

Калориметрические преобразователи для дискретных измерений средней мощности излучения волоконно-оптических лазеров

М. Л. КОЗАЧЕНКО, С. В. ТИХОМИРОВ, Н. П. ХАТЫРЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: mkozachenko@vniiofi.ru

Рассмотрен возможный путь измерений средней мощности оптического излучения волоконно-оптических лазеров с помощью работающего в этой области широкоапертурного калориметрического преобразователя больших уровней энергии импульсного и квазинепрерывного лазерного излучения ИПЭ-1-150.

Ключевые слова: средняя мощность, излучение, волоконно-оптический лазер.

The possible way of measurements of average power of optical radiation in fiber-optic high-power laser by means of wide-aperture calorimetric transducer of high levels of laser radiation energy is considered.

Key words: average power, radiation, fiber-optic laser.

В качестве средств измерений (СИ) энергетических параметров оптического излучения широко используют целый ряд измерительных калориметрических преобразователей энергии импульсного и квазинепрерывного лазерного излучения, прошедших государственные приемочные испытания и серийно выпускавшихся отечественной промышленностью в 1990-х гг. Из числа этой измерительной аппаратуры можно, в частности, выделить преобразователи больших уровней энергии импульсного и квазинепрерывного лазерного излучения ИПЭ-1-150 и ИПЭ-1-150Д, имеющие диаметр приемной поверхности 155 мм и работающие в диапазоне энергии 1—40 кДж, в том числе и при длительностях импульсов, достигающих 100—150 с [1].

Свойства преобразователей. Указанные широкоапертурные преобразователи имеют зонную характеристику, не превышающую долей процента, высокую стойкость к излучению большой мощности, случайным перегрузкам и большую надежность. Такая стойкость преобразователей к излучению достигнута вследствие применения в качестве материала приемных элементов рекристаллизованных графитов, содержащих карбиды тяжелых металлов и получаемых методом термомеханической обработки при высоких температуре и давлении. Теплопроводность графитов перпендикулярно оси прессования близка к теплопроводности меди, а параллельно оси — алюминию [2]. В совокупности с рядом других принципиальных решений это позволяет даже при большом диаметре приемной поверхности осуществить работу приемного элемента преобразователя в регулярном тепловом режиме. При таком режиме температурное поле в зоне термобатареи к моменту завершения формирования выходного сигнала прибора теряет отпечаток распределения тепловых источников по полю его приемной поверхности. В совокупности с пространственной однородностью поглощательной способности плоской приемной поверхности преобразователя ИПЭ-1-150, это позволило снизить его зонную погрешность до 0,5 % и менее. Из-за достаточно высокой поглощательной способности применяемого графитового материала стало возможным не наносить на приемную поверхность преобразователя какое-либо поглощающее покрытие, что имеет весьма большое значение. Частичные

локальные разрушения покрытия при случайных оптических перегрузках могут, во-первых, привести к трудно контролируемым нарушениям оптических характеристик прибора и увеличению погрешностей измерений, а во-вторых, сделать необходимой проверку по всей площади приемной поверхности прибора однородности коэффициента преобразования при воздействии узкого пучка излучения (при проведении всех периодических проверок). Диаметр пучка должен соответствовать наименьшему из допустимых значений, указанных в эксплуатационной документации. Последнее, особенно у широкоапертурных приборов, приводит к значительному усложнению поверочных работ, увеличению их объемов и дополнительному расходованию ресурса работы используемых лазеров. Поэтому отсутствие поглощающих покрытий на приемной поверхности преобразователя ИПЭ-1-150 в совокупности с высокой стойкостью к интенсивному лазерному излучению применяемого графита обеспечивает достижение долговременной стабильности оптических характеристик прибора, упрощает метрологические операции при его поверке и значительно сокращает объемы и стоимость поверочных работ.

Возможность нормальной работы преобразователя при длительности энергетических воздействий 100—150 с обеспечивают: большая теплоемкость массивного приемного элемента преобразователя ИПЭ-1-150; значительная длина электродов термобатареи; эффективная защита ее «холодных» спаев от тепловых потоков, идущих как по электродам термобатареи со стороны нагреваемого излучением приемного элемента, так и по телу массивного медного термостата от мест крепления в нем приемного элемента; придание элементам термостата такой конфигурации, при которой искусственно увеличивается время прохождения тепловой волны к горячим спаям термобатареи и ряд других технических решений.

