



ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

Б. Ньюманн, С. Райт, *Artifex Engineering, Германия*

Как на этапе производства и испытаний, так и в процессе эксплуатации лазерных установок, всегда возникает необходимость измерения и контроля параметров выходного лазерного излучения. Для измерения мощности лазерного излучения используют различные типы датчиков. В статье представлены две системы для измерений лазерного излучения высокой мощности.

ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ОПРЕДЕЛЯЮТ ДАТЧИКИ

Измерение оптической мощности лазерного излучения основано на использовании датчиков, преобразующих оптическую мощность в измеряемое напряжение или силу тока. Физические принципы, заложенные в основу работы датчика, определяют функциональность всего измерительного устройства. Для измерения мощности лазерного излучения используют два типа стандартных датчиков (см. табл.).

СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПАРЫ

Термоэлемент представляет собой датчик, состоящий из массива термопар. Отдельные термопары соединены термически параллельно, но в электрической цепи они представляют собой последовательное соединение. Такое соединение имеет важное практическое значение для повышения чувствительности измерительного устройства, так как чувствительность ($V/^{\circ}C$) одной термопары крайне низкая.

Поверхность детектора покрыта черным абсорбирующим материалом. Назначением такого покрытия является максимальное поглощение мощности падающего лазерного излучения, независимо от его длины волны.

С учетом этих фактов становится очевидным, что конструкция термопары имеет следующие характеристики:

1. Термопары имеют низкую чувствительность к световому излучению.

FAST HIGH POWER LASER POWER MEASUREMENT

*B. Neumann, S. Wright,
Artifex Engineering, Germany*

There is always a need to measure and control the parameters of the output laser radiation: at the stage of production and testing, and during the operation of laser installations. Various sensor types are available for laser power measurement. The following article describes two systems that are suitable for high power measurements.

THE SENSOR DEFINES THE FUNCTIONALITY

Laser optical power measurement is performed by using a sensor to transform the optical power into a measurable current or voltage. The physical principles of the sensor will determine the functionality of the whole instrument. Two kinds of standard sensors are available to measure the power of laser radiation (see table).

THERMOPILE SENSORS

A thermopile is a sensor comprising an arrangement of many thermocouples. The individual thermocouples are connected thermally in parallel and electrically in series. For practical sensors, this arrangement is necessary as the thermal sensitivity ($V/^{\circ}C$) of a single thermocouple is very low.

The detector surface is coated with a dull, deep black absorbent material. The purpose of the coating is to absorb as much incident laser beam power as possible, independent of the wavelength.

Considering these facts about the construction of a thermopile, certain characteristics are evident:

1. Thermopiles have a fairly low sensitivity to light.
2. Ambient heat sources will cause measurement error. Typical heat sources may be exhaust air from fan cooled instruments near by, or even a hand on the sensor head. This limits the practical measurable power at the low end to a few milliwatts. On the other hand, thermopiles are good at measuring high power, as long as the sensor surface is not damaged and the heat can be taken away by a fan or water cooling.
3. The absorbent material is crucial for the measurement. However, this coating fades over time, which leads to loss of calibration.



Типы датчиков, используемых для измерения мощности лазерного излучения

Types of sensors to measure the power of laser radiation

Тип датчика Sensor Type	Physical Principle Физические принципы	Description Описание
Фотодиод Photodiode	Электронно-дырочная генерация Electron-hole generation	Генерация неравновесных электронно-дырочных пар происходит вследствие поглощения фотонов в полупроводниковом материале. Внешняя электрическая цепь, подключенная к устройству, обеспечивает циркуляцию тока неравновесных носителей заряда в системе. Величина тока пропорциональна поглощенной оптической мощности. Photons are absorbed in a semiconductor material where they generate electron-hole pairs. An external circuit is connected to the device to allow current flow. This magnitude of the current is proportional to the optical power absorbed.
Термопара Thermopile	Эффект Зеебека Seebeck effect	Устройство, изготовленное с использованием двух различных металлов, соединенных между собой в двух отдельных точках. Вследствие разности температур между этими точками возникает напряжение. Такое устройство называется "термопара". A device constructed using two different metals connected at two separate points. A voltage appears between these two points whenever there is a temperature difference between them. This leads to the name "thermocouple".

