

(21), (22) Заявка: **2006138162/22, 19.10.2006**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**19.10.2006**

(45) Опубликовано: [27.02.2007](#)

Документ находится в Патентном отделе  
**ОКБ АСТРОН**  
140081, Московская область, г.Лыткарино,  
ул.Парковая, д.1

#### (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области измерительной техники, конкретно - к устройствам радиационной пирометрии, и может применяться для бесконтактного измерения температуры в условиях неизвестных значений излучательной способности объекта, неконтролируемых изменений коэффициента пропускания промежуточной среды, угла наблюдения и размера анализируемой поверхности, в частности, для контроля температуры подложек в ходе технологического процесса выращивания полупроводниковых структур на установках молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Проблема точного измерения температуры объектов в условиях, когда установка каких-либо контактных датчиков не предоставляется возможной, возникает при проведении различных технологических процессов. Заявляемое устройство решает задачу повышения точности измерения температуры объекта. Задача решается тем, что в известном устройстве для бесконтактного измерения температуры объекта, включающем оптическую схему для фокусировки излучения в радиационном пирометре, содержащем спектральный фильтр и электрически связанные между собой фоточувствительный элемент и блок вычислений, блок калибровки и интерфейс для индикации и/или передачи значений температуры объекта в узел обработки данных, новым является то, что устройство содержит узел запуска блока калибровки, выход фоточувствительного элемента пирометра электрически соединен с сигнальным входом блока калибровки, к управляющему входу которого подключен выход упомянутого узла запуска, выход блока калибровки электрически связан с установочным входом блока вычислений, выход которого электрически связан с входом упомянутого интерфейса. 1 сам. п. ф-лы, 1 илл., 1п.

Полезная модель относится к области измерительной техники, конкретно - к устройствам радиационной пирометрии, и может применяться для бесконтактного измерения температуры в условиях неизвестных значений излучательной способности объекта, неконтролируемых изменений коэффициента пропускания промежуточной среды, угла наблюдения и размера анализируемой поверхности, в частности, для контроля температуры подложек в ходе технологического процесса выращивания полупроводниковых структур на установках молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

Задача точного измерения температуры объектов в условиях, когда установка каких-либо контактных датчиков не предоставляется возможной, возникает при проведении различных технологических процессов. Точное определение истинной температуры поверхности объекта является одной из основных проблем бесконтактного метода измерения температуры по тепловому излучению, решение которой обеспечит повышение качества выпускаемой продукции за счет возможности более жесткого соблюдения температурных режимов технологического цикла (например, улучшение воспроизводимости полупроводниковых

структур, выращиваемых на установках МПЭ). Для бесконтактного измерения температуры используются пирометры. Принцип работы различных пирометров основан на измерении интенсивности собственного излучения объекта в одном или нескольких заданных спектральных интервалах, которая связана с температурой тела законом излучения Планка (в зависимости от выбранного спектрального интервала и диапазона измеряемых температур возможно использование приближения Вина или приближения Рэлея-Джинса) [Д.Я Свет. Оптические методы измерения истинных температур., М., Наука, 1982 г., 295 с.]. При этом регистрируемое значение интенсивности теплового излучения объекта зависит от большого числа внешних факторов, которые необходимо учитывать при определении температуры посредством стандартных пирометров. Особенности

различных технологических процессов предъявляют к устройствам бесконтактного контроля температуры следующие основные требования:

- обеспечение бесконтактного определения текущей температуры поверхности объекта в условиях неизвестной излучательной способности с высокой точностью в диапазоне температур (400÷1500)°С;
- возможность определения температуры на различных, в том числе и малых, участках объекта (диаметром (3÷5) мм);
- высокая чувствительность к изменению температуры (точность измерений) - не хуже 0,5°С, что для требуемого диапазона температур соответствует относительной погрешности измерения не хуже 0,05% от полной шкалы;
- высокое быстродействие - не менее 2 отсчетов в секунду;
- обеспечение независимости результатов измерения температуры от угла наблюдения, изменения размера выделенного участка объекта и пропускания промежуточной среды.

