

А. В. Яковлев

(Новосибирск)

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ
В ПИРОМЕТРАХ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ**

Рассмотрены особенности применения широкополосных приемников излучения в пирометрах спектрального отношения. Предложено для расчета температуры использовать формулу Планка, позволяющую достичь высокой точности измерений в широком диапазоне температур.

Методы оптической пирометрии основаны на измерении собственного излучения тел и применяются при определении температуры удаленных, высокотемпературных, малоразмерных, движущихся и других объектов, а также для измерений в агрессивных средах.

Пирометры спектрального отношения отличаются от пирометров частичного излучения тем, что измеряют интенсивность излучения объекта в двух (или более) разных участках спектра, а температура определяется из отношения этих интенсивностей.

Формула Планка, выражающая спектральную плотность мощности излучения на единицу длины волны λ при температуре объекта T , имеет вид [1]:

$$b(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \left(\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-12}$ Вт·см², $c_2 = 1,436$ см·град.

Если $\exp(c_2/\lambda T) \gg 1$, формула Планка может быть аппроксимирована формулой Вина

$$b_w(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \left(\exp \frac{c_2}{\lambda T} \right)^{-1}. \quad (2)$$

В общем случае электрический сигнал на выходе фотоприемника выражается формулой

$$S_i(T) = K \int \varepsilon(\lambda, T) b(\lambda, T) s_i(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где K – коэффициент фотоэлектрического преобразования; $\varepsilon(\lambda, T)$ – излучательная способность объекта; $\tau(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптической системы и среды; $s_i(\lambda)$ – спектральная чувствительность i -го фотоприемника. Интегрирование в выражении (3) выполняется по области чувствительности приемника излучения.

В простейшем случае $\varepsilon(\lambda, T) = \text{const} = 1$ (черное тело), $\tau(\lambda) = 1$ (среда и оптика без потерь), отношение сигналов двух фотоприемников

$$R(T) = S_1/S_2 = K_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b(\lambda, T) s_1(\lambda) d\lambda / K_2 \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} b(\lambda, T) s_2(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где λ_1, λ_2 и λ_3, λ_4 – пределы интегрирования для первого и второго приемников соответственно.

При использовании формулы Вина возникает методическая погрешность определения истинной температуры объекта из-за погрешности вычисления плотности мощности излучения:

$$\delta = \frac{b - b_W}{b} = \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right). \quad (5)$$

Для узкополосных приемников излучения ($\Delta\lambda_i/\lambda_i \ll 1$) нетрудно показать, что $\Delta T/T \sim 1\%$, если $\lambda T \ll 2000$ мкм · К [2]. В случае широкополосных фотоприемников погрешность применения приближения Вина может быть оценена только численными методами. Цель данной работы – методом математического моделирования оценить погрешности, возникающие при применении формулы Вина для расчета температуры в пирометрах спектрального отношения, использующих широкополосные приемники излучения.

При моделировании использовались характеристики реального двух-спектрального широкополосного фотоприемного устройства (ФПУ), конструкция которого описана в работе [3]. ФПУ представляет собой кремниевый (Si) и германиевый (Ge) фотодиоды, причем Si-фотодиод помещен перед Ge-фотодиодом и служит для него спектральным фильтром [4].

Спектральная чувствительность ФПУ определена экспериментально. Для этого использовались: монохроматор МДР-23, кварцевая галогенная лампа КГМ-60 и калиброванный измеритель мощности оптического излучения Newport-1815C (приемники 818-UV и 818-IR). Зависимости спектральных чувствительностей от длины волны Si- и Ge-каналов ФПУ, нормированные на максимальные значения, представлены на рис. 1. Отметим, что передний фронт чувствительности Ge-канала формируется чувствительностью Ge-фотодиода и пропусканием Si-диода (выполняющего роль спектрального фильтра). Наличие максимумов и минимумов на спектральной чувствительности Si-канала обусловлено интерференцией света на просветляющем покрытии.

Моделирование проводилось в среде MathLab. Вычислялось выражение (4), где $b(\lambda, T)$ задавалось формулой Планка (1) (или формулой Вина (2)), а в качестве $s_i(\lambda)$ использовались измеренные спектральные чувствительности ФПУ.

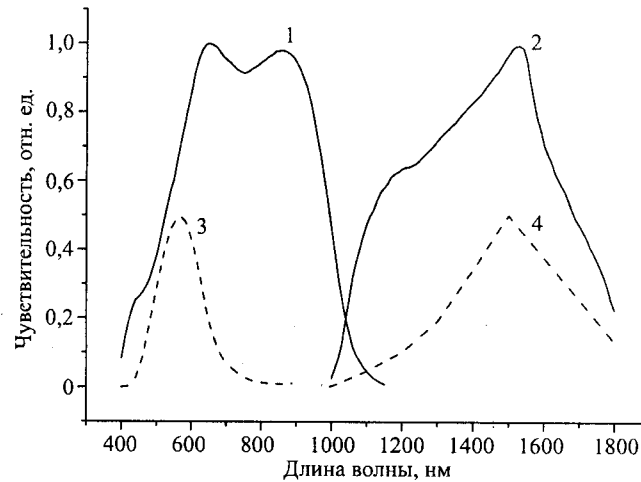


Рис. 1. Спектральные чувствительности Si- и Ge-каналов ФПУ: чувствительность Si-канала (кривая 1), Ge-канала (2), Si-канала с фильтром ЗС-8 (3), Ge-канала с фильтром ЗС-8 (4)

На рис. 2 показаны результаты моделирования в виде относительного отклонения от истинной температуры. Как видно из рисунка, при температурах 800–1500 °С различие между кривыми не превышает 0,5 %. При высоких температурах эти кривые расходятся, причем в разные стороны от истинной температуры. Таким образом, показания пирометра, в котором применяется данное ФПУ и для расчета температуры используется приближение Вина, будут завышаться относительно реальной температуры и при температуре 2000 °С отклонение составит более 3 %.

Важным параметром устройства является также динамический диапазон, необходимый для обеспечения требуемой точности определения темпе-

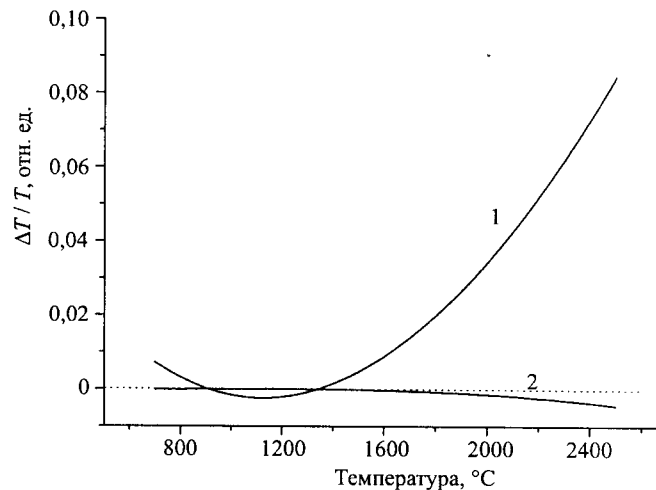


Рис. 2. Отличие измеряемых температур от истинной температуры: результаты вычислений с использованием спектральной чувствительности ФПУ (кривая 1) и узкополосных приемников $\bar{\lambda}_1 = 550$, $\bar{\lambda}_2 = 1500$ нм (кривая 2)

Т а б л и ц а 1

Диапазон температур, °С	Широкополосный ФПУ	Широкополосный ФПУ с фильтром ЗС-8	Узкополосный ФПУ (550 и 1500 нм)
700–1500	$1,1 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$6,6 \cdot 10^6$
700–1800	$4,5 \cdot 10^5$	$9,6 \cdot 10^5$	$5,6 \cdot 10^7$
800–1500	$2,9 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^4$	$6,6 \cdot 10^5$
800–1800	$1,2 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$	$5,6 \cdot 10^6$
800–2000	$2,5 \cdot 10^5$	$6,4 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^7$
800–2200	$4,8 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^7$
800–2500	$1,1 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^8$
900–2500	$3,6 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^7$
1000–3000	$4,0 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^7$

ратуры. Для оценки этого параметра рассчитывалось отношение

$$D = \frac{S(T_{\max}) - S(T_{\min})}{S(T_{\min} + \Delta T) - S(T_{\min})}, \quad (6)$$

где $S(T)$ – выражение (3); T_{\max} и T_{\min} – пределы измерения температуры; ΔT – требуемая точность измерений. Результаты расчетов D для $\Delta T = 1$ °С представлены в табл. 1. Для сравнения приведены результаты расчетов для широкополосного ФПУ с фильтром ЗС-8, обеспечивающим формирование полос в области 550 и 1500 нм (см. рис 1, кривые 3 и 4) и для узких полос $\bar{\lambda}_1 = 550$, $\bar{\lambda}_2 = 1500$ нм ($\Delta\lambda = 10$ нм).

Из табл. 1 видно, что для измерения температуры в широком диапазоне предпочтительнее применять широкополосные приемники, поскольку для них требуется меньший динамический диапазон.

Следует отметить, что при разработке пирометров необходимо учитывать динамический диапазон самого ФПУ. Для эффективного использования имеющегося динамического диапазона ФПУ и обеспечения требуемой точности определения температуры можно применять диафрагму, управление площадью пропускания которой осуществляется с помощью сигнала одного из фотоприемников. Для оценки динамического диапазона, который можно получить в этом случае, требуется вычислить значение

$$D_1 = \frac{R(T_{\max}) - R(T_{\min})}{R(T_{\min} + \Delta T) - R(T_{\min})},$$

где $R(T)$ – выражение (4).

Таблица 2

Диапазон температур, °С	Широкополосный ФПУ	Широкополосный ФПУ с фильтром ЗС-8
700–1500	$2,8 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^3$
700–1800	$5,1 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^4$
800–1500	$1,8 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$
800–1800	$3,3 \cdot 10^3$	$8,2 \cdot 10^3$
800–2000	$4,5 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^4$
800–2200	$5,9 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^4$
800–2500	$8,4 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^4$
900–2500	$5,9 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^4$
1000–3000	$7,0 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^4$

Результаты вычислений D_1 для $\Delta T = 1$ °С приведены в табл. 2. При сравнении табл. 1 и табл. 2 видно, что, благодаря использованию этого метода, требования к динамическому диапазону могут быть существенно снижены.

В классической оптической пирометрии рекомендуется при разработке бихроматических пирометров разносить области их спектральных чувствительностей как можно дальше друг от друга, делать их как можно более узкими и выбирать спектральные полосы приемников таким образом, чтобы они находились на восходящей ветви кривой Планка [5]. Отметим, что эти рекомендации следуют из приближения Вина и нужны только для того, чтобы оно не давало большой погрешности в определении температуры.

В настоящее время вычислительной мощности современных встраиваемых процессоров достаточно для того, чтобы отказаться от использования приближения Вина и перейти к вычислению температуры по более сложной зависимости, используя формулу Планка. Для этого требуется экспериментально или методом математического моделирования определить зависимость температуры от отношения сигналов фотоприемников и обеспечить достаточный динамический диапазон измерения интенсивностей излучения.

В данной работе показано, что пирометр спектрального отношения на базе широкополосного ФПУ может применяться для измерений температур в широком диапазоне. Предложено для расчета температуры использовать формулу Планка, поскольку формула Вина дает большую погрешность. Показано, что для измерения температуры в широком диапазоне с заданной точностью в случае применения широкополосного ФПУ требуется меньший динамический диапазон АЦП.

Автор выражает благодарность В. Д. Анцыгину за помощь в проведении спектральных измерений и обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Поскачей А. А., Чубаров Е. П.** Оптико-электронные системы измерения температуры. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. **Жуков Л. Ф., Богдан А. В.** Исследование и разработка методов многоцветовой оптической термометрии // Инженерно-физический журнал. 2002. 75, № 5. С. 165.
3. **Долганин Ю. Н., Завьялов В. М., Козлов Ю. К. и др.** Пирометр спектрального отношения для измерения истинной температуры углеродистых сталей // Измерит. техника. 1997. № 2. С. 23.
4. **Потатуркин О. И., Чубаков П. А., Яковлев А. В.** Применение совмещенных фотоприемников для дистанционной диагностики высокотемпературных процессов // Автометрия. 2000. № 6. С. 88.
5. **Свет Д. Я.** Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982.

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

*Поступила в редакцию
6 апреля 2004 г.*