаментального предела M^2 раз, т.е.

$$d_{\sigma 0} \cdot \vartheta_{\sigma} = (4\lambda/\pi) \cdot M^2. \quad (2)$$

Если идеальный гауссов и реальный пучки имеют одинаковые диаметры $(d_{\sigma 0})_G$ перетяжки, но разные расходимости, то у реального пучка угол расходимости будет в M^2 раз больше, чем у идеального. Если оба пучка имеют одинаковые углы расходимости $(\vartheta_{\sigma})_G$, но разные диаметры перетяжки, то у реального пучка этот диаметр будет в M^2 раз больше, чем у идеального. Скорее всего, для реального пучка оба этих параметра, т.е. диаметр перетяжки $d_{\sigma 0}$ и расходимость ϑ_{σ} окажутся в равной степени больше, чем для идеального. Тогда зная значение параметра M^2 можно предположить, что:

$$d_{\sigma 0} = (d_{\sigma 0})_G \cdot M; \quad \vartheta_{\sigma} = (\vartheta_{\sigma})_G \cdot M. \quad (3)$$

Величины K (или M^2), $d_{\sigma 0}$ и ϑ_{σ} связывает выражение

$$K = 1/M^2 = (4\lambda_0/\pi) \cdot [1/(n \cdot d_{\sigma 0} \cdot \vartheta_{\sigma})] = (4\lambda/\pi) \cdot [1/(d_{\sigma 0} \cdot \vartheta_{\sigma})], \quad (4)$$

где λ_0 – длина волны излучения в вакууме; λ – длина волны излучения в среде с показателем преломления n , которое и подсказывает методику измерения величин K или M^2 . Их измерение сводится к измерению величин λ_0 , n , $d_{\sigma 0}$ и ϑ_{σ} с последующей подстановкой в (4). При этом считается, что K достаточно измерять с погрешностью порядка 10 %, хотя при $\vartheta_{\sigma} > 0,8$ рад погрешности могут оказаться существенно большими. Практически, поскольку измерения

проводятся в воздухе, то $n \cong 1$, а λ_0 – известна, поэтому экспериментально достаточно измерить $d_{\sigma 0}$ и ϑ_{σ} .

Важность параметра заключается еще и в том, что произведение

$$n \cdot d_{\sigma 0} \cdot \vartheta_{\sigma} = 4\lambda_0 / (K \cdot \pi) = (M^2 \cdot 4\lambda_0) / \pi \quad (5)$$

является инвариантом распространения пучка лазерного излучения в безаберрационной среде в отсутствие ограничивающих диафрагм.

Поскольку перетяжка лазерного пучка в большинстве случаев расположена внутри резонатора, то с помощью безаберрационной собирающей линзы с известным фокусным расстоянием формируют искусственную перетяжку и на ней проводят измерения.

Релеевское расстояние (синонимы – конфокальный параметр или длина ближней зоны) лазерного пучка по определению есть просто отношение

$$z_R = d_{\sigma} / \vartheta_{\sigma}. \quad (6)$$

Непосредственно измеряются расстояния L и s_2 , диаметр перетяжки, сформированного линзой пучка $d_{\sigma 2}$ и диаметр пучка в фокальной плоскости линзы $d_{\sigma f}$, по которому рассчитывается расходимость исходного пучка:

$$\vartheta_{\sigma 1} = d_{\sigma f} / f. \quad (7)$$

Рекомендуемая в стандарте ИСО процедура измерения всей совокупности пространственно-энергетических параметров по искусственно сформированной перетяжке разбивается на 4 этапа. На первом этапе производятся измерения распределения плотности мощности по меньшей мере в 10 сечениях вдоль пучка, причем примерно одна половина из них выполняется в пределах релеевской длины по любую сторону от искусственно сформированной перетяжке, а другая – за пределами двойной релеевской длины z_{R2} в направлении распространения пучка.