Из-за низкого коэффициента линейного расширения материала приемного элемента преобразователь выдерживает без разрушений его приемной поверхности большое количество теплосмен, что обеспечивает достижение долговременной стабильности оптических характеристик прибора даже при работе не только с непрерывным, но и с им-

пульсно-периодическим лазерным излучением большой мощности и высокой частоты.

Варианты использования преобразователей. Одним из примеров эффективного применения преобразователей ИПЭ-1-150 является измерение средней мощности непрерывного излучения на выходе мощных волоконно-оптических лазеров, которые сейчас находят все более широкое применение. Уровень средней мощности излучения на выходе волоконно-оптических кабелей, входящих в состав этих лазеров, может достигать 25—30 кВт. При этом оптические кабели имеют оптические наконечники для преобразования выходящего расходящегося излучения в параллельные пучки диаметром около 70 мм.

В волоконно-оптические лазеры встроена система управления излучением, позволяющая формировать из потоков излучения практически прямоугольные одиночные импульсы задаваемой длительности. При этом время фронта и среза импульса не превышает 5 нс, что сводит задачу точного дискретного измерения средней мощности излучения подобных лазеров к формированию практически прямоугольного импульса излучения длительностью около 1,5 с и к измерению его энергии преобразователем ИПЭ-1-150. Кроме того, диаметр 155 мм приемной поверхности преобразователя позволяет при необходимости измерять среднюю мощность расходящихся пучков излучения непосредственно на выходе оптических кабелей без применения упомянутых наконечников. Этому способствует свойство ИПЭ-1—150 — слабая зависимость коэффициента преобразования энергии излучения от угла падения на приемную поверхность в пределах $\pm 15^\circ$.

Однако решение задачи метрологического обеспечения мощных лазеров не сводится лишь к поиску и выбору той или иной аппаратуры, способной работать и выдерживать мощное излучение. Часто еще более сложной оказывается надежная поверка аппаратуры, поскольку может потребоваться оснащение поверочных установок не только соответствующими мощными лазерами, но и рабочими эталонами больших уровней средней мощности, а последние, в свою очередь, также необходимо поверять с применением рабочих эталонов более высоких разрядов.

Следует отметить, что на базе преобразователей ИПЭ-1-150 и ИПЭ-1-150Д были разработаны и успешно прошли государственные приемочные испытания рабочие эталоны (на момент их разработки — образцовые СИ), специально предназначенные для поверки рабочих СИ мощного (до 10 кВт) излучения лазерных технологических установок [3]. Поэтому при конструировании ИПЭ-1-150 была поставлена и успешно решена задача его надежной поверки без применения мощных лазеров и высокоэнергетических рабочих эталонов более высокого разряда, так как ИПЭ-1-150 могут надежно работать при длительности импульсов до 100—150 с. Поэтому высокий уровень энергетического воздействия при поверке достигается длительным воздействием пучка непрерывного излучения при сравнительно невысоком уровне его средней мощности (порядка 100—200 Вт). При поверке ИПЭ-1-150 для измерений средней мощности излучения такого уровня можно использовать любые из достаточно широко применяемых в метрологической практике рабочих эталонов этого параметра. Также не вызывают трудностей измерения длительности воздействия непрерывного излучения на преобразователь порядка 100—150 с. При разработке методики поверки преобразователя был реализован

способ эффективной экспериментальной оценки составляющей его погрешности, связанной с указанной длительностью.

Естественно, что для решения поставленной задачи могут быть применены более простые измерительные схемы с использованием преобразователя ИПЭ-1-150 в комплекте с дополнительными вспомогательными оптическими, оптико-механическими или механическими элементами. Это позволяет при необходимости значительно расширить возможности применения образованных таким образом измерительных систем. Разработка образцов вспомогательной аппаратуры была проведена ранее параллельно с разработкой преобразователей. Некоторые из решений подобных систем будут рассмотрены ниже.