Стандартные пирометры, измерительный канал которых содержит оптическую схему, спектральный фильтр, чувствительный элемент (обычно фотодиод или болометр в зависимости от выбранного спектрального диапазона) и блок вычислений, в котором реализуется формула для расчета температуры по тепловому излучению, называются радиационными пирометрами [Д.Я.Свет. Оптические методы измерения истинных температур., М., Наука, 1982 г., 295 с.]. Их принцип работы заключается в измерении интенсивности излучения от объекта в спектральном диапазоне, положение и ширина которого обеспечивает регистрацию необходимого для обеспечения требуемой чувствительности количества энергии, поступающей в виде собственного излучения объекта. Они калибруются на температуру абсолютно черного тела (АЧТ), поэтому для реальных объектов, излучательные характеристики которых отличны от АЧТ, расчетное значение температуры на выходе стандартного пирометра будет отличаться от истинной температуры на величину  $\Delta T$ , являющуюся методической погрешностью пирометра. Величина  $\Delta T$  зависит от излучательной способности объекта  $\epsilon(\lambda, T)$ , характеризующей степень его нечерноты ( $\epsilon(\lambda, T)=1$  только для АЧТ, для всех остальных тел  $0 < \epsilon(\lambda, T) < 1$ ).

Очевидно, что определяемая стандартными радиационными пирометрами температура всегда меньше истинной, кроме того, величина погрешности зависит от выбранной длины волны и растет с увеличением температуры.

На первый взгляд, зная  $\epsilon(\lambda, T)$ , можно легко рассчитать методическую погрешность и ввести поправки для вычисления истинной температуры, для чего существует множество таблиц и номограмм, однако  $\epsilon(\Delta, T)$  зависит не только от материала объекта измерения, но и от качества его поверхности, угла, под которым ведется наблюдение. Кроме того, неполнота данных по этим коэффициентам и несоответствие их значений в реальных условиях табулированным, изменение свойств излучающей поверхности и промежуточной среды в процессе измерений, а также различная площадь поверхности, с которой собирается

излучение, создают методические погрешности, превышающие инструментальные в десятки и сотни раз.

Для уменьшения методической погрешности при определении температуры в условиях неизвестной излучательной способности объекта  $\epsilon(\lambda, T)$  используются пирометры спектрального отношения [Д.Я.Свет, Оптические методы измерения истинных температур., М., Наука, 1982 г., 295 с.], содержащие несколько измерительных каналов, аналогичных радиационному пирометру, с различными спектральными фильтрами, выходы которых поступают на блок вычислений. Вычисление температуры в таких пирометрах основано на методе спектрального отношения, заключающемся в измерении интенсивности собственного излучения объекта не менее чем в двух спектральных интервалах, в которых излучательную способность объекта можно считать одинаковой. В этом случае для расчета истинной температуры объекта используется формула, содержащая отношение сигналов интенсивностей в различных спектральных интервалах, которое не зависит от характеристик объекта и промежуточной среды и полностью соответствует калибровке пирометра на АЧТ. Однако, чувствительность таких пирометров тем выше, чем дальше разнесены длины волн, что накладывает существенные ограничения на их использование для измерения относительно невысоких температур в диапазоне (400÷1500)°С. Спектральная мощность теплового излучения в требуемом диапазоне измеряемых температур резко падает с уменьшением длины волны теплового излучения ( $\lambda \leq 0,8$  мкм), а возможность ее

регистрации на более длинных волнах ( $\lambda \geq 1$  мкм) с заданным быстродействием и высоким отношением сигнал/шум ограничена чувствительностью существующих фотоприемников. Таким образом, ограниченный спектральный диапазон измерений не позволяет создать высокочувствительные устройства пирометрического измерения температуры, основанные на методе спектрального отношения.