Поскольку форма уравнения (1) справедлива и для пучка, сформированного линзой, то по экспериментальным сечениям на втором этапе строится гиперболическая аппроксимация уравнения (1) в форме:

$$d_{\sigma}^2 = A + B \cdot z + C \cdot z^2, \quad (8)$$

например, методом наименьших квадратов.

На следующем, третьем этапе, по известным коэффициентам A , B и C рассчитывается вся совокупность пространственно-энергетических параметров сформированного линзой пучка:

$$K = 1/M^2 = 4 \cdot \lambda / [\pi \cdot (A \cdot C - 0,25 \cdot B^2)^{0,5}]; \quad (9)$$

$$d_{\sigma 2} = [A - B^2 / (4 \cdot C)]^{0,5}; \quad (10)$$

$$\vartheta_{\sigma 2} = C^{0,5}; \quad (11)$$

$$z_{R2} = (A \cdot C - B^2 / 4)^{0,5} / C; \quad (12)$$

$$s_2 = -B / (2 \cdot C) - L. \quad (13)$$

При выводе формулы для расчета s_2 учитывалось, что начало координат оси z находится в точке ее пересечения с опорной плоскостью лазерного излучателя (см. рис. 1).

Рассчитанные значения параметров $d_{\sigma 2}$, $\vartheta_{\sigma 2}$, z_{R2} и s_2 носят вспомогательный характер, т.к. целью эксперимента являются параметры исходного пучка, а не пучка, сформированного линзой. Однако они используются для пересчета на параметры исходного пучка, главным образом, для определения расстояния от опорной плоскости лазерного излучателя до перетяжки z_0 . Расчет параметров исходного пучка и составляет содержание четвертого этапа. Расстояние от линзы до перетяжки исходного пучка s_1 при известном фокусном расстоянии линзы f рассчитывается по формуле:

$$s_1 = \frac{f \cdot s_2 \cdot (s_2 - f) + f \cdot z_{R2}^2}{s_2^2 - 2f \cdot s_2 + f^2 + z_{R2}^2}, \quad (14)$$

зная которое легко рассчитать z_0 :

$$z_0 = s_1 - L. \quad (15)$$

Далее можно поступить двояко. Если расходимость исходного пучка $\vartheta_{\sigma 1}$ независимо измерена по распределению плотности мощности в фокальной плоскости линзы с использованием выражения (7), то для расчета диаметра перетяжки $d_{\sigma 1}$ исходного пучка достаточно воспользоваться уже известным значением коэффициента распространения K , а конфокальный параметр z_{R1} вычислить по (6). Если независимые измерения $\vartheta_{\sigma 1}$ не проводились, то $d_{\sigma 2}$ пересчитывается в $d_{\sigma 1}$:

$$d_{\sigma 1} = d_{\sigma 2} / V, \quad (16)$$

где

$$V = \left[\frac{f^2 - \sqrt{f^4 - 4z_{R2}^2(s_1 - f)^2}}{2(s_1 - f)^2} \right]^{0,5}, \quad (17)$$

а затем, с привлечением K , рассчитывается $\vartheta_{\sigma 1}$ и z_{R1} .

Для радиально-несимметричных пучков, характерных для полупроводниковых лазеров, та же процедура проделывается в каждой из двух взаимно перпендикулярных плоскостей. В результате число измеренных параметров удваивается.

В соответствие со стандартом ИСО определение пространственно-энергетических параметров предусматривает измерение распределения плотности мощности, по крайней мере, в десяти сечениях лазерного пучка и последующую относительно сложную математическую обработку экспериментальных двумерных распределений. Оперативное получение конечных результатов без использования компьютеризированных измерительных систем, очувствленных матричными фотоприемниками, представляется проблематичным.

