

УДК 536.521.082.52

О. И. Потатуркин, П. А. Чубаков, А. В. Яковлев
(Новосибирск)

**ПРИМЕНЕНИЕ СОВМЕЩЕННЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ
ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ**

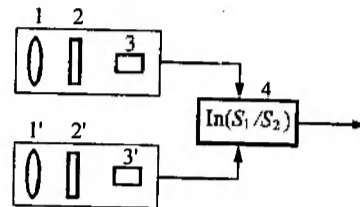
Разработана аппаратура измерения температуры методом бихроматической пирометрии. Предлагается использовать специализированный совмещенный фотоприемник на базе кремниевого и германиевого фотодиодов и многоканальный 24-разрядный АЦП. Это позволяет значительно упростить оптическую схему прибора, повысить стабильность и точность измерений. Описаны конструкция прибора и алгоритм расчета температуры. Приведены результаты экспериментальных исследований разработанного пирометра.

В настоящее время потребность в оперативном дистанционном измерении высокой температуры непрерывно расширяется. В качестве областей применения прежде всего следует отметить такие процессы, как сжигание твердого топлива, плавка металлов, рост кристаллов, обработка давлением, сушка, термоупрочнение и т. п., а также очень важное экологическое направление – контроль за сжиганием твердотельных отходов. При наличии агрессивных сред и температур выше 1000–1400 °С применение контактных датчиков температуры, например термпары, нецелесообразно, так как высокотемпературные термпары достаточно дороги и срок службы их в вышеуказанных условиях невелик. Поэтому наиболее подходящими приборами для этих целей являются пирометры – бесконтактные оптические датчики, работа которых основана на связи температуры с интенсивностью излучения объектов [1].

Существующие пирометры по принципу действия подразделяются на несколько типов. Наиболее простым из них является пирометр полного излучения, в котором весь спектр излучения объекта регистрируется широкополосным тепловым приемником и по полученным данным вычисляется температура. Недостаток такого прибора заключается в том, что его показания зависят от излучательной способности объекта, оптических свойств среды и чувствительности приемника излучения.

Узкополосный (монокроматический) пирометр регистрирует интенсивность излучения объекта в узкой полосе спектра. Такой способ не требует применения широкополосных тепловых приемников излучения, однако его показания также зависят от излучательной способности объекта, оптических свойств среды и чувствительности самого приемника. Кроме того, оптиче-

Рис. 1. Структурная схема классического пирометра спектрального отношения: 1 и 1' – объективы; 2 и 2' – монохроматические фильтры; 3 и 3' – фотодатчики; 4 – электрическая часть прибора



кие свойства узкополосного фильтра, как правило, существенно зависят от температуры, что отрицательно сказывается на стабильности показаний такого типа пирометров.

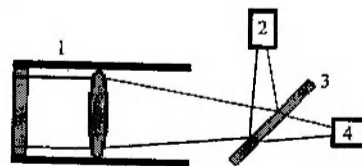
Для указанных выше задач с нашей точки зрения наиболее подходит пирометр спектрального отношения (бихроматический), в котором интенсивность излучения объекта измеряется в двух узких спектральных диапазонах. Причем эти диапазоны должны быть близки друг другу. В этом случае температура определяется отношением интенсивностей и показания прибора слабо зависят от излучательной способности объекта и оптических свойств среды.

Пирометр спектрального отношения в своем классическом виде представляет сложное оптико-электронное устройство, применение которого для непрерывных измерений температуры в промышленных условиях весьма затруднительно. Поэтому цель данной работы заключается в разработке усовершенствованного бихроматического пирометра, обладающего, с одной стороны, высокими эксплуатационными качествами, свойственными нироклополосным односпектральным приборам, а с другой – более высокими метрологическими характеристиками и слабой зависимостью показаний от излучательной способности объектов, оптических свойств среды и геометрии измерений.

Наиболее сложной и дорогостоящей частью пирометра спектрального отношения является его оптический блок. Как правило, для измерения излучения в двух узких спектральных диапазонах используется двухканальная схема (рис. 1) с двумя фотоприемными устройствами (ФПУ). На основе анализа существующих приемников излучения [2] в качестве ФПУ выбраны кремниевый и германиевый фотодиоды. Известно, что их диапазоны спектральной чувствительности перекрываются, поэтому необходимо использовать режетирующие фильтры. Применение для этой цели специальных узкополосных фильтров приводит к снижению технических характеристик прибора в целом, так как их свойства существенно зависят от температуры. На рис. 2 показана возможная оптическая схема бихроматического пирометра с применением спектрально-селективного фильтра. Такое построение прибора требует дополнительной юстировки взаимного расположения фотоприемников.

