

ДАТЧИКИ ДЛЯ ФОТОЭМИССИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2019 г. **К. Н. Каспаров^а, В. Н. Лукьянов^б, О. Г. Пенязьков^{а,*}**

^а *Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Республика Беларусь, 220072, Минск, ул. П. Бровки, 15*

^б *АО “ЦНИИ “Электрон”
Россия, 194223, Санкт-Петербург, просп. Тореза, 68, литер Р*

**e-mail: penyazkovoleg@gmail.com*

Поступила в редакцию 27.12.2018 г.

После доработки 27.12.2018 г.

Принята к публикации 13.01.2019 г.

Приводятся характеристики четырех разных фотоэлектронных умножителей (ф.э.у.), которые могут быть использованы для фотоэмиссионного анализа излучения, в том числе для измерения температуры. По отношению двух откликов фотоэлектронного прибора, соответствующих всему потоку фотоэлектронов из области спектральной чувствительности фотокатода, и по току, ограниченному тормозящим полем или сепарированному по энергиям в поле электростатической линзы, определяется интегральная цветовая температура. Модуляция не светового, а электронного потока с частотой до 1 МГц, позволяет получить временное разрешение измерения температуры 1 мкс. Методическая погрешность, обусловленная излучательной способностью, для большинства материалов в диапазоне температур 1200–3300 К составляет ~0.3%, что намного меньше, чем при измерениях яркостной или цветовой температуры. Инструментальная погрешность зависит от конструкции электронно-оптической системы входной камеры ф.э.у. и схемы регистрации и обработки информации и может составлять 2–6%. Параметр преобразования $(2-15) \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Описанные ф.э.у. могут быть использованы для измерения динамики температуры в быстропротекающих высокотемпературных процессах.

DOI: 10.1134/S0032816219040086

Измерение динамики температуры в быстропротекающих процессах по тепловому излучению требует наличия соответствующего задаче измерительного прибора и решения проблемы определения изменяющейся с температурой излучательной способности. Фотоэмиссионный метод пирометрии по отношению сигналов в двух широкополосных участках, когда более узкий участок спектра излучения полностью входит во всю область спектральной чувствительности датчика, можно отнести к методу интегральной цветовой пирометрии [1, 2]. Модуляция не оптического, а электронного потока фотоэлектронов с частотой 1 МГц позволяет получить временное разрешение 1 мкс. При этом методическая погрешность измеряемой температуры составляет ~0.3%. Датчиком должен быть фотоэлектронный прибор (ф.э.п.) с внешним фотоэффектом. От его характеристик в первую очередь будут зависеть параметры фотоэмиссионного пирометра. В зависимости от спектральной характеристики ф.э.п. диапазон измеряемых температур может составлять 1200–3300 К. От конструкции электронно-

оптической системы (э.о.с.) ф.э.п., в которой должна осуществляться сепарация электронов по энергиям в прикатодном пространстве ф.э.п., будут зависеть параметр преобразования, временное разрешение и интегральная чувствительность.

Цель данной работы — показать какие из доступных современных ф.э.п. могут быть использованы для фотоэмиссионных измерений температуры.

Фотоэмиссионные измерения температуры по спектру излучения нагретого тела основаны на зависимости энергии фотоэлектрона внешнего фотоэффекта от энергии светового кванта. Датчиком в таких измерениях должен быть фотоэлектронный прибор, в котором можно осуществлять разделение фотоэлектронов по энергиям, причем исключать из общего потока фотоэлектронов лишь ту его часть, которая достигает красной границы спектральной характеристики фотокатода (например, в поле тормозящего потенциала), и последовательно регистрировать как первоначальный ток, так и ток, ограниченный тормозящим потенциалом.