Известно, что пучки полупроводниковых лазеров радиально-несимметричны, кроме того, им присущ и астигматизм, состоящий в различии радиусов кривизны волнового фронта в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. При использовании полупроводниковых лазеров в оптических

системах, критичных к величине астигматизма, необходимо производить отбор экземпляров по этому параметру, следовательно, его величину нужно оперативно экспериментально оценивать. В принципе, по известным z_{0x} и z_{0y} можно определить и астигматизм пучка полупроводникового лазера:

$$a_s = |z_{0x} - z_{0y}|. \quad (18)$$

Но в данном случае прогнозируются большие погрешности в измерении астигматического расстояния, поскольку оно определяется разностью приблизительно на порядок больших величин. Причем это астигматическое расстояние очень чувствительно к технологическому режиму изготовления лазера и может варьироваться в пределах порядка величины для одной и той же марки лазера, в то время как расходимости не претерпевают существенных вариаций. Поэтому был разработан прямой метод измерения астигматического расстояния принципиально простой в реализации и интерпретации. Суть его поясняется рис. 2 и состоит в следующем.

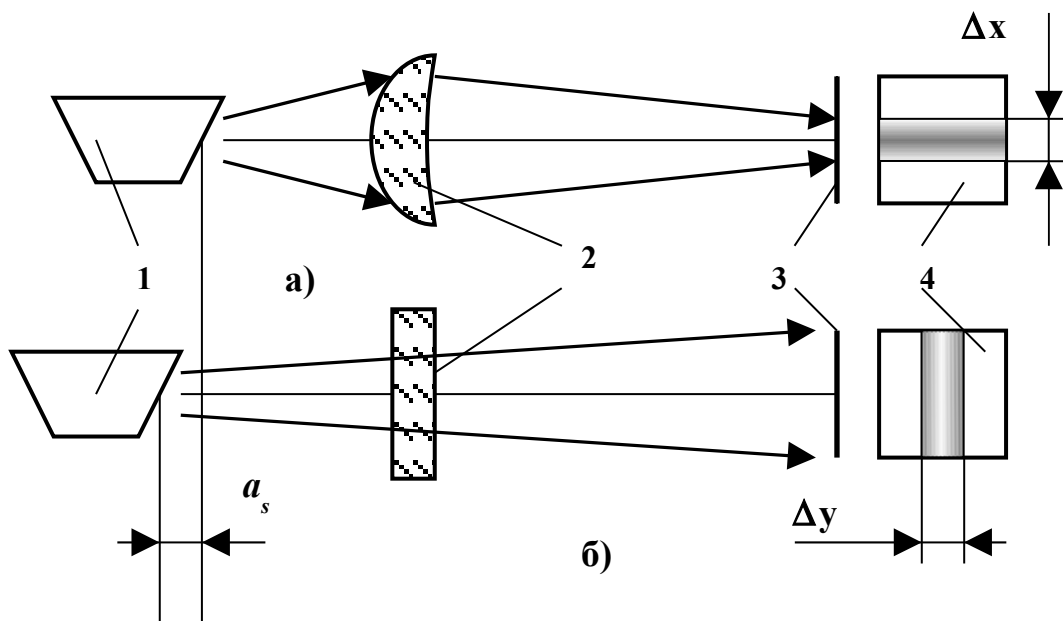


Рис. 2. Измерение астигматизма с цилиндрической линзой: а) цилиндрическая поверхность линзы перпендикулярна плоскости наибольшей расходимости лазерного пучка; б) цилиндрическая поверхность линзы перпендикулярна плоскости наименьшей расходимости лазерного пучка; 1- полупроводниковый лазер; 2- цилиндрическая линза; 3- матричный фотоприемник или экран; 4- распределение плотности мощности лазерного

излучения по фоточувствительной площадке матричного фотоприемника или поверхности экрана; a_s астигматическое расстояние; Δx – минимальная ширина светящейся полосы, соответствующая положению а) цилиндрической линзы; Δy – минимальная ширина светящейся полосы, соответствующая положению б) цилиндрической линзы.