2. Термопары должны быть изолированы от внешних источников тепла, которые вносят ошибку в результаты измерений. Типичными внешними источниками тепла могут быть: циркулирующий воздух от приборов, охлаждаемых вентилятором, или даже рука оператора, положенная к головке датчика. Это ограничивает до нескольких милливатт нижний диапазон измеряемой мощности. С другой стороны, термопары являются идеальным инструментом для измерения высокой мощности, если поверхность датчика не повреждена, а тепло может быть отведено посредством воздушного или водяного охлаждения.
3. Материал абсорбента является определяющим фактором для точности измерений оптической мощности. Однако следует помнить, что с течением времени покрытие стирается, что ведет к необходимости повторной калибровки.
4. Термопары очень медленно реагируют на изменения, основанные на изменении теплового потока. Среднее время отклика варьируется от одной до нескольких секунд.

СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ФОТОДИОДОВ

Фотодиод представляет собой полупроводниковое устройство, конструкция которого подразумевает наличие двух электродов (анода и катода), между которыми возникает градиент электрического потенциала. Каждый электрод через тонкие провода соединен с двумя выходными контактами. Поскольку эта конструкция чувствительна к механическим воздействиям, то устройство заключено в металлический корпус с защитным про-

4. Thermopiles react very slowly as the measurement is based on heat flow. Typical response times vary from one to several seconds.

PHOTODIODE SENSORS

A photodiode is a semiconductor device designed in such a way that an electric potential gradient exists between its two electrodes (anode and cathode). These two electrodes are electrically contacted via thin filaments which are led out of the device by two pins. Since this structure is mechanically sensitive, the device is enclosed in a metal housing comprising a protective window through which light can enter.

The functional properties of the photodiode are apparent from its construction:

1. The photodiode is very sensitive to light, as a direct quantum transfer of photons to current takes place. Typically the quantum efficiency can be close to 100%. This allows power measurements down to the femtowatt range. On the other hand, the maximum power is limited to a few milliwatts above which the photodiode goes into saturation: the current generated is no longer proportional to the irradiated power.
2. Silicon – the material of choice for visible range measurements – is abundant and cheap. However, germanium and InGaAs which are required for NIR photodiodes are expensive. The available sensors are thus greatly limited in their size.
3. Semiconductors have a high index of refraction which leads to a relatively high reflection of the incoming beam. Since the surface is very flat, the device acts as a mirror to some extent which

зрачным окном, через которое может проникать излучение.

Рассмотрим функциональные свойства фотодиода, связанные с особенностями его конструкции:

1. Фотодиод обладает высокой чувствительностью к возбуждающему излучению, поскольку происходит прямое преобразование падающих фотонов в электроны. Обычно квантовая эффективность фотодиодов может быть близкой к 100%. Это позволяет измерять низкую мощность светового потока вплоть до фемтосекундного диапазона. Сверху диапазон измеряемых величин мощности ограничен несколькими милливаттами, выше которых фотодиод переходит в режим насыщения, и генерируемый ток уже перестает расти пропорционально энергетическому световому потоку.
2. Приемная чувствительная площадка сенсора выполнена из полупроводникового материала. Кремний – материал, который чаще всего используется для регистрации излучения видимого диапазона, так как он имеет низкую себестоимость. Однако Ge и InGaAs, столь необходимые для создания фотодиодов для ближней ИК-области, в противоположность Si являются дорогостоящими. Также датчики сильно ограничены по своим размерам.
3. Так как приемная поверхность датчика плоская, то устройство представляет собой в некоторой степени зеркало. Полупроводниковые материалы имеют высокий показатель преломления, что приводит к частичному отражению входящего светового потока. Это вносит затруднения в точность измерений.
4. Защитное окно действует как фильтр: в зависимости от угла и положения падающего луча относительно чувствительной площадки фото-

may pose a safety hazard or be troublesome in a measurement setup.

4. The protective window acts as a weak etalon. This means that, depending on the angle and location of incidence of the light, the photodiode may show a different total sensitivity [3].

It would seem therefore, that a photodiode is not suitable for high power laser measurements, since the detector area is small (many high power lasers are at NIR wavelengths) and the device can only measure up to mW of power. Thus many practitioners just accept the compromise and use thermopile sensors.