Преобразователи ИПЭ-1-150 успешно используют для измерений энергетических параметров излучения разных типов мощных технологических непрерывных и импульсно-периодических лазеров. К ним относятся даже такие мощные лазеры как «Ижора» и «Славянка», мощность непрерывного излучения которых достигает 20 и 30 кВт. Поскольку в нашей стране налаживается в промышленном масштабе сборка именно волоконно-оптических лазеров, а при их выпуске требуется оценка уровня средней мощности излучения с помощью сертифицированного СИ, то этому вопросу посвящена основная часть работы.

В настоящее время для измерений средней мощности излучения мощных волоконно-оптических лазеров используют зарубежные довольно громоздкие проточные полостные калориметры. Каждый такой калориметр содержит: объектив, охлаждаемый водой и фокусирующий излучение в развитый полостный поглотитель с водяной рубашкой; водяной насос для интенсивной прокачки воды через эту рубашку; измеритель ее расхода; устройства для измерений температуры воды на входе и выходе поглотителя; теплообменник для охлаждения с помощью внешнего водопровода циркулирующей в измерительном контуре калориметра воды. Поверка таких калориметров в соответствии с действующей в РФ поверочной схемой сопряжена с рядом трудностей. Во-первых, метрологическое обеспечение проточного калориметра связано с необходимостью доработки некоторых действующих стандартов в области метрологии лазерного излучения. Во-вторых, потребуются оснащение поверочных центров не только соответствующими рабочими эталонами и лазерами, но и силовым электропитанием, а также подключение к мощным водопроводным сетям, необходимым для нормальных условий работы, подлежащих сертификации и последующим периодическим поверкам проточных калориметров.

В последнее время проводится поиск наиболее эффективных путей решения рассматриваемой задачи. На базе преобразователя ИПЭ-1-150 можно реализовать два из них. Наиболее простой путь связан с временным использованием преобразователя вместо проточного калориметра при промышленном выпуске лазеров. В этом случае прошедший государственные испытания преобразователь используют в качестве рабочего СИ и его поверку проводят в соответствии с разработанной и утвержденной документацией на обычных поверочных стендах, оснащенных рабочими эталонами и лазерами, работающими при уровнях средней мощности излучения до 100 Вт. После проведения сертификации преобразователь можно вновь заменить проточным калориметром.

Другой путь — применение преобразователя ИПЭ-1-150 для сертификации и периодических поверок проточного калориметра. Достоинством такого метода является то, что сравнительно компактный преобразователь можно использовать для поверок проточных калориметров прямо на месте их промышленного применения при выпуске и сертификации волоконно-оптических лазеров с мощным излучением. Чтобы осуществлять поверку средней мощности непрерывного излучения быстродействующих проходных рабочих СИ средней мощности непрерывного излучения, встроенных в мощные лазерные технологические установки (ЛТУ), непосредственно в цеховых условиях эксплуатации ЛТУ, были созданы преобразователи ИПЭ-1-150Д. Они отличаются от ИПЭ-1-150 только двумя приемными элементами — рабочим и компенсационным, термобатарей которых включены по дифференциальной схеме. Это позволяет снизить влияние внешних тепловых помех на точность измерений, что важно при работе в цеховых условиях.

Преобразователи для поверки калориметров. Существует несколько вариантов применения преобразователей ИПЭ-1-150 или ИПЭ-1-150Д при поверке проточных калориметров. Наиболее простой из них возможен при условии достаточной долговременной стабильности волоконного лазера. В этом случае измерения средней мощности излучения на выходе световода проводят последовательно, сначала с помощью преобразователя ИПЭ-1-150, а затем поверяемого проточного калориметра. При этом из-за высокого быстродействия последнего за 1,5—2 с фиксируют достаточно большое количество показаний. Если при реализации данного варианта стабильность излучения лазера окажется недостаточной для достижения требуемой точности, можно пойти по пути создания упомянутых ранее системных решений с применением дополнительных вспомогательных устройств.