Устанавливают цилиндрическую линзу так, чтобы ее цилиндрическая поверхность была вначале перпендикулярна, например, плоскости наибольшей расходимости полупроводникового лазера (положение а) на рис. 2) и путем осевого перемещения лазера, линзы и матричного фотоприемника добиваются минимальной ширины светящейся полосы собранного цилиндрической линзой лазерного пучка. С помощью микрометрического винта или иного отсчетного устройства фиксируют положение лазера.

Затем поворачивают цилиндрическую линзу на 90° вокруг ее оптической оси (она занимает положение б) на рис. 2) и уже путем осевого перемещения лишь лазера находят его второе положение, соответствующего минимальной ширине светящейся полосы. Второе положение лазера также фиксируется. Модуль разности этих зафиксированных положений и дает искомое значение астигматического расстояния.

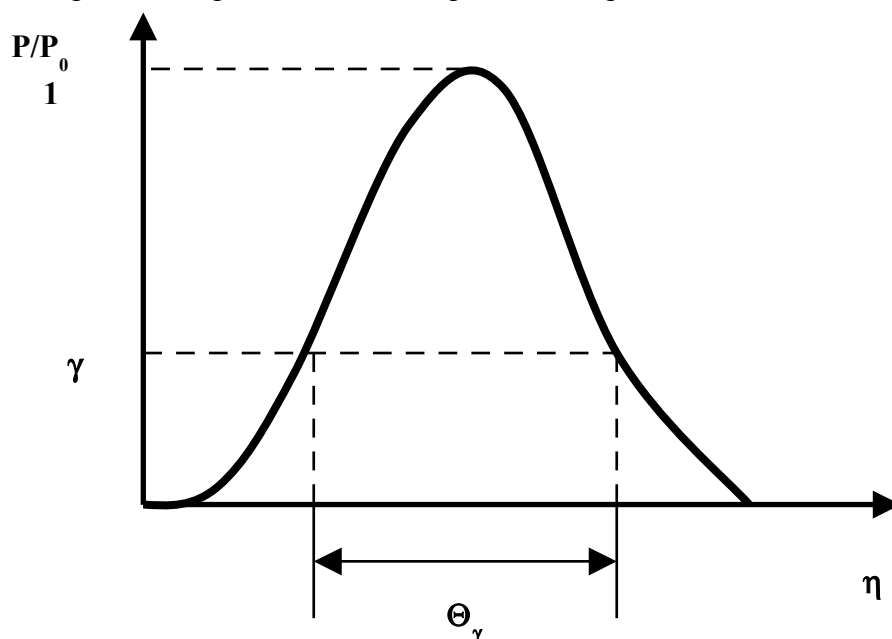
Литература

1. Основы оптической радиометрии / Под ред. А.Ф.Котюка. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 514 с.
2. International Standard ISO 11146. Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam parameters-Beam widths, divergence angle and beam propagation factor. 28.01.1999.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДИМОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ РАСХОДИМОСТИ.

Здесь вновь обращаемся к ГОСТу 24453 - 80. Измерение параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин, где расходимость определяется как плоский или телесный угол, характеризующий ширину диаграммы направленности лазерного излучения в дельней зоне по заданному уровню углового распределения энергии или мощности лазерного пучка, определяемому по отношению к его максимальному значению (рис. 1), обозначения Θ_p и Θ_s . Поскольку в этом определении упоминается диаграмма направленности, то следует определить и ее, тем более, что в том же ГОСТе 24453 - 80 оно приведено. Диаграмма направленности - это угловое распределение энергии или мощности лазерного излучения.

Рис. 1. Диаграмма направленности к определению расходимости



Сразу отметим, что приведенное определение расходимости однозначно характеризует излучение лазеров с топологически простой без боковых лепестков диаграммой направленности, например, одномодовых, т.е. понятие расходимости имеет ограниченное применение. Поэтому и методы измерения

расходимости не нашли отражения в специальных ГОСТах. Тем не менее, для одномодовых лазеров оно себя оправдывает и поэтому предложено несколько методов измерения расходимости.