В разработанном пирометре использован специальный совмещенный фотоприемник [3], устройство которого показано на рис. 3. Режетирующим фильтром в этом случае служит сам кремниевый фотодиод с соответствующим

Рис. 2. Схема разделения оптических диапазонов с использованием кремниевой пластинки в качестве режетирующего фильтра: 1 – объектив с покровным стеклом; 2 – кремниевый фотодиод; 3 – кремниевая пластинка; 4 – германиевый фотодиод



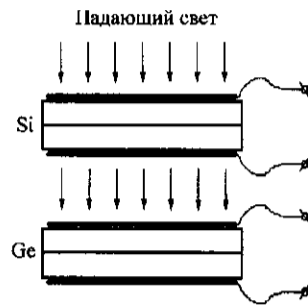


Рис. 3. Устройство совмещенного фотоприемника

щими прозрачными электродами. Спектральные свойства кремния описаны в [4]. Исключение режетирующего фильтра как элемента оптической схемы позволило объединить оба фотодиода в одном корпусе.

При этом, кроме очевидного упрощения и удешевления конструкции, исключается необходимость юстировки взаимного расположения фотоприемников относительно друг друга для совмещения между собой геометрических областей, в которых измеряется интенсивность излучения объекта. За счет этого в конечном итоге может быть значительно повышена точность и надежность прибора.

Для фотоприемника с симметричной узкой полосой пропускания фильтра шириной $\Delta\lambda$, центрированной на длине волны λ , электрический сигнал на выходе с достаточной точностью можно представить в виде [1]:

$$S_{el} = S_d(\lambda)K(\lambda)e(\lambda, T)c_1 \exp(-c_2/\lambda T)(\Delta\lambda/\lambda^5),$$

где $S_d(\lambda)$ – чувствительность приемника; $K(\lambda)$ – коэффициент поглощения среды; $e(\lambda, T)$ – излучательная способность объекта. Для двухканальной схемы в случае, когда S_d и $\Delta\lambda$ обоих фотоприемников одинаковы, а длины волн λ_1 и λ_2 близки друг другу настолько, что K и e изменяются незначительно, отношение сигналов с ФПУ S_{el_1} и S_{el_2} равно

$$r = \frac{S_{el_1}}{S_{el_2}} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^5 \exp\left\{\frac{c_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right\}.$$

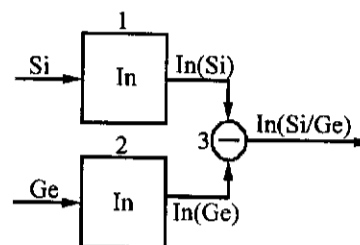
Таким образом, зависимость температуры от интенсивности излучения в двух узких спектральных диапазонах определяется выражением

$$\frac{1}{T} = A + B \ln \frac{S_{el_1}}{S_{el_2}},$$

где A, B – калибровочные коэффициенты. Причем справедливость этой формулы тем больше, чем уже и симметричнее полоса пропускания фильтра. Эксперименты показали, что для описанного выше совмещенного фотоприемника такая формула может быть использована. При этом ошибка определения температуры составит не более 0,5 %.

Вычисляя значения S_{el} для разных температур при фиксированной длине волны $\lambda = 0,8$ мкм (максимум чувствительности кремниевого фотодиода), получим, что при измерении температур в диапазоне 800–1400 °С требуемый динамический диапазон фотоприемника (по интенсивности излучения) составит $\sim 5 \cdot 10^4$. Вследствие большого динамического диапазона сигналов их отношение обычно реализуется в аналоговом виде (рис. 4) с помощью преобразователя, входное и выходное напряжение которого связано логарифмической зависимостью.

Рис. 4. Структурная схема электронной части классического бихроматического пирометра: 1, 2 – логарифмические усилители; 3 – вычитающее звено



Исследования теплового шума дифференциального сопротивления диода, включенного в цепь обратной связи логарифмического преобразователя [5], показали, что такое устройство не обеспечивает требуемой точности пирометра.

С появлением серийно выпускаемых многоразрядных (16 и более) АЦП [6] стало возможным исключение логарифмических преобразователей и вычисление температуры цифровым методом с помощью микропроцессора. Для этого, согласно оценке динамического диапазона, достаточно применения 16-разрядного АЦП. Однако так как динамический диапазон совмещенного фотоприемника составляет $\sim 10^6$, для экспериментального образца пирометра спектрального отношения использован 24-разрядный АЦП AD7714 фирмы "Analog Devices", который представляет собой дельта-сигма-модулятор второго порядка [7] с входным коммутатором на шесть каналов.

Следует отметить, что вследствие применения АЦП с одним преобразователем одновременная обработка сигналов с двух каналов невозможна. Это приводит к асимптотической ошибке при определении температуры нестационарных процессов или объектов, например, таких, как факел пламени.