But what if you want a higher resolution of measurement, wide dynamic range and high speed?

INTEGRATING SPHERES

The integrating sphere offers a remedy for the above-mentioned deficiencies of the naked photodiodes and the thermopiles. An integrating sphere is a passive component comprising a hollow sphere with openings ("ports") that allow the laser radiation to enter and escape.

The inner surface of the hollow sphere is made of a material with a high degree of reflection for the wavelength range to be measured. The surface is manufactured in such a way that the incident radiation is highly scattered. Consequently, such a structure allows an incident laser beam to be evenly distributed over the entire sphere surface via the multiple, strongly diffuse reflections.

Hollow spheres made from a special polymer are suitable for the wavelength range between 250 nm to 2.5 μm . Barium Sulphate (BaSO_4) coated aluminium spheres are somewhat less expensive but they tend to tint yellow over time and are thus unsuitable for precise laser power measurement. For longer radiation in the wavelength range of 700 nm – 20 μm , a gold coating is used on a rough, metal surface. Many high power lasers fall into this spectral range and so solid copper or aluminium is suitable as a good heat-conducting substrate material.

A photodiode built into the wall of an integrating sphere sees only a part of the incident laser power entering into the sphere with the following important changes:

1. The power density is fully homogeneous.
2. The radiation is unpolarized, even if the input radiation was polarized.
3. The power incident upon the sensor is greatly weakened.

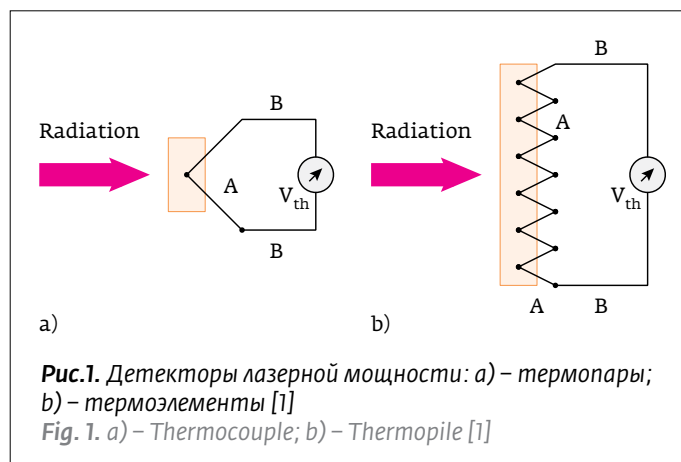
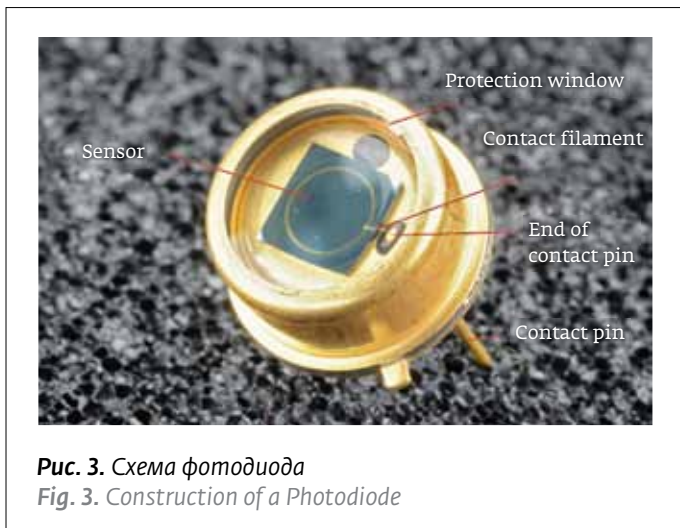
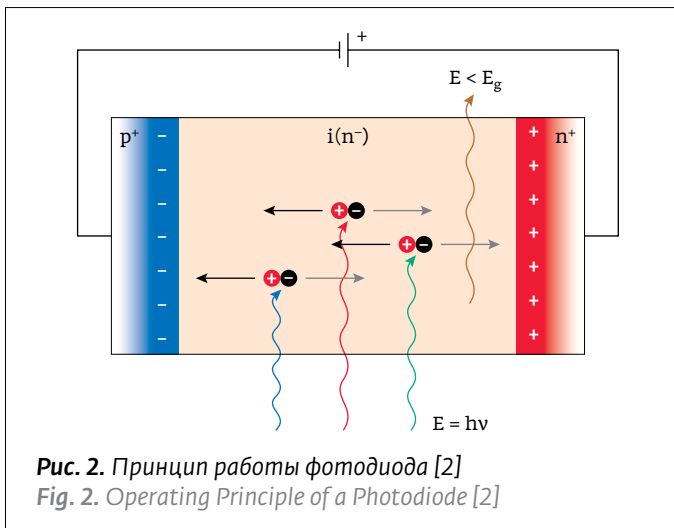