Второе замечание касается заданного уровня, по которому определяется расходимость, и, как мы увидим далее, энергетическая расходимость. Единого уровня не существует и он должен задаваться специальными стандартами или ТУ. Однако, в качестве распространенных уровней приводятся значения $(1/e^2)$ и 0,5.

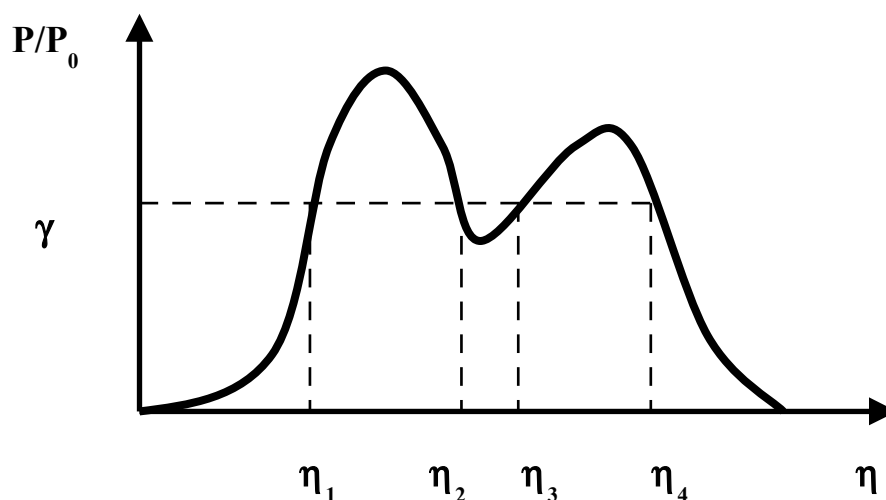


Рис. 2. Двумодальная диаграмма направленности

Третье общее замечание к определениям расходимости, энергетической расходимости и диаграммы направленности состоит в том, что измерения должны проводиться в дальней зоне, хотя непосредственно в определениях энергетической расходимости и диаграммы направленности о дальней зоне не сказано, но в ГОСТе 26086-84. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения прямо указано, что измерения энергетической расходимости должны проводиться в дальней зоне. Дело в том, что вблизи излучающей апертуры лазера угловое распределение мощности имеет непостоянную конфигурацию, поэтому в большинстве случаев практический интерес представляет распределение поля излучения в дальней зоне, когда форма распределения перестает зависеть от расстояния и можно говорить о сформировавшейся диаграмме направленности. В качестве

приближенной оценки границы дальней зоны принимают расстояние, превышающее d^2/λ , где d – диаметр излучающей апертуры лазера; λ – длина волны излучения.

Для гелий-неонового лазера: $d = 2$ мм, $\lambda = 0,63$ мкм – имеем $(d^2/\lambda) = (4 \cdot 10^{-6}/0,63 \cdot 10^{-6})\text{м} = 6,3$ м, т.е. в большинстве случаев для измерения расходимости требуется набрать оптический путь ~ 10 м, хотя и не всегда. Более строгое определение дальней зоны трактует d как характерный размер пространственной когерентности, который меньше диаметра излучающей апертуры лазера, т.е. в каждом конкретном случае следует проводить обоснование приближения дальней зоны. Кроме того существует метод измерения как диаграммы направленности, так и расходимости и энергетической расходимости, в котором реализуется приближение дальней зоны при небольших расстояниях от лазера, – это метод фокального пятна.

Метод фокального пятна.

Этот метод является наиболее распространенным методом измерения расходимости, т.к. преобразование поля ближней зоны излучения идеальной безаберрационной положительной линзой приводит к образованию в ее фокальной плоскости распределения интенсивности, совпадающего с распределением поля излучения в дальней зоне. Применение линзы снимает ограничения по расстоянию, менее которого измерения диаграммы направленности, расходимости и энергетической расходимости не корректны.