Известны устройства пирометрического измерения температуры и излучательной способности объектов, выпускаемые фирмой IRCON, специализированные для измерения температуры ((400÷1500)°С) подложек в технологических процессах выращивания полупроводниковых структур на установках МПЭ ((MODLINE 3, 3W Series для Si-подложек ( $\Delta\lambda = 0.91 \div 0.08$  мкм) и MODLINE 3, 3V Series для GaAs-подложек, ( $\Delta\lambda = 0.91-0.97$  мкм)) [Web site: [www.ircon.com](http://www.ircon.com)], конструктивно выполненные в виде бесконтактного температурного сенсора - стандартного радиационного пирометра, системного микропроцессорного блока индикатора/процессора с клавиатурой, соединенных между собой кабелем. В рассматриваемом устройстве вход блока индикатора/процессора подключен к выходу радиационного пирометра, на котором формируется электрический сигнал, пропорциональный уровню интенсивности теплового излучения от исследуемого объекта в выбранном спектральном диапазоне. Значение этого сигнала используется для расчета и индикации температуры подложки (T1) по известному закону, определяемому при начальной калибровке пирометра на АЧТ, в процессоре блока индикатора/процессора. Для учета излучательной способности подложки в пирометрах фирмы IRCON используется метод и аппаратура, изложенные в заявке на изобретение США [«Method and apparatus for measuring temperature and emissivity», US 2005/0276308, опубликовано 15.12.2005], суть которой заключается в том, что блок индикатора/процессора содержит дополнительный вход для ввода «реперной» температуры (T2), определяемой контактным датчиком (например, термопарой), и блок памяти, в котором записан «алгоритм двоичного поиска» значения коэффициента  $\epsilon(\lambda, T)$  методом подбора до совпадения (с заданной оператором точностью) значений температур T1 и T2 в момент определения излучательной способности объекта  $\epsilon(\lambda, T)$ . Оператором задается начальное

значение коэффициента излучательной способности объекта и шаг его приращения для реализации «алгоритма двоичного поиска». Такой алгоритм позволяет определить значения коэффициента  $\epsilon(\lambda, T)$  с учетом размера выделенного участка подложки и ослабления пропускания пирометрического окна установки МЛЭ. «Реперная» температура  $T_2$  может вводиться в блок индикатора/процессора либо в виде электрического сигнала, поступающего с контактного датчика, либо оператором вручную с встроенной клавиатуры, или через любой известный компьютерный интерфейс.

Недостатком этого устройства является ограничение на точность определения коэффициента излучательной способности  $\epsilon(\lambda, T)$ , а следовательно, и показаний температуры, связанное в первую очередь с тем, что информация о «реперной» температуре  $T_2$ , измеряемой контактным датчиком температуры, может производиться только до начала технологического роста полупроводниковых структур на подложке в установках МЛЭ, то есть при температурах существенно более низких, чем рабочая температура технологического цикла. Непосредственно во время технологического роста установка контактного датчика на вращающуюся подложку не предоставляется возможной. Кроме того, реализация «алгоритма двоичного поиска» требует определенного времени и предварительной калибровки пирометров на АЧТ.

Известно устройство бесконтактного измерения температуры объекта [«Contactless temperature measurement», патент DE10346993, опубликован 2005-06-02], содержащее оптическую схему (объектив), стандартный радиационный пирометр, состоящий из фоточувствительного элемента, спектрального фильтра и блока вычислений, блок калибровки, термодатчик для определения «температуры калибровки» и интерфейс, обеспечивающий возможность индикации и/или передачи значений истинной температуры объекта в компьютер (ПК), наиболее близкое по совокупности существенных признаков, принятое за прототип. В данном устройстве фоточувствительный элемент радиационного пирометра оптически связан с выбранным участком измеряемого объекта, выход блока вычислений пирометра электрически подсоединен к блоку калибровки, на другой вход которого подается электрический сигнал от термодатчика, работающего по принципу отличному от радиационного и периодически устанавливаемого контактным способом на выбранный участок измеряемого объекта для определения «температуры калибровки». В блоке калибровки реализуется «алгоритм калибровки», заключающийся в автоматическом определении методической погрешности для корректировки показаний стандартного пирометра и формировании на его выходе сигнала истинной температуры объекта. Выход блока калибровки подается на интерфейс, обеспечивающий возможность индикации и/или передачи значений истинной температуры объекта в компьютер.

Такое устройство позволяет производить автоматическую калибровку любого пирометра, однако требует предварительной установки дополнительного температурного датчика на исследуемый объект, при этом калибровка пирометра в условиях, отличных от условий технологического процесса, приводит к неконтролируемой погрешности в измерении температуры.

Заявляемое устройство решает задачу повышения точности измерения температуры объекта.