Самое оптимальное и технически подготовленное схемное решение измерительной системы — использование механико-оптического делителя излучения ДМО-120С. Основным его элемент — вырезанный из плоской кварцевой пластины сменный клин, угол которого может составлять 15°. Клин устанавливают и закрепляют во внутреннем кольце большого шарикового подшипника. Требуемую пространственную ориентацию пластины внутри этого кольца надежно обеспечивает вспомогательное устройство, входящее в состав делителя. Наружное кольцо подшипника жестко закреплено в корпусе делителя; внутреннее кольцо диаметром до 300 мм приводится в быстрое вращение с помощью электродвигателя. Делитель устанавливают в область прохождения пучка излучения диаметром до 120 мм таким образом, что все сечение этого пучка пересекается клином при его вращении, а плоскость клина образует с осью пучка угол не менее 85°. При вращении клина делитель расщепляет проходящий через него пучок излучения лазера на два потока — проходящий и ответвляемый. Ответвляемое под углом до 10° излучение может быть направлено, например, в преобразователь ИПЭ-1-150. Это позволяет на базе указанных делителя и преобразователя реализовать средство контроля уровня средней мощности излучения проходного типа.

К достоинствам рассмотренного технического решения делителя ДМО-120С следует отнести то, что выбранный способ крепления клина лишь со стороны внутреннего кольца подшипника дает ему возможность свободного расширения в противоположную сторону, а именно — к центру подшипника. Это исключает возникновение в пластине клина термических напряжений, вызванных линейными расширения-

ми материала при нагреве излучением. При этом вращение клина, имеющего небольшую ширину, приводит к образованию в его теле температурного поля в виде ряда почти параллельных изотермических линий по ширине клина. Поэтому термические напряжения в этом направлении клина не возникают, что способствует работе делителя с излучением большой мощности. Также выбранный способ крепления клина в делителе приводит к тому, что он при быстром вращении подвергается механическим напряжениям сжатия, а не растяжения. Если учесть, что хрупкие диэлектрические материалы гораздо лучше выдерживают механические напряжения сжатия, чем растяжения, то выбранному способу крепления пластины следует отдать предпочтение.

Выводы. Рассмотренная оптическая схема на базе делителя ДМО-120С и преобразователя ИПЭ-1-150 позволяет контролировать уровень средней мощности воздействующего на поверяемый прибор излучения, учитывать ее изменения и повышать точность измерений. Кроме того, при реализации схемы значительно увеличивается длительность энергетического воздействия на контрольный и поверяемый приборы вплоть до 50—70 с и более. Последнее объясняется тем, что эта длительность ограничена допустимыми уровнями измеряемой энергии для преобразователя ИПЭ-1-150 и средней мощности измеряемого излучения. Ослабление более чем на два порядка уровня средней мощности излучения в ответвленном делителем пучке по сравнению с уровнем полного излучения лазера приводит к аналогичному ослаблению энергетического воздействия на работающий в контрольном пучке преобразователь ИПЭ-1-150. Однако применение рассмотренной проходной измерительной системы в составе поверочной установки потребует ее калибровки с помощью высокоэнергетического рабочего эталона или второго преобразователя ИПЭ-1-150, установленного в пучок проходящего делителем ДМО-120С излучения, при условии некоторого снижения как мощности излучения лазера, так и длительности энергетического воздействия. Таким образом, использование вспомогательной техники в совокупности с рассмотренными преобразователями расширяет возможности создания простых и надежных измерительных систем, работающих с лазерным излучением большой мощности, в том числе и с излучением мощных волоконно-оптических лазеров и способствует решению задач их метрологического обеспечения.

Л и т е р а т у р а

1. Козаченко М. Л. Высокоточные широкоапертурные калориметрические измерительные преобразователи энергетических величин, характеризующих лазерное излучение средних и больших уровней // Измерительная техника. 2007. № 4. С. 22—26; Kozachenko M. L. Highly accurate wide aperture calorimetric measurement transducers for energy values characterizing medium and high levels of laser radiation // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N. 4. P. 378—383.
2. Дойникова Ю. В., Козаченко М. Л., Хатырев Н. П. Разработка калориметрических преобразователей энергии лазерного излучения ИПЭ-1-150 и ИПЭ-1-120М // Измерительная техника. 1990. № 7. С. 8—10.
3. Козаченко М. Л., Певзнер Я. Б., Чистяков Ю. А. Метрологическое обеспечение области измерений средней мощности излучения технологических лазеров // Электротехника. 1988. № 11. С. 27.

Дата принятия 18.03.2014 г.