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля в рамках скалярной теории произвольную оптическую систему можно характеризовать функцией отклика $G(x_2, y_2; x_1, y_1)$, позволяющей рассчитывать по заданному распределению поля $u(x_1, y_1)$ строго монохроматической волны на входной плоскости распределение поля на выходной плоскости $u(x_2, y_2)$:

$$u(x_2, y_2) = \iint_{\infty} G(x_2, y_2; x_1, y_1) u(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (1)$$

здесь x_2, y_2, x_1, y_1 – отсчитанные от оси системы координаты точек на входной и выходной плоскостях (рис. 3).

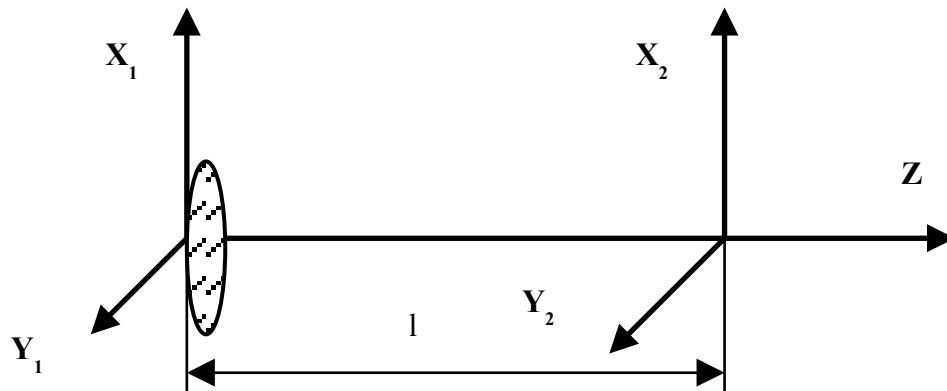


Рис. 3. К введению систем координат

Функция отклика является множителем для учета парциального вклада поля в окрестности точки (x_1, y_1) на входной плоскости системы в амплитуду поля в точке (x_2, y_2) на ее выходной плоскости. Когда поперечные размеры области, в которых поле значимо отлично от нуля, много меньше расстояния между отсчетными плоскостями l , функция отклика однородной среды приобретает вид:

$$G(x_2, y_2; x_1, y_1) = \frac{\exp(ikl)}{i\lambda l} \exp\left\{\frac{ik}{2l}\left[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2\right]\right\}, \quad (2)$$

где $k=2\pi/\lambda$, λ - длина волны света в среде.

Пусть l столь велико, что выполняется неравенство:

$$l \gg k r_{\max}^2 = 2\pi r_{\max}^2 / \lambda, \quad (3)$$

где $r_{\max}^2 = (x_1^2 + y_1^2)_{\max}^{0,5}$ - радиус круга, внутри которого уместается выходное сечение источника (приближение дальней зоны). Тогда, подставив (2) в (1), будем иметь:

$$u(x_2, y_2) = \frac{\exp(ikl)}{i\lambda l} \iint_{\infty} \exp\left[\frac{ik}{2l}(x_2^2 - 2x_2x_1 + x_1^2 + y_2^2 - 2y_2y_1 + y_1^2)\right] u(x_1, y_1) dx_1 dy_1 =$$

(выносим за знак интеграла слагаемые, независящие от x_1 и y_1 , и отбрасываем члены $(x_1/2l)x_1$; $(y_1/2l)y_1$, малые по сравнению с $(x_2/l)x_1$; $(y_2/l)y_1$)

$$= \frac{\exp\{ikl\{1 + [(x_2/l)^2 + (y_2/l)^2]/2\}\}}{i\lambda l} \iint_{\infty} \exp\{-ik[(x_2/l)x_1 + (y_2/l)y_1]\} u(x_1, y_1) dx_1 dy_1. \quad (4)$$