Задача решается тем, что в известном устройстве для бесконтактного измерения температуры объекта, включающем оптическую схему для фокусировки излучения в радиационном пирометре, содержащем спектральный фильтр и электрически связанные между собой фоточувствительный элемент и блок вычислений, блок калибровки и интерфейс для индикации и/или передачи значений температуры объекта в узел обработки данных, новым является то, что устройство содержит узел запуска блока калибровки, выход фоточувствительного элемента пирометра электрически соединен с сигнальным входом блока калибровки, к управляющему входу которого подключен выход упомянутого узла

запуска, выход блока калибровки электрически связан с установочным входом блока вычислений, выход которого электрически связан с входом упомянутого интерфейса.

Предлагаемое устройство позволяет с высокой точностью измерять температуру объекта в условиях неизвестной излучательной способности  $\epsilon(\lambda, T)$  и неконтролируемого изменения пропускания промежуточной среды за счет введения дополнительной (обратной) связи между блоком

калибровки и блоком вычислений, что обеспечивает возможность калибровки в произвольный момент времени, в том числе и непосредственно во время технологического процесса.

Показаниями устройства является значение температуры T1 (в общем случае, отличающееся от реальной температуры объекта T), получаемое в блоке вычислений радиационного пирометра на основании сигнала, поступающего с выхода его фоточувствительного элемента, регистрирующего текущее значение теплового излучения наблюдаемого участка объекта, по формуле, основанной на фундаментальном законе излучения Планка (приближение Вина) [Д.Я.Свет. Оптические методы измерения истинных температур., М., Наука, 1982 г., 295 с.]:

$$T1 = \frac{C_2 / \lambda}{\ln(C_1 \lambda^{-5}) - \ln(R_0(\lambda, T))}, \quad (1)$$

где:

- C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub> - константы излучения, определяемые через известные физические константы;

-  $\lambda$  - длина волны анализируемого излучения (определяется спектральным фильтром);

- R<sub>0</sub>( $\lambda$ , T) - спектральная плотность излучения АЧТ, находящегося при температуре объекта T и связанная с выходным сигналом фоточувствительного элемента пирометра соотношением

$$I(T) = S \cdot G(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda, T) \cdot R_0(\lambda, T), \quad (2)$$

где:

-  $\epsilon(\lambda, T)$  - излучательная способность объекта;

- G( $\lambda$ ) - аппаратная функция, которая учитывает спектральные и геометрические характеристики оптического канала пирометра, пропускание промежуточной среды, коэффициент передачи оптико-электронного тракта;

- S - площадь наблюдаемого участка поверхности объекта.

Значение «температуры калибровки» (T2), устанавливается оператором на клавиатуре устройства или вводится в устройство через интерфейс связи с ПК. В момент достижения объектом заданной температуры T2, определяемой оператором по косвенным признакам, происходит инициализация блока калибровки путем подачи сигнала на его

управляющий вход от узла запуска. При этом на основании сигнала, поступающего на сигнальный вход блока калибровки с выхода фоточувствительного элемента пирометра, происходит вычисления неизвестных коэффициентов в формуле (2) из соотношения:

$$I(T2) = S \cdot G(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda, T) \cdot R_0(\lambda, T2), \quad (3)$$

Полученное в результате вычислений значение произведения неизвестных коэффициентов  $S \cdot G(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda, T)$  за счет наличия обратной связи поступает на калибровочный вход блока вычислений радиационного пирометра и подставляется в формулу (1). Таким образом обеспечивается возможность «привязки» показаний пирометра T1 к температуре калибровки T2 в произвольный момент времени, в том числе и непосредственно во время технологического цикла.

Все необходимые для вычисления температуры коэффициенты, влияющие на величину регистрируемого теплового излучения, определяются при периодической калибровке устройства путем привязки его показаний к характерным температурным точкам, присущим технологическому процессу и определяемым *in situ* по косвенным показателям (температуры плавления, кипения, кристаллизации и других явлений, связанных с изменением агрегатного состояния вещества и происходящих при фундаментальных фиксированных температурах), или по показаниям дополнительных температурных датчиков. В молекулярно-пучковой эпитаксии чаще всего используют границы фазовой диаграммы поверхности, исследуемые с помощью системы дифракции быстрых электронов. Как правило, это температурно-зависимые границы, при прохождении которых (медленном изменении температуры) дифракционная картина на люминофорном экране претерпевает заметные изменения, причем в известном и достаточно узком температурном диапазоне. Если же у материала подложки в требуемом температурном диапазоне нет дифракционных границ, как скажем у подложки сапфира выше 700°C, то можно ориентироваться на изменение силы поверхностного натяжения у тонкой пленки жидкого металла вместе с медленным повышением температуры, такого как, например, галлий. Вследствие этого изменения непосредственно перед началом быстрого испарения в вакууме вблизи 700°C модифицируется структура поверхности, и у нее изменяется