Эти измерения легко осуществить, используя фотоэлектронный умножитель. Первый ф.э.у., предназначенный специально для разделения токов от монохроматических световых потоков в тормозящем поле, был изготовлен с боковым входом. Сурьмяно-цезиевый фотокатод был расположен под углом 45° к оси прибора [3]. Диспергирование электронов по энергиям в тормозящем поле осуществлялось в э.о.с. штыревого типа. В диапазоне длин волн 350–600 нм при тормозящем напряжении -1 В нормированные на единицу фототоки уменьшались до 0.775 (350 нм) и до 0.125 (600 нм) от первоначальной величины. Процентное изменение фототока при изменении длины волны на 1 нм, которое характеризует диспергирующие свойства анализатора, составляло 0.3%/нм, что говорило о его высокой эффективности. Однако свет, отраженный от никелевой основы фотокатода, искажал сигнал ф.э.у., соответствующий действительному распределению фотоэлектронов по энергиям.

Этот недостаток ликвидирован в другом ф.э.у., разработанном и изготовленном также специально для фотоэмиссионных измерений. Некоторые типы энергоанализаторов и датчиков на основе этих ф.э.у. описаны в [2]. Собственно датчик, созданный на основе ф.э.у. для фотоэмиссионных измерений, нельзя назвать фотоэлектронным умножителем в его обычном понимании, так как назначение ф.э.у. — собрать на первый динод как можно больше электронов по кратчайшим траекториям независимо от их энергии. Трудно устранимую хроматическую абберацию изображения на коллекторе электронов, обусловленную различными скоростями электронов, стремятся свести к минимуму, тогда как для фотоэмиссионных измерений главное в датчике — это энергоанализатор, обеспечивающий максимальную дисперсию электронов с последующим усилением тока в умножительной динодной системе.

При измерении температуры фотоэмиссионным методом датчиком является ф.э.п. с внешним фотоэффектом, в котором можно измерять изменение распределения фотоэлектронов по энергии в соответствии с изменением спектрального состава излучения нагретого тела. В отличие от других видов оптической пирометрии (яркостной, цветовой), где измеренный сигнал фотодатчика обрабатывается с учетом длин волн для получения значений температуры, в фотоэмиссионном методе информация о температуре заключается уже в отклике ф.э.п.. Это один из методов интегральной цветовой пирометрии [1]. Для этого ф.э.п. должен быть не только детектором излучения, но и энергоанализатором фотоэлектронов.

К сожалению, таких приборов не существует. Однако некоторые из современных ф.э.п., главным образом фотоэлектронные умножители, мо-

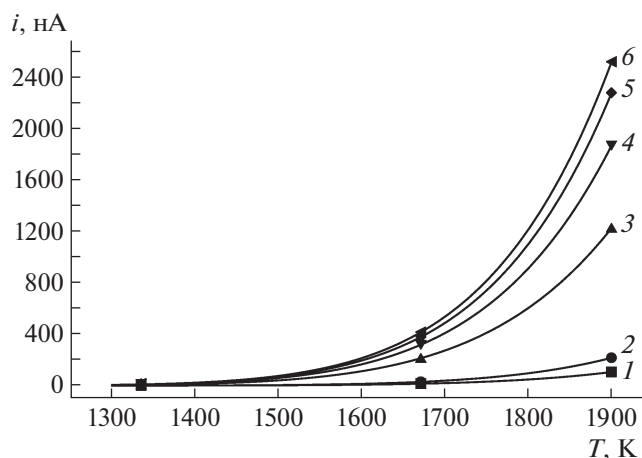


Рис. 1. Зависимости тока ФЭУ-186Э № 46, полученные при разных режимах питания электродов входной камеры для трех значений температур (1335, 1671 и 1900 К): 1 — при начальном напряжении на модуляторе $U_M = 0$ и модуляции напряжением 15 В; 2 — при смещении на модуляторе 0.5 В; 3–6 — при смещении на модуляторе 0.5 В и модуляции напряжением 5.5 В (3), 10.5 В (4), 15.5 В (5) и 20.5 В (6).