Отношения (x_2/l) , (y_2/l) представляют собой углы наклонов луча, идущего к точке наблюдения (x_2, y_2) из центра выходного сечения источника. Введя углы наклона луча к оси z в плоскостях xOz и yOz $\alpha_x = (x_2/l)$ и $\alpha_y = (y_2/l)$, произведем в (4) соответствующие замены:

$$u(\alpha_x, \alpha_y, l) = \frac{\exp\{ikl[1 + (\alpha_x^2 + \alpha_y^2)/2]\}}{i\lambda l} \iint_{\infty} \exp[-ik(\alpha_x x_1 + \alpha_y y_1)] u(x_1, y_1) dx_1 dy_1. \quad (5)$$

Из (5) следует, что форма распределения поля на различных достаточно удаленных от источника (находящихся в дальней зоне) плоскостях совпадают. Лишь масштаб этих распределений растет пропорционально удалению от источника, и амплитуда уменьшается обратно пропорционально удалению l . Все это напоминает картину распространения сферической волны, испускаемой точечным источником и подчиняющейся законам геометрического приближения.

Если в плоскости x_1Oy_1 установить тонкую безаберрационную линзу (рис.3), то для анализа распределения амплитуды поля в ее фокальной плоскости, т.е. на расстоянии $l = f$ функцию отклика (2) необходимо домножить на ее фазовый множитель:

$$\exp[-(ik/2f)(x_1^2 + y_1^2)]. \quad (6)$$

Добавление этого множителя в функцию отклика (2) приводит к взаимному уничтожению членов, содержащих x_1^2 и y_1^2 , если выполняется условие $l = f$, и для $u(x_2, y_2)$ получаем выражение полностью совпадающее с (5) с заменой l на f . Отсюда вытекает рецепт наблюдения распределения в дальней зоне, которому и следуют: на выходе лазера размещается линза или более сложная оптическая система с фокусным расстоянием $f > 0$. Картина в

фокальной плоскости полностью подобна распределению в дальней зоне. Для перехода к угловому масштабу необходимо линейный масштаб в плоскости x_2Oy_2 разделить на f . Расстояние от источника до измерительной линзы не играет особой роли. Необходимо только следить, чтобы линза "перехватывала" весь световой пучок и чтобы плоскость наблюдения действительно была фокальной. Для этого ГОСТ 26086-84 предусматривает, чтобы входная апертура оптической системы превышала более чем на 50% диаметр пучка лазерного излучения, а погрешность определения фокусного расстояния была в пределах $\pm 10\%$.

Последнее условие, которое накладывает ГОСТ 26086-84 на оптическую систему, заключается в том, чтобы ее фокусное расстояние удовлетворяло условию:

$$f > 2,44\lambda/\Theta_p^2 \quad (7)$$

Последнее ограничение имеет дифракционную природу. Пусть диаметр лазерного пучка на линзе D . Тогда угловой размер диаметра кружка Эйри в фокальной плоскости линзы [12] будет определяться выражением:

$$\theta_{\text{дифр}} = 2,44 \lambda/D, \quad (8)$$

а угловой размер фокального пятна, обусловленный расходимостью пучка, соответственно формулой (рис.4):

$$\theta_p = D/f. \quad (9)$$

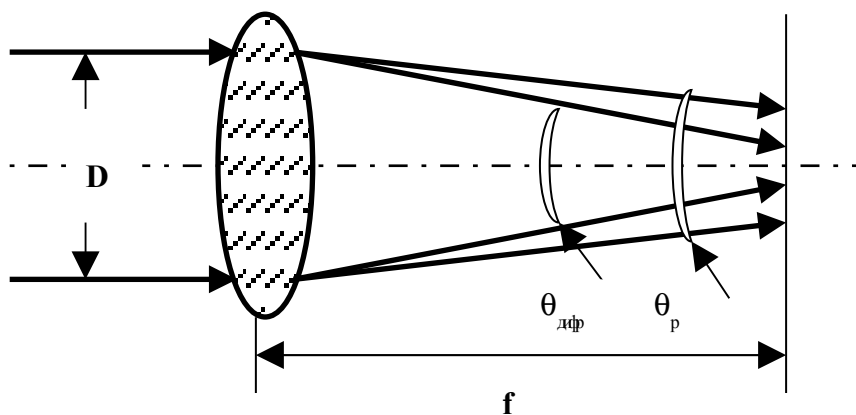


Рис. 4. К снижению вклада дифракции при измерении энергетической расходимости
 Чтобы измерять не дифракционную расходимость, а расходимость лазерного пучка, естественно потребовать выполнение неравенства:

$$\theta_p > \theta_{\text{дифр}} , \quad (10)$$

подстановка (8) и (9) в (10) и приводит к вышеупомянутому условию (7).