Избавиться от этого недостатка можно двумя способами. Первый – использовать два синхронно работающих АЦП. Тогда интенсивность излучения обоих каналов измеряется одновременно и полученная температура соответствует реальной температуре тела. Для этого можно использовать 22-разрядный АЦП AD7716 фирмы "Analog Devices" [8], который представляет собой четыре дельта-сигма-модулятора в одном корпусе, работающих синхронно. Второй способ заключается в попеременном измерении сигналов обоих каналов и вычислении среднего значения интенсивности излучения для каждого канала, что приводит к снижению быстродействия прибора.

На основании вышеизложенного разработан и создан экспериментальный образец пирометра спектрального отношения, в котором использованы

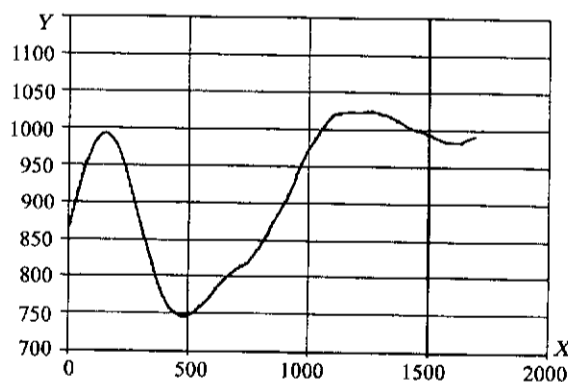


Рис. 5. График изменения температуры, измеренной с помощью бихроматического пирометра

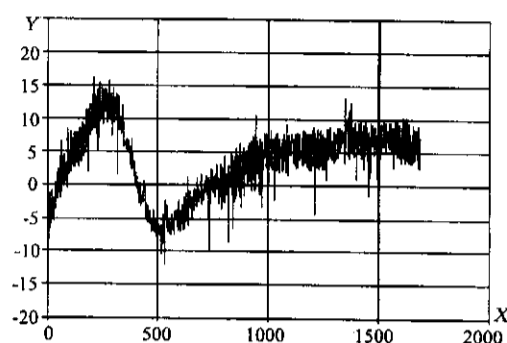


Рис. 6. График отклонения показаний пирометра от температуры тела, измеренной с помощью термопары

специальный совмещенный фотоприемник и АЦП AD7714. Работоспособность прибора проверялась в лабораторных условиях на экспериментальной установке. На рис. 5 приведен график изменения температуры, определенной с помощью пирометра. По оси X отложены номера отсчетов, промежуток между которыми составляет 4 с. На рис. 6 приведен график отклонения показаний пирометра от температуры тела, измеренной с помощью термопары.

Видно, что ошибка определения температуры коррелирована с самой температурой. Это связано с тем, что прибор регистрирует излучение объекта в широкой полосе спектра. Кроме того, ошибка определения температуры зависит от скорости ее изменения, что, скорее всего, связано с запаздыванием показаний термопары.

Определены основные характеристики пирометра спектрального отношения: диапазон измеряемых температур 800–1500 °С; рабочий температурный диапазон 10–70 °С; погрешность измерения температуры не более 0,5 %; частота обновления результата не менее 1 Гц.

На основе анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

- применение специального совмещенного фотоприемника дает возможность упростить оптический блок прибора;
- исключение из оптической схемы узкополосных фильтров и одновременная температурная стабилизация обоих фотодиодов за счет совмещения их в одном корпусе [3] позволяет значительно расширить температурный диапазон работы прибора и избавиться от температурной нестабильности измерений;
- применение 24-разрядного АЦП AD7714, вместо традиционного логарифмического усилителя, позволяет увеличить точность определения температуры и повысить надежность прибора;
- испытания показали, что пирометр спектрального отношения на основе широкополосного совмещенного приемника излучения обладает меньшей точностью измерений по сравнению с аналогичными узкополосными бихроматическими приборами, однако полученной точности вполне достаточно для большинства практических приложений;
- в отличие от известных пирометров спектрального отношения разработанный прибор обладает более высокими эксплуатационными характеристиками, что дает возможность применять его в промышленности и в экспериментальных исследованиях.

Авторы выражают признательность В. А. Борисову и Ю. Н. Долганину за поставку совмещенных фотоприемников и рекомендации по их применению, а также В. Д. Анцыгину и М. А. Гофману за полезные обсуждения и интерес к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем. М.: Мир, 1992.
2. Поскачей А. А., Чубаров Е. П. Оптико-электронные системы измерения температуры. М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Долганин Ю. Н. и др. Пирометр спектрального отношения для измерения истинной температуры углеродистых сталей // Измер. техника. 1997. № 11.
4. Гроссорг Ж. Инфракрасная томография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. М.: Мир, 1988.
5. Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС. М.: Мир, 1985.
6. Analog Devices Winter 97/98 Short Form Designers Guide.
7. AD7714 Data Sheet // Analog Devices Official Internet Site.
8. AD7716 Data Sheet // Analog Devices Official Internet Site.

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
E-mail: potaturkin@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
29 июня 2000 г.*