гут быть использованы в качестве датчиков-анализаторов распределения фотоэлектронов по энергиям. Мы приводим характеристики ряда некоторых ф.э.п. с различными конструкциями э.о.с., которые пригодны для фотоэмиссионного анализа оптического излучения. Такие ф.э.у. должны иметь между фотокатодом и первым динодом по крайней мере один свободный электрод, который может быть использован для анализа фотоэлектронов в тормозящем поле при подаче на него модулирующего напряжения, например прямоугольных импульсов (меандр) с амплитудой от 0 до $-0.5 \dots -1.0$ В. Первый фотоэмиссионный пирометр для измерения температуры микрообъектов был создан на основе ФЭУ-117 [4].

В большинстве современных ф.э.у. используют микроканальные пластины, расположенные вблизи фотокатода. Поэтому в них нет фокусирующих электродов, которые можно было бы использовать для управления электронным потоком. Ф.э.у. R3998-02 Hamamatsu с дискретными динодами и выведенным на цоколь модулятором при паспортном включении начинает запираяться при напряжении около -10 В. Изменение схемы питания позволяет снизить это напряжение до -3 В, но при этом уменьшается интегральная чувствительность ф.э.у. [2].

Другой способ — диспергирование фотоэлектронов в поле электростатической линзы. Для этого между фотокатодом и первым динодом должны быть установлены, по крайней мере, два управляющих электрода, из которых можно было бы сформировать электростатическую линзу, об-

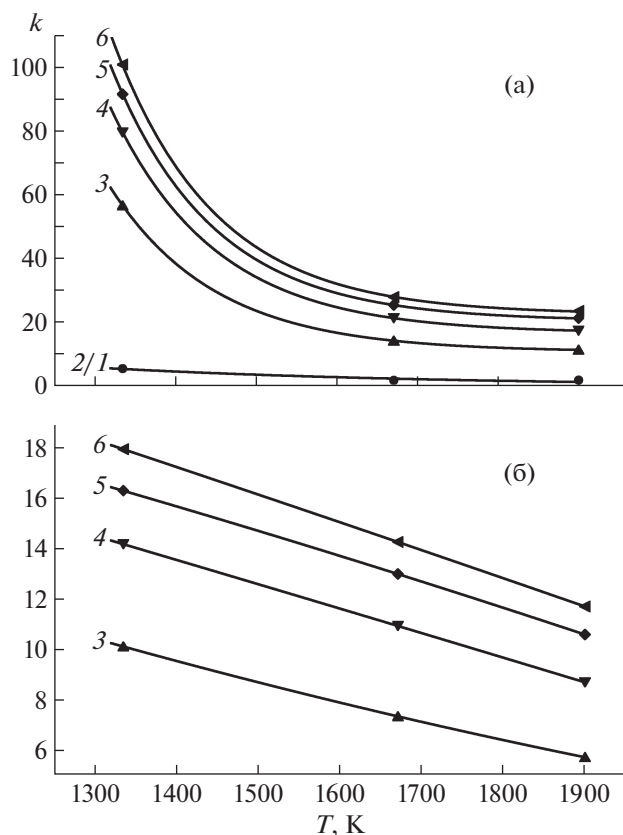


Рис. 2. Градуировочные кривые ФЭУ-186Э № 46 (при температуре $T = 1335, 1671$ и 1900 К): **а** – при $U_{m0} = 0$ и напряжении модуляции 0.5 В ($2/1$), 5.5 В (3), 10.5 В (4), 15.5 В (5) и 20.5 В (6); **б** – при $U_{m0} = 0.5$ В и напряжении модуляции 5.5 В (3), 10.5 В (4), 15.5 В (5) и 20.5 В (6).