Когда физические аспекты метода фокального пятна получили свое объяснение, рассмотрим его метрологические аспекты. Схема расположения средств измерений согласно ГОСТ 26086-84 приведена на рис. 5.

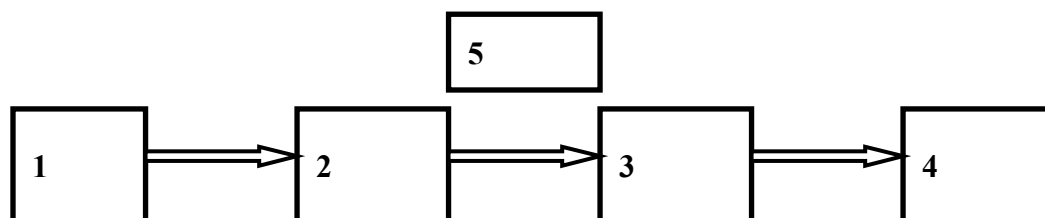


Рис. 5. Схема расположения средств измерения: 1 - лазер; 2 - ослабитель; 3 - собирающая оптическая система; 4 - устройство измерения ОРПМ или диаметра пучка (только для энергетической расходимости); 5 - средства юстировки

Если измерено относительное распределение плотности мощности в пучке, то можно ставить разнообразные задачи по оценке угловых распределений:

1. Строить диаграммы направленности в разных сечениях.
2. Рассчитывать расходимость.
3. Рассчитывать энергетическую расходимость.

Здесь как раз и проявляется неоднозначность понятий диаграммы направленности и расходимости, в то время как для энергетической расходимости все однозначно. Измеряется диаметр пучка по заданному уровню в фокальной плоскости линзы и путём деления полученного значения на фокусное расстояние линзы рассчитывается значение энергетической расходимости по этому уровню:

$$\theta_p = d_\gamma / f . \quad (11)$$

Погрешность измерения энергетической расходимости при выполнении всех требований ГОСТ 26086-84 находится в интервале $\pm 27\%$ с установленной вероятностью 0,95.

Метод двух сечений.

Применим в первую очередь для измерения энергетической расходимости. Он заключается в том, что измеряют диаметры пучка по заданному уровню γ в двух сечениях отстоящих друг от друга на расстоянии l , которое выбирают наибольшим для условий конкретного измерения. Погрешность измерения расстояний между сечениями не должна превышать $\pm 3\%$. Энергетическую расходимость находят из соотношения:

$$\theta_p = (d_2 - d_1) / l . \quad (12)$$

Погрешность измерения энергетической расходимости при выполнении требований ГОСТ 26086-84 находится в пределах $\pm 30\%$ с установленной вероятностью 0,95.

Для обеспечения необходимой точности измерений требуется достаточно большая ~ 10 м база между сечениями, что затрудняет использование метода двух сечений в лабораторных условиях.

Метод регистрации диаграммы направленности.

Этот метод не ГОСТирован. Суть его понятна из всего предыдущего изложения. Здесь нужно в дальней зоне зарегистрировать диаграмму направленности, и по ней путем обработки экспериментальных результатов рассчитать либо расходимость, либо энергетическую расходимость.

Литература

1. Рожков О.В., Щетинкин В.С. Измерение параметров лазеров: Учебное пособие. - М.: И-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. - 70 с.

2. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. – М.: Наука, 1990.- 264 с.

3. Калитиевский Н.И. Волновая оптика. - М.:Наука, 1971. - 376 с.