Рис.1. Детекторы лазерной мощности: а) – термопары; б) – термоэлементы [1]
Fig. 1. a) – Thermocouple; b) – Thermopile [1]



диод может проявлять разную интегральную чувствительность [3].

Может показаться, что фотодиод не подходит для измерений высокомогущных лазерных источников, так как площадь сечения высокомогущного лазерного пучка превышает чувствительную площадку детектора, и диапазон измерений детектора ограничен значением величины мощности в несколько милливатт. Поэтому многие пользователи идут на компромисс и просто используют термоэлектрические датчики.

Но как поступить, если для работы одновременно требуются высокое разрешение, широкий динамический диапазон и высокая скоростью вывода данных?

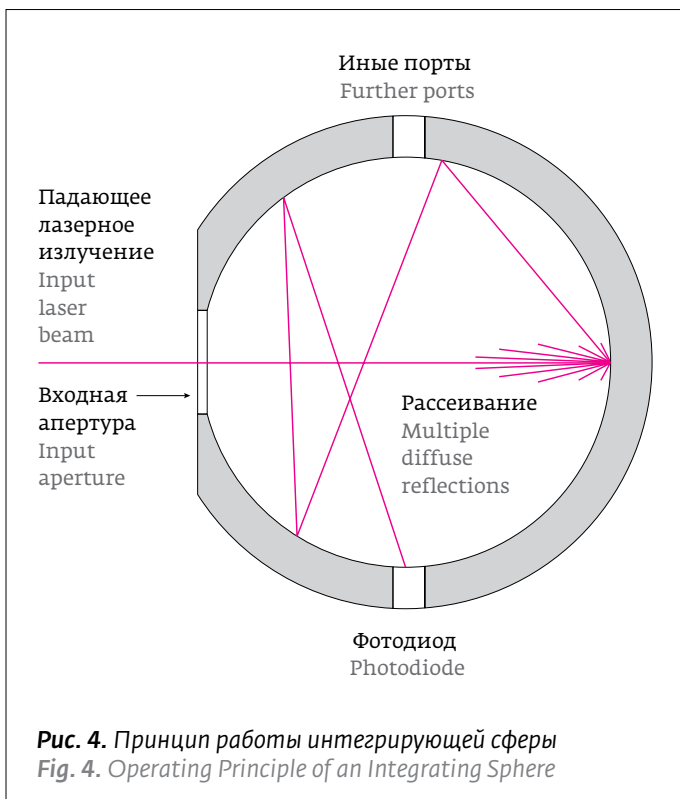
ИНТЕГРИРУЮЩИЕ СФЕРЫ

Интегрирующая сфера – это измерительное средство, лишенное недостатков фотодиодов и термоэлементов, о которых сказано выше. Это пассивное метрологическое средство измерений, содержащее полый шар с отверстиями ("порты"), которые позволяют лазерному излучению проникать внутрь него и легко его покидать.

Внутренняя поверхность шара имеет покрытие, обладающее высоким коэффициентом отражения в измеряемом диапазоне длин волн. Внутри сферы происходит равномерное распределение падающего лазерного излучения по всей поверхности сферы с помощью многочисленных сильно рассеивающих отражателей.

Полые сферы, изготовленные из специального полимера, подходят для измерений в диапазоне длин волн от 250 нм до 2,5 мкм. Алюминиевые сферы, покрытые сульфатом бария (BaSO₄), несколько дешевле аналогов, но со временем

We see that the combination of an integrating sphere and a photodiode allows the design of a laser power sensor that responds as fast as a photodiode but can measure considerably more power. By selecting the size of the integrating sphere, the overall sensitivity of the system can be adjusted. In addition, the detector is now independent of the inhomogeneities of the power density and polarization. The detector is also independent of the location and angle of incidence of the laser radiation.