ладающую высокими диспергирующими свойствами [5]. Этим требованиям удовлетворяет выпускаемый в настоящее время промышленностью ФЭУ-186, точный аналог выпускавшегося ранее ФЭУ-175. В нем имеются два кольцевых электрода $\varnothing 4$ мм, установленных между модулятором и первым динодом. Если их закрыть сетками с размером ячеек $\sim 0.1\text{--}0.2$ мм, то сформированная из модулятора и этих двух сеток электростатическая линза позволяет создавать модулированный положительным относительно фотокатода напряжением $10\text{--}15$ В анодный ток i_a , в $30\text{--}90$ раз превосходящий первоначальный немодулированный ток i_{a0} , когда напряжение на модуляторе U_m равно нулю.

Однако в этом случае, вследствие очень маленьких значений тока i_{a0} (единицы наноампер), велики погрешности его измерения, что отражается на точности измерения температуры, так как функцией температуры является коэффициент модуляции $k(T) = i_a/i_{a0}$. Начальный ток можно увеличить, задав на модуляторе небольшое положи-

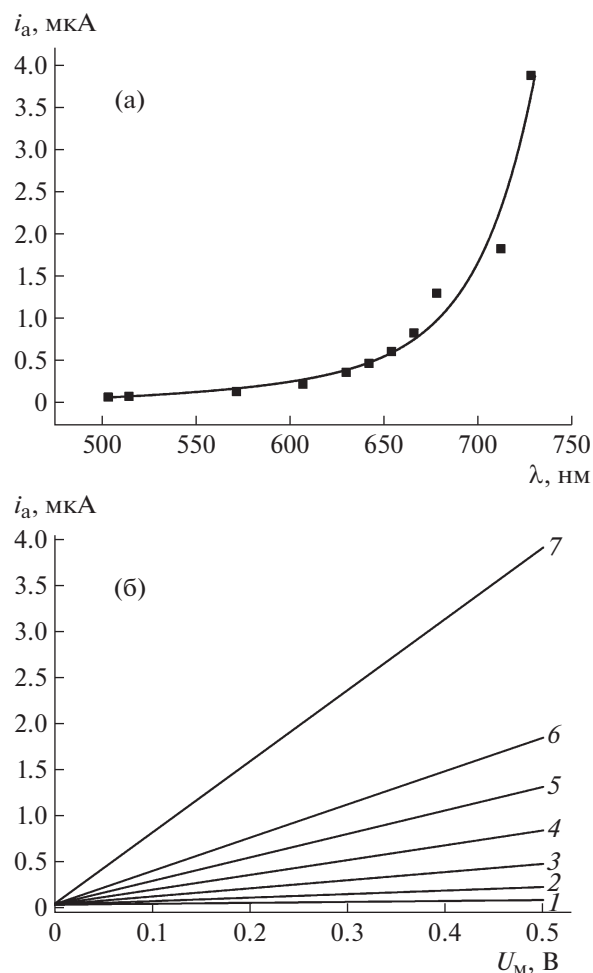


Рис. 3. Зависимости анодного тока ФЭУ-187: **а** – от длины волны при освещении его монохроматическим излучением, **б** – при постоянном напряжении на втором электроде $U_{d2} = +0.5$ В для различных длин волн ($1 - 515$ нм, $2 - 607$ нм, $3 - 642$ нм, $4 - 666$ нм, $5 - 678$ нм, $6 - 712$ нм, $7 - 728$ нм) при модуляции импульсами 0.5 В и постоянном значении начального тока i_{a0} .

тельное смещение $\sim 0.3\text{--}0.5$ В. Этого достаточно, чтобы незначительно увеличив скорости электронов, увеличить их поток на первый динод в $2\text{--}5$ раз, а затем модулировать его напряжениями $5\text{--}10$ В и более.

На рис. 1 приведены токи ФЭУ-186Э, полученные при разных режимах питания электродов э.о.с. входной камеры для трех значений температур: $1335, 1671$ и 1900 К.