рассеивание, что и регистрирует оптический интерферометр, т.е. наблюдается на фоне плавных скачкообразное изменение его показаний.

Техническим результатом является повышение точности определения температуры объекта независимо от характеристик материала объекта, изменения пропускания промежуточной среды, угла наблюдения и площади анализируемого участка поверхности объекта за счет обеспечения возможности периодической калибровки устройства на исследуемый объект в реальных условиях наблюдения за технологическим процессом.

Техническое решение поясняется блок-схемой пирометра, представленной на Фиг., где:

- 1 - объект измерения;
- 2 - оптическая схема;
- 3 - блок радиационного пирометра;
- 4 - спектральный фильтр;
- 5 - фоточувствительный элемент;
- 6 - блок вычислений;
- 7 - интерфейс индикации/ передачи данных;
- 8 - блок калибровки;
- 9 - узел запуска блока калибровки.

В предлагаемом устройстве оптическая схема 2 формирует оптическое изображение интересующей области объекта 1 и передает его на вход фоточувствительного элемента 5, расположенного в блоке радиационного пирометра 3 через спектральный фильтр 4. На выходе фоточувствительного элемента 5 формируется сигнал  $I(T)$ , величина которого пропорциональна температуре  $T$  исследуемой области объекта 1. Сигнал  $I(T)$  поступает одновременно на вход блока вычислений 6, где вычисляется температура  $T_1$  объекта 1 на основании «защитой» в нем формулы с учетом хранящихся в его памяти значений неизвестных коэффициентов и на сигнальный вход блока автоматической калибровки 8. Выход блока калибровки 8 соединен с установочным входом блока вычислений 7, на который поступают и записываются в память значения калибровочных коэффициентов, определяемые в момент калибровки. Калибровка осуществляется путем подачи сигнала на управляющий вход

блока калибровки 8 с выхода узла запуска 9 (например, при нажатии кнопки «калибровка», расположенной на узле запуска 9) в момент достижения объектом характерной температуры  $T_2$ , определяемой оператором.

Работа устройства.

Изображение области объекта 1, на которой необходимо измерять температуру, формируется оптической схемой 2 и передается через оптическую схему 2 и спектральный фильтр 4 на фоточувствительный элемент 5. Фоточувствительный элемент 5 непрерывно формирует на своем выходе сигнал ИТ, пропорциональный падающему на него излучению. Сигнал с выхода оптического температурного сенсора 5 поступает на сигнальный вход блока вычислений 6 и на сигнальный вход блока калибровки 8. На управляющий вход блока калибровки 8 поступает сигнал с пускового устройства 9, запускающий «алгоритм калибровки», заключающийся в определении неизвестных коэффициентов в момент, когда температура объекта Т1 соответствует характерной температуре Т2. Полученное в результате калибровки значение произведения неизвестных коэффициентов используется для корректировки формулы для расчета температуры объекта, «зашитой» в блоке вычислений 6 и связывающей измеряемый ток  $I(T)$  фоточувствительного сенсора с температурой объекта Т. Значение калибровочного коэффициента заносится в память блока вычислений 6 и хранится там до момента следующей калибровки. Значение истинной температуры выбранного участка объекта Т1 поступает на интерфейс индикации/передачи данных 7 и, при необходимости, может передаваться в компьютер.

Пример.