покрытие приобретает желтую окраску, и следовательно, сферы становятся непригодными для высокоточных измерений мощности лазера. Для измерения мощности излучения в диапазоне длин волн 700 нм – 20 мкм используют сферы с шероховатой металлической поверхностью, покрытой золотом. В этот спектральный диапазон попадает излучение, генерируемое многими типами лазеров высокой мощности. Поэтому твердая медь или алюминий подходят в качестве хорошего материала теплопроводящей подложки интегрирующих сфер.

В боковую стенку интегрирующей сферы встроены фотодиод. Он регистрирует только часть лазерной мощности, попадающей в сферу. При этом характеристики падающего на датчик света отличаются от характеристик того излучения, которое падает на сферу:

1. Плотность мощности излучения получается полностью однородной.
2. Излучение не поляризовано, даже если входное излучение поляризовано.
3. Входная мощность сильно ослабляется.

Мы видим, что комбинация интегрирующей сферы и фотодиода позволяет спроектировать лазерный датчик мощности, обладающий преимуществами и фотодиода, и интегрирующей сферы. Подобный датчик может реагировать так же быстро, как фотодиод, и проводить измерения в широком диапазоне значений мощности, как интегрирующая сфера. Меняя размер интегрирующей сферы, можно изменять общую чувствительность системы. Кроме того, чувствительность детектора теперь не зависит от неоднородности плотности мощности и от поляризации излучения, генерируемого лазером. Детектор также не зависит от взаимного расположения падающего луча и поверхности приемной чувствительной площадки детектора, а также от угла падения на нее лазерного излучения.

Интегрирующую сферу можно использовать для измерений пучков с сечениями относительно больших диаметров, поскольку размер приемной площадки фотодиода в этом слу-



Рис.5. Комбинация сферы с фотодиодом и оптоволоконным портом

Fig. 5. Integrating Sphere with a Photodiode and Fibre Port

The integrating sphere can be used for relatively large beam diameters as the size of the photodiode itself is not a limiting factor. The power density is also significantly less on the inner wall of the sphere than on an absorbent thermopile because the inner surface of the sphere is at least 20 times

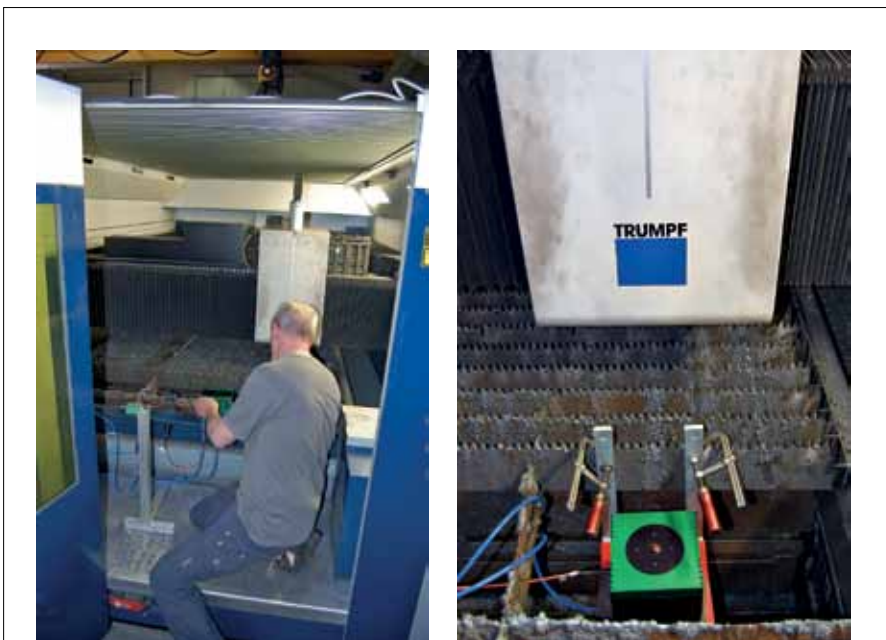


Рис.6. Установка интегрирующей сферы и измерителя мощности внутри кабины обработки

Fig. 6. Installing the integrating sphere and power meter inside the processing cabin

чае не будет проявлять себя как ограничивающий фактор. Плотность мощности излучения, попадающего на внутреннюю стенку сферы, также значительно меньше той, что попадает на поглощающий термоэлемент. Причина в том, что общая площадь внутренней поверхности сферы, по меньшей мере, в 20 раз больше площади входной апертуры. Таким образом, материал стенки может выдерживать более высокую плотность мощности, и со временем это качество существенно не изменяется.