Коэффициенты модуляции, вычисленные по этим токам, приведены на рис. 2 при $U_{m0} = 0$ (рис. 2а) и 0.5 В (рис. 2б). Так как кривые 1 и 2 на рис. 1 очень близки, то на рис. 2а они приведены в виде единой кривой $2/1$.

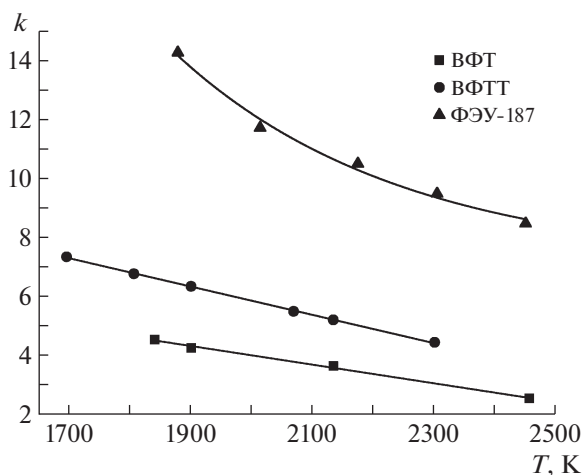


Рис. 4. Градуировочные кривые для ф.э.у. различных типов.

Подача небольшого положительного смещения представляется наиболее рациональным решением.

Следует обратить внимание, что уменьшение коэффициента модуляции с 60–100 до 10–20 (в зависимости от смещения, поданного на модулятор) не уменьшает достоинств такого способа анализа. Важнее то, что увеличение начального тока сказывается на точности измерения температуры, так как она определяется точностью измерения коэффициента модуляции $k(T) = U_0/U_m$, где U_0 и U_m – это верхний и нижний уровни промодулированного сигнала. Погрешность измерения коэффициента k (среднеквадратичная погрешность) определяется суммой частных производных этого отношения:

$$\sigma_k^2 = \sigma_{U_0}^2/U_m^2 + (U_0/U_m)^2 \sigma_{U_m}^2.$$

Отсюда можно оценить, насколько сильно увеличение нижнего уровня сигнала уменьшает погрешность измерения k .

Погрешность измерения температуры определяется отношением σ_k к параметру преобразования l_T :

$$\Delta T = \sigma_k/l_T,$$

где $l_T = (k_1 - k_2)/(T_1 - T_2)$. Разность коэффициентов модуляции определяется как среднее значение в соответствующем интервале температур. Мгновенное значение k в определенной точке

градуировочной кривой – dk/dT . При напряжении модуляции +5.5 В коэффициент модуляции, т.е. практически модулированный анодный ток, изменяется в названном диапазоне температур в 5 раз при $U_{m0} = 0$ и в 2 раза при $U_{m0} = 0.5$ В. Этот ф.э.у. также может работать в режиме торможения фотоэлектронов начальных энергий при отрицательном напряжении модулятора.

Фотоумножитель ФЭУ-187 также пригоден для фотоэмиссионных измерений температуры. От обычных ф.э.у. он отличается тем, что его диноды представляют собой сетки. Расстояние первой сетки от фотокатода, а также сеток между собой одинаково и составляет 0.8 мм. Преимущество этого умножителя в том, что вследствие большой прозрачности и малой поверхности сетчатая конструкция динодов практически препятствует появлению обратного тока на фотокатод и неуправляемого тока с первого динода.

Режим спектрального анализа фотоэлектронов в поле электростатической линзы создается 1-м, 2-м и 3-м электродами. Коллектором электронов является 4-й динод. О зависимости анодного тока от спектрального состава излучения можно судить по кривым, приведенным на рис. 3, которые были получены при облучении ф.э.у. монохроматическим излучением. Усиление тока зависит от спектрального состава излучения: сильнее усиливается фототок, вызванный длинноволновым излучением (рис. 3б).