Изготовлен опытный образец устройства для бесконтактного измерения температуры объекта по схеме, изображенной на Фиг. Конструктивно устройство выполнено в виде 2-х блоков: оптической насадки, которая устанавливается, например, на фланец МПЭ-установки для контроля температуры подложки в условиях технологического роста полупроводниковых структур на установке МПЭ, и оптико-электронного блока детектирования и обработки сигнала теплового излучения, собранного в стандартном модуле 3U «Евромеханика». Оба блока соединяются оптоволоконным кабелем произвольной длины через

оптические разъемы типа FC. Оптическая схема 2 устройства содержит схему фокусировки сигнала теплового излучения от заданного участка объекта 1, двухкоординатную подвижку для юстировки местоположения анализируемого участка объекта, конструктивно выполненные в оптической насадке, а также оптический визир, состоящий из

полупроводникового лазера ( $\lambda = 0,65$  мкм) и спектрально-селективного зеркала для ввода зондирующего излучения полупроводникового лазера в оптоволоконный кабель для визуализации места и размера измеряемого участка объекта, и линзу для передачи сигнала теплового излучения с выходного торца оптоволоконного кабеля на фоточувствительный элемент 5 через спектральный фильтр 4, расположенные в оптико-электронном блоке детектирования и обработки сигнала теплового излучения. В качестве фоточувствительного элемента 5 в устройстве использован малощумящий фотоприемник типа FI-1, в качестве спектрального фильтра 4 -узкополосный фильтр фирмы Edmund Industrial Optics (США, номер

по каталогу E45-671) с  $\lambda = (0,95 \pm 0,025)$  мкм. Блок вычислений 6 и блок калибровки 8 выполнены на микропроцессоре AT89S8253 и микросхемах 74HC590, 74HC08, 74HC74, 74HC86, 74V1G04, блок интерфейса 7 содержит микросхемы 74HC595S и индикаторы DA08-11HWA для вывода значений температуры на лицевую панель модуля «Евромеханика». Узел запуска 9 выполнен с использованием клавиатуры типа AK103, расположенной на лицевой панели модуля «Евромеханика». С ее помощью также вводится значение температуры калибровки Т2. Конструктивное исполнение устройства в виде оптической насадки и удаленного блока обработки, соединенных между собой оптоволоконным кабелем, обеспечивает удобство его установки на технологические установки различной конфигурации (в данном случае, на фланце пирометрического окна установки МПЭ), легкость фокусировки на объект и прицеливание на место измерения с возможностью визуального контроля этого процесса, а также существенно снижает требования к защите оптической и электронной измерительных схем устройства от внешних воздействий.

Устройство было испытано в ЗАО «научное и технологическое оборудование» при изготовлении лазерных гетероструктур  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  методом МПЭ на установке ЭП1203.

Использование предлагаемого устройства позволило в процессе выращивания серии из трех лазерных гетероструктур, выращенных подряд, осуществлять контроль температуры, корректировать процесс роста и получить незначительный разброс длины волны генерации лазерных диодов - на уровне  $\pm 2$  нм от структуры к структуре. Это свидетельствует о высокой точности и чувствительности устройства, обеспечившей воспроизводимость технологических условий в пределах ростовой серии, т.к. даже незначительные изменения ростовой температуры привели бы к изменению состава активной области и, как следствие, к значительному изменению длины волны генерации.

Испытания устройства были проведены также на модели АЧТ с регулируемой температурой. Температура АЧТ изменялась от 400 до 1100°C путем изменения тока накала его нагревательного элемента и контролировалась по показаниям встроенной термопары. Испытания показали, что разработанное устройство обеспечивает точность измерения температуры  $\pm 3^\circ\text{C}$  (0,25% от диапазона измерений) при калибровке его на произвольную температурную точку внутри диапазона. Это по крайней мере в 2 раза лучше, чем точность известных радиационных пирометров данного температурного диапазона [www.ircon.com].

#### Формула полезной модели

Устройство для бесконтактного измерения температуры объекта, включающее оптическую схему для фокусировки излучения в радиационном пирометре, содержащем спектральный фильтр и электрически связанные между собой фоточувствительный элемент и блок вычислений, блок калибровки и интерфейс для индикации и/или передачи значений температуры объекта в узел обработки данных, отличающееся тем, что устройство содержит узел запуска блока калибровки, выход фоточувствительного элемента пирометра электрически соединен с сигнальным входом блока калибровки, к управляющему входу которого подключен выход упомянутого узла запуска, выход блока калибровки электрически связан с установочным входом блока вычислений, выход которого электрически связан с входом упомянутого интерфейса.