В боковой части сферы дополнительно могут быть расположены иные измерительные порты, что дает преимущества иного рода. Например, волоконно-оптический порт может использоваться для одновременного измерения спектрального состава излучения лазера.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В качестве примера использования интегрирующей сферы для измерений рассмотрим практику измерений флуктуаций мощности дискового лазера мощностью 5 кВт. Данный твердотельный лазер используется для обработки материалов. Измерительное устройство представляет собой интегрирующую сферу – медный шар диаметром 200 мм с золотым покрытием и с водяным охлаждением. Поскольку при таких высоких уровнях мощности происходит нагрев интегрирующей сферы, фотодиод требуется установить вне сферы – изменение температуры самого фотодиода может привести к снижению точности измерений мощности. Сфера была оснащена оптоволоконным портом SMA типа, который подключается к соответствующему порту измерителя мощности. Полная система (сфера-волоконно-фотодиод) была предварительно откалибрована как единая измерительная установка измерения мощности. Счетчик мощности питается от USB и контролируется. Этим ограничивается число кабелей, используемых в измерениях (один USB-кабель и две линии подачи воды).

При использовании измерительной установки было обнаружено, что мощность лазера обладает высокой стабильностью, вплоть до величин 2500 Вт. Однако когда мощность излучения возрастает до 5000 Вт, наблюдалась долговременная флуктуация около 1,5%.

Кроме того, в выходной мощности присутствуют колебания амплитуды, они составляют около 0,7%. Обращаем внимание, что эти более быстрые флуктуации зависят от временного мас-

larger than the input aperture. The wall material can thus tolerate a higher power density and it does not change significantly over time.

Additional measurement ports can be located in the sphere wall offering further benefits. For example, a fibre-optic port may be used for simultaneous measurement of the spectrum of the laser.

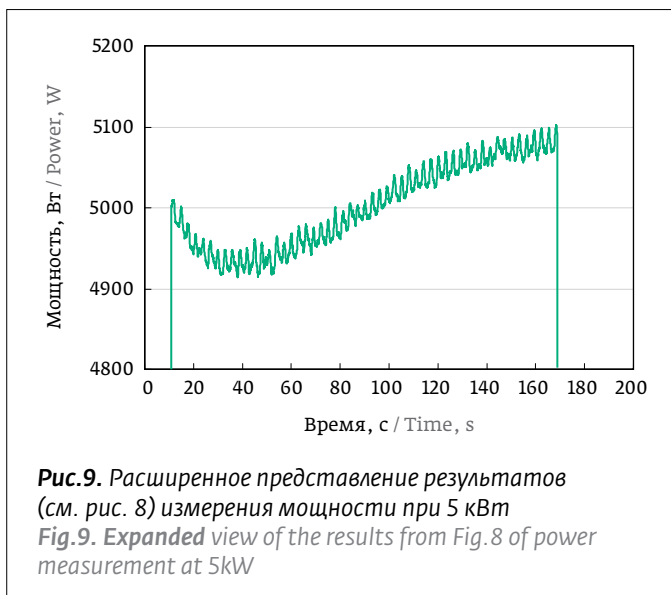
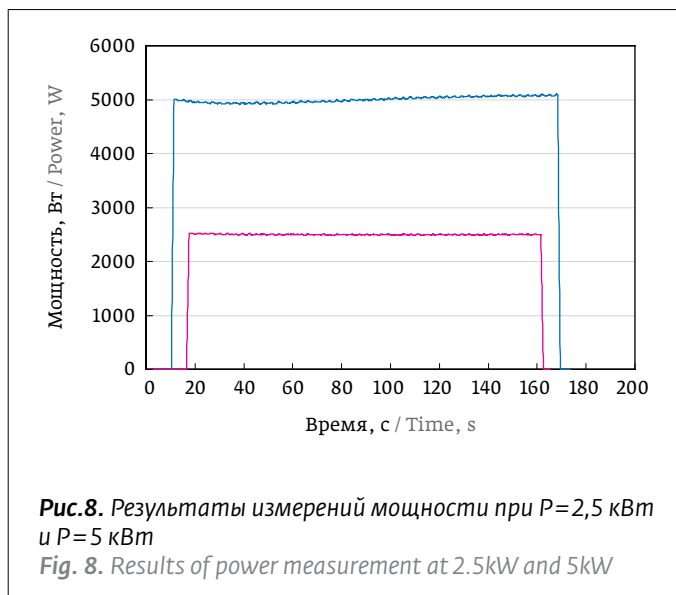
APPLICATION EXAMPLE

As an example of application, a 100mm inner diameter, gold coated copper integrating sphere with water cooling was used to measure the real time power fluctuations of a 5kW disc laser used for materials processing. Since the integrating sphere becomes warm at these power levels, the photodiode was not installed in the integrating sphere itself. Temperature changes of the photodiode can lead to inaccuracy of the power measurement. Instead, the sphere was equipped with an SMA fibre port which leads to an optical power meter equipped with an



Рис. 7. Рабочая измерительная установка (вид через смотровое окно). Обратите внимание на пирографическую камеру, показывающую температуру поверхности сферы (42 °С)

Fig.7. View through the cabin window. Note the pyro camera showing the temperature of the sphere surface (42 °C)



штаба, который не может быть измерен с помощью термоэлемента.

Выводы

Интегрирующая сфера в сочетании с фотодиодом представляет собой практически идеальный датчик для измерения лазерной мощности. При работе с высокомошными лазерами эта комбинация позволяет обнаружить колебания рабочих параметров, которые для термоэлектрического детектора незаметны вследствие слишком длительного временного отклика. С помощью подобной системы можно обнаружить колебания во время работы непрерывных лазерных источников, переходные процессы и флуктуации мощности при запуске лазера, а также кратковременные падения мощности во время работы.

Кроме того, поскольку измерение практически не зависит от величины расходимости пучка, интегрирующие сферы могут использоваться для таких лазерных измерений, как пропускание и отражение на преломляющих и рассеивающих объектах. Например, интегрирующую сферу можно использовать для измерения передачи лазерно-свариваемых пластиковых материалов для определения оптимальных рабочих параметров сварочного лазера.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://bildungsserver.hamburg.de/physik/unterricht/experimente/2584640/00522-thermosaeeule/>.
2. "Pin-Photodiode" from Kirnehkrib – own work. Licenced under CC BY-SA 3.0 by Wikimedia Commons – [https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Pin-Photodiode.png#/media/File: Pin-Photodiode.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pin-Photodiode.png#/media/File:Pin-Photodiode.png).
3. **Boivin L. P.** – Appl. Opt., 1982, v.21(5), p.918–923.

SMA-fibre receptacle. The complete system (sphere-fibre-photodiode) was calibrated as a single unit to ensure accurate power measurement. The power meter is USB powered and controlled which limits the cabling required for the measurement (one USB cable and two water lines).

With this setup it was found that the laser power was very stable up to 2500W. However, when the power was increased to the full rating of the laser (5000W), a long term fluctuation of about 1.5% was seen.

In addition, a faster fluctuation of about 0.7% was seen in the output power. Note that this faster fluctuation is on a time scale which would not be measurable with a thermopile detector.

CONCLUSION

The integrating sphere combined with a photodiode represents a virtually perfect sensor for measuring laser power. For applications with high power lasers, this combination allows the operator to see fluctuations which are too fast for a thermopile detector to measure. This includes fluctuations during CW operation, transients and overshoot on starting the laser and short term power drop-outs during operation.

In addition, since the measurement is virtually independent of beam divergence, integrating spheres can be used for laser-based measurements such as transmission on refracting and scattering objects. For example, the integrating sphere can be used to measure the transmission of laser-weldable plastic materials to determine the optimum operating parameters of the welding laser.