Особенность электронно-оптической системы этого ф.э.у. потребовала подбора напряжений питания на его первых электродах. Наиболее оптимальным оказался режим: $U_{d1} = 4$ В, $U_{d3} = 0.5$ В, $U_{d4} = 94$ В при анодном напряжении 1100 В. Модуляция осуществлялась по 2-му диноду напряжением U_{d2} от 0 до 0.5 В. Начальный ток устанавливался равным 0.05 мкА регулировкой светового потока. Процентное изменение фототока в спектральном интервале 515–728 нм составило ~0.46%/нм. Температурный параметр преобразования $l_T = 10^{-2}$ нм⁻¹.

При $U_{d2} = 0$ и $U_{d1} = 4$ В ускоренные фотоэлектроны не могут преодолеть барьер в $U_{d2} = 0$ В на 2-м электроде. Но уже при напряжении $U_{d2} = 0.5$ В фотоэлектроны, движущиеся в эквипотенциальном поле 1-го, 2-го и 3-го динодов, достигают 4-го динода с напряжением $U_{d4} = 94$ В. Градуировка была получена при ослаблении светового

Таблица 1. Параметры преобразования ф.э.п. различных типов

Параметры	ФЭУ-187	ФЭУ-186Э	ВФТ	ВФТТ
$l_T, 10^{-3} \text{ К}^{-1}$	2.1	15	3.25	4.8
$T_1 - T_2 [\text{К}]$	1663–2440	1840–2825	1840–2440	1696–2299

потока нейтральным светофильтром с пропусканием 2.7%.

Этот ф.э.у. может работать также в режиме торможения электронов первой сеткой, чему способствует близость ее к фотокатоду. Результаты подобны приведенным выше.

Недостатками этих датчиков при использовании их для фотоэмиссионного измерения температуры являются малое значение максимального анодного тока (1 мкА), а также то, что бищелочной фотокатод ФЭУ-187 не позволяет измерять низкие температуры. В этом отношении лучше использовать ф.э.у. с жалюзийными динодами, например ФЭУ-114, который в настоящее время, к сожалению, не производится.

Для фотоэмиссионных измерений температуры можно использовать также два других ф.э.п. — вакуумный фототриод ВФТ и вакуумный фототетрод ВФТТ, хотя, в принципе, они предназначены для иных целей. В соответствии с их названиями они являются полными аналогами их ламповых прототипов и содержат, соответственно, одну и две сетки между катодом и анодом. Применительно к фотоэмиссионным измерениям температуры главное их преимущество состоит в том, что они работают при анодном напряжении 5 В и имеют к тому же малые размеры (ВФТТ — $\varnothing 21 \times 43$ мм), что позволяет использовать их для создания малогабаритных и компактных измерительных приборов.

Оптимальное тормозящее напряжение на сетке для ВФТ равно -4 В, для ВФТТ в тех же условиях при управлении двумя спаренными сетками составляет -0.3 В. Начальный анодный ток в обоих случаях устанавливался равным 0.1 мкА. Как и при работе с фотоэлементами и фотодиодами, слабые токи следует усиливать внешними усилителями.

На рис. 4 приведены градуировочные кривые $k(T)$ для ф.э.п. указанных типов, а в табл. 1 — их

параметры преобразования в соответствующих температурных границах.

Все описанные ф.э.п. изготавливаются на предприятии АО “ЦНИИ “Электрон” (С.-Петербург).

Недостатком этих ф.э.у. является то, что используемые в них в качестве анода электроды в действительности являются непролетными сурьмяно-цезиевыми динодами, находящимися под высоким напряжением. Если сделать их просто из никелевых пластин, то исчезнет встречный ток с них на фотокатод, что увеличит его примерно в 2 раза.

В заключение отметим, что все четыре описанных выше фотоэлектронных прибора с совершенно различными конструкциями прилегающей к фотокатоду электронно-оптической системы позволяют использовать эту систