

А. М. АХИЕЗЕР

Украина, Одесская государственная академия холода
E-mail: oniitt@te.net.ua

Дата поступления в редакцию
12.12 2003 г.

Оппонент В. А. Иванов
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

МАЛОГАБАРИТНЫЙ СТАЦИОНАРНЫЙ ПИРОМЕТР С ПОВЫШЕННЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Термостабилизация оптической части пирометра, калибровка и применение движущегося датчика позволяют на 50% повысить его температурную разрешающую способность.

Исследование тепловых полей нагретых объектов по их инфракрасному (ИК) излучению существенно отличается от контактных способов измерений. Последние требуют осуществления надежного контакта с исследуемым объектом и дают информацию о температуре только в точке контакта. При измерениях температуры объектов, размеры которых соизмеримы с размерами термодатчика, вносится большая погрешность. В случае же исследования тепловых полей очень малых объектов (например, изделий микроэлектроники) контактные измерения становятся невозможными.

Этих недостатков лишены неконтактные ИК-методы, осуществляемые с помощью пирометров (радиометров).

Инфракрасные пирометры имеют широкий спектр применения [1, 2]:

— для неконтактного измерения температуры промышленных объектов (режущего инструмента, прокатываемого металла, тормозных прокладок и т. д.), контроля исправности электротехнического оборудования, контроля изделий, для испытания эффективности теплоизоляции;

— в измерительной технике для применения в радиометрических комплексах (для восстановления глубинного профиля распределения температуры);

— в электронной промышленности для измерения температурного распределения на кристалле больших интегральных схем, контроля качества биполярных элементов, МОП-схем, СВЧ-транзисторов и др.;

— в медицинских целях для неконтактного измерения температуры кожи, исследования температурных ощущений, ранней диагностики рака, контроля за заживлением ран без снятия повязки, ранней диагностики предынфарктного состояния, выявления сосудистых поражений мозга, исследования закупорки вен и варикоза вен.

Основная масса существующих на сегодняшний день систем бесконтактного измерения температуры предназначена для измерения высоких температур, более 500 К, при этом температурное разрешение таких систем составляет от 1 до 0,1 К. В то же время для медицинских задач, где максимальное измеряемое изменение температуры составляет от 0,1 до 3 К, температурного разрешения в 1—0,1 К явно недостаточно. В связи с уменьшением потребляемой мощности микросхем аналогичная ситуация складывается с измерением температурного распределения на кристалле больших интегральных схем (БИС) и теплового распре-

деления в электронных узлах. Современные радиометрические комплексы для восстановления глубинного профиля распределения температуры также требуют больших точностей работающих в их составе систем бесконтактного измерения температуры.

В работе предлагается один из вариантов реализации пирометра с температурным разрешением 0,03 К. Функциональная схема пирометра изображена на **рисунке**.

В качестве приемника теплового излучения предлагается использовать пироэлектрический приемный элемент (пироэлектрик). Особенность пироэлектрических кристаллов заключается в спонтанной поляризации при отсутствии внешних электрических полей. Обнаружить поляризацию пирокристаллов можно только при измерении температуры на гранях кристалла, перпендикулярных к полярной оси [3, с. 5].

Следует отметить, что пироэлектрический ток — сложная функция физических характеристик кристалла, его геометрических размеров и условий теплообмена со средой. Значение тока зависит от двух основных факторов — среднего прироста температуры приемного элемента и скорости изменения прироста температуры. Равномерность частотной характеристики пироэлектрического кристалла нарушается при очень низких частотах, когда тепловые волны, пройдя приемный элемент, достигают подложки, и при слишком больших частотах, когда они не достигают пироактивного кристалла [1, с. 33].

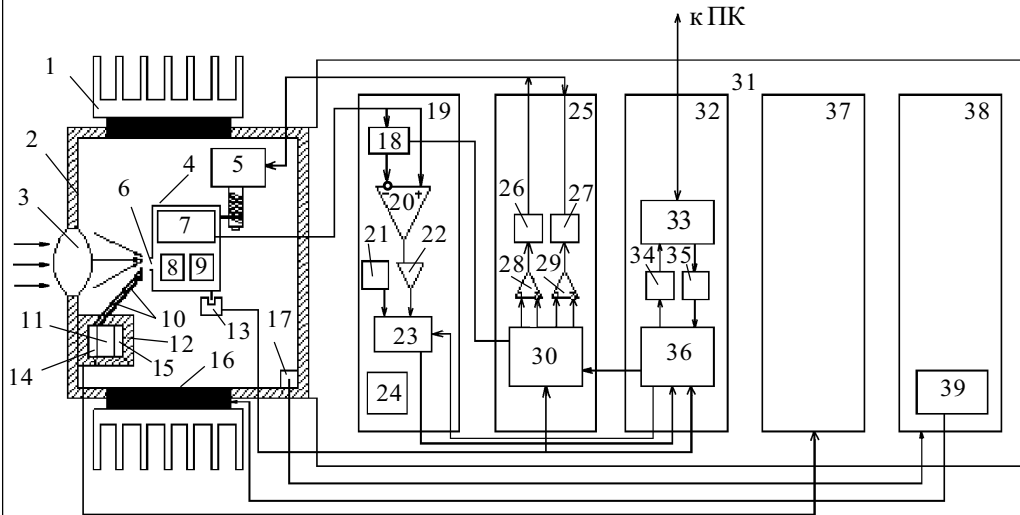
Чувствительность пироэлектрика должна приходиться на максимум спектра излучения абсолютно черного тела. Этот максимум смещается с увеличением температуры в сторону более коротких длин волн. Уравнение вычисления этой длины волны является одним из выражений закона смещения Вина [4, с. 36]:

$$\lambda_{\text{макс}} T = C_3, \quad (1)$$

где C_3 — постоянная закона смещения Вина, равная $2,8978 \cdot 10^{-3}$ м·К.

Из закона смещения Вина можно определить, что для измерения температур в диапазоне 300—350 К датчик должен быть чувствителен к длине волны, на которую приходится максимальное излучение, т. е. 8—12 мкм (дальнее ИК-излучение). Необходимо определить также долю полусферической интегральной поверхностной плотности потока излучения $F_{\lambda_1-\lambda_2}$, испускаемую в полосе спектра 8—12 мкм.

$$F_{\lambda_1-\lambda_2} = F_{0-\lambda_2 T} - F_{0-\lambda_1 T}. \quad (2)$$



Функциональная схема пирометра:

1 — теплоотводящие радиаторы; 2 — теплоизолированный экранированный корпус; 3 — ИК-линза из КРС-5; 4 — экранированный корпус; 5 — шаговый электродвигатель; 6 — диафрагма; 7, 20 — прецизионный предварительный операционный усилитель (ОУ); 8 — пироэлектрический приемник; 9 — источник стабильного тока; 10 — световоды из КРС-5; 11 — термостат; 12 — теплоизоляция; 13 — оптопара; 14 — датчик температуры, совмещенный с источником стабильного

тока; 15 — нагревательный элемент; 16 — холодильные элементы (элементы Пельтье); 17 — датчик температуры корпуса; 18 — устройство выборки хранения (УВХ); 19 — аналоговый модуль обработки сигналов; 21 — высокоточный источник опорного напряжения; 22 — согласующий ОУ; 23 — аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 24 — преобразователь/фильтр аналоговых питающих напряжений; 25 — модуль управления двигателем и синхронизацией; 26, 27 — усилитель мощности; 28, 29 — ОУ; 30, 36 — управляющий микроконтроллер; 31 — кросс-плата; 32 — модуль цифровой обработки сигналов; 33 — интерфейс порта RS-232; 34, 35 — оптоэлектронные развязки; 37 — модуль высокоточного термостата; 38 — модуль термостата корпуса; 39 — усилитель мощности

Значения $F_{0-\lambda T}$ приведены в справочных таблицах [5]. В нашем случае $F_{0-\lambda 2T}=0,428$ (310 К, 12 мкм), $F_{0-\lambda 1T}=0,161$. Следовательно, в ИК-приемник, чувствительный в диапазоне 8—12 мкм, попадет $(0,428 - 0,161) \cdot 100\% = 26,7\%$ интенсивности всего излучения.

Существует два основных вида фокусирующих систем для диапазона дальнего ИК-излучения — линзовые и зеркальные. Зеркальные системы имеют меньший коэффициент поглощения принимаемого излучения, однако, по сравнению с линзовыми, имеют больший кружок рассеяния [2, с. 171] и предпочтительны только для невысоких геометрических разрешений. В линзовых системах удается достичь лучшего качества фокусирования, однако линзовые системы имеют больший коэффициент поглощения.

В качестве фокусирующей системы предлагается использовать линзу из материала КРС-5, т. к. для исследования распределения тепла на кристалле БИС или (в медицинских целях) для исследования тепловых распределений и акупунктурных точек необходимо высокое геометрическое разрешение при небольших расстояниях до исследуемого объекта. В этом случае линзовая система фокусирования ИК-излучения является предпочтительнее [2]. Для уменьшения коэффициента поглощения линзовой фокусирующей системы в качестве объектива используется только одна линза с фокусным расстоянием 40 мм. Для обеспечения модуляции входного излучения не используется световод (который еще больше увеличил бы коэффициент поглощения входного излучения), а применяется устройство, которое передвигает приемник от зоны входного к зоне опорного излучения и обратно.

Основной преградой для увеличения температурного разрешения (пороговой чувствительности) являются шумы. В электронной аппаратуре, в том числе и в пирометрах, в сигнале присутствует большое число различных шумов:

— тепловой шум полупроводника, который наблюдается при отсутствии тока через полупроводник. Источником тепловых шумов является сопротивление в транзисторе. Природа тепловых шумов связана с хаотическим тепловым движением электронов в объ-

ме полупроводника. Спектр такого шума равномерен до СВЧ. Средняя мощность тепловых шумов определяется формулой Найквиста [6, с. 410]:

$$P_{ш} = kT \cdot df, \quad (3)$$

где k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура;

df — полоса частот;

— дробовой шум в полупроводниковых приборах с $p-n$ -переходом возникает на каждом из переходов в результате флуктуаций тока из-за непостоянства числа носителей, проходящих через переход при подаче на него прямого или обратного напряжения;

— избыточные шумы обусловлены поверхностными явлениями в полупроводниковых приборах и имеют шумовую мощность, обратно пропорциональную частоте, поэтому их иногда называют шумами типа $1/f$;

— фоновый тепловой шум ИК-системы, связанный с тем, что, помимо ИК-излучения от исследуемого объекта, в пироэлектрик попадают также излучения от стенок корпуса, от соседних деталей и пр.

С целью уменьшения влияния фонового и теплового шума предварительный прецизионный операционный усилитель, источник стабильного тока и сам пироэлектрический приемник излучения помещаются в экранированный корпус, который термостабилизируется при нижнем значении рабочей температуры пирометра $+15^\circ\text{C}$, что на практике позволяет достичь в 1,3—1,5 раза меньшего уровня фонового и теплового шума, по сравнению с нестабилизированным, в рабочем диапазоне температур $+15 \dots +30^\circ\text{C}$.

Для уменьшения влияния остальных типов шумов, представляющих собой белый шум, в пирометре используется линейная статистическая фильтрация.

Для обеспечения минимальной погрешности измерения применяется опорный источник ИК-излучения — термостат и два световода различного диаметра, передающие две разные мощности ИК-излучения, используемые для привязки по двум уровням излучаемой мощности.

Пирометр выполнен в виде двух разделенных экранированных камер, одна из которых теплоизолирована от внешней среды. В ней находится оптическая часть пирометра. Во второй камере к основа-

нию прикреплена кросс-плата, обеспечивающая связь между электронными модулями пирометра. Модули являются съемными и могут размещаться на кросс-плате в произвольном порядке.

На кросс-плате находятся:

1. Аналоговый модуль обработки сигналов, предназначенный для вычитания из входного сигнала статического уровня, усиления сигнала и его преобразования в 16-разрядный последовательный код.

2. Модуль управления двигателем и синхронизацией, предназначенный для синхронизации работы всех узлов пирометра с выдачей управляющих сигналов на аналоговый модуль обработки сигналов и шаговый электродвигатель, а также обеспечивающий выдачу информационных данных в модуль цифровой обработки сигналов.

3. Модуль цифровой обработки сигналов, предназначенный для управления АЦП аналогового модуля обработки сигналов, предварительной обработки цифровых данных, оптоэлектронной развязки от цепей персонального компьютера (ПК), выдачу цифровых данных в необходимом виде в ПК.

4. Модуль термостата, предназначенного для термостабилизации опорного источника излучения при отклонении температуры не более чем на $0,01^{\circ}\text{C}$.

5. Модуль термостата корпуса, предназначенный для термостабилизации корпуса с отклонением температуры не более чем на $0,1^{\circ}\text{C}$.

Модули 2—5 выполнены на микроконтроллерах AVR фирмы Atmel. Модуль 1 полностью экранирован медным корпусом с толщиной стенки 1 мм.

Принцип работы пирометра следующий:

1. Излучение от исследуемого объекта попадает на линзу 3. Линза фокусирует изображение в плоскости пироэлектрика через диафрагму 6 диаметром 0,8 мм, что обеспечивает высокое геометрическое разрешение.

3. Пироэлектрик 8 преобразует ИК-излучение в электрический сигнал, используя при этом источник тока.

4. Сигнал с пироэлектрика усиливается прецизионным предварительным усилителем 7 в 20 раз и передается по гибкому экранированному кабелю в аналоговый модуль обработки сигналов 19. Амплитуда входного сигнала при этом составляет 5 мВ, а смещение сигнала относительно уровня общего может составлять от -5 до $+5$ В в зависимости от температуры пироэлектрического приемника.

5. Модуль управления двигателем и синхронизацией формирует управляющие импульсы, синхронизирующие все узлы пирометра. Вначале подаются импульсы на шаговый электродвигатель 5, который перемещает пироэлектрик в экранированном корпусе в положение приема опорного ИК-излучения и задерживается там на время установления статического режима пироэлектрика (порядка 400 мс), при котором выходной сигнал соответствует относительно 0-му уровню.

6. Затем модуль управления двигателем и синхронизацией формирует сигнал выборки, поступающий на УВХ 18. Это необходимо для того, чтобы выгнать постоянную составляющую входного сигнала, что и происходит на ОУ 20.

7. Модуль управления двигателем и синхронизацией подает импульсы на шаговый электродвигатель 5, который перемещает пироэлектрик в область приема излучения от исследуемого объекта и останавливается в этом положении на 200 мс.

8. Сигнал с вычитенной постоянной составляющей из ОУ 20 поступает в ОУ 22, где усиливается до амплитуды 10 В, необходимой для работы АЦП 23.

9. АЦП с использованием источника прецизионного опорного напряжения $+5$ В и входного сигнала формирует 16-разрядный последовательный цифровой код под управлением микроконтроллера 36.

10. Микроконтроллер формирует управляющие сигналы для АЦП и принимает из него 16-разрядный цифровой последовательный код, который предварительно обрабатывается, замешивается с синхрокодами и через оптронную развязку 34 передает данные в ПК через интерфейсный приемо-передатчик последовательного порта RS-232 33.

11. Модуль управления двигателем и синхронизацией попеременно чередует режим измерения с режимом калибровки. В режиме калибровки пироэлектрик перемещается от опорного источника ИК-излучения ко второму опорному источнику.

12. Стабилизация температуры опорного источника излучения обеспечивается модулем термостата, построенного на микропроцессорной системе, обеспечивая стабилизацию температуры в пределах $0,01^{\circ}\text{C}$. Абсолютная температура опорного источника излучения выставляется равной $40\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

13. Температурную стабильность корпуса обеспечивает модуль термостата корпуса, построенный по схеме, аналогичной модулю термостата, однако с меньшей стабилизацией температуры, составляющей $0,1^{\circ}\text{C}$. Абсолютная температура стабилизации корпуса выставляется равной $15\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Охлаждение корпуса происходит при помощи последовательно соединенных элементов Пельтье. Так как они потребляют большую мощность (порядка 5 Вт при токе 1 А), для управления ими используется усилитель мощности, совмещенный с импульсным преобразователем напряжения.

При включении пирометра производятся следующие действия:

1. Модуль управления двигателем и синхронизацией производит калибровку положения пироэлектрического приемника при помощи оптопары.

2. Корпусной термостат и термостат опорного источника излучения производят калибровку нагревателя и охладителей (элементов Пельтье), после чего начинается выход термостатов на рабочий режим.

3. Модуль цифровой обработки сигналов контролирует установление режима работы пирометра и посылает соответствующую информацию в персональный компьютер.

4. После выхода на рабочий режим термостатов пирометр переходит в режим измерений.

5. В режиме измерений пирометр проводит такт калибровки по двум значениям опорного излучения, необходимой для корректировки последующего измерения с учетом теплового состояния пироэлектрического приемника излучения.

6. После калибровки производится замер выходного излучения относительно опорного источника излучения.

7. Полученные данные обрабатываются модулем цифровой обработки сигналов и передаются в ПК, где выводятся на экран или сохраняются в файле для дальнейшего анализа.

Построенный по такому принципу пирометр обеспечил получение температурного разрешения в $0,03$ К (уровень шумов, приведенный к выходным данным температуры, составил менее $0,03$ К) при габаритных размерах $180\times 150\times 100$ мм и массе менее 1 кг.

Таким образом, использование в качестве объектива только одной линзы, в качестве модулятора входного излучения — перемещающегося приемника, а также применение термостабилизации оптической части пирометра при пониженной температуре позволяют на 50% повысить температурную разрешающую способность.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кременчутский Л. С., Ройцина О. В. Пироэлектрические приемные устройства.— К.: Наукова думка, 1982.
2. Левитин И. Б. Применение инфракрасной техники в народном хозяйстве.— Л.: Энергоиздат, 1981.
3. Новик В. К., Гаврилова Н. Д., Фельдман Н. Б. Пироэлектрические преобразователи.— М.: Сов. радио, 1979.
4. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением.— М.: Мир, 1975.
5. Латышев Л. Н., Петров В. А., Чеховской В. Я., Шестаков Е. Н. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник.— М.: Энергия, 1974.
6. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС.— М.: Мир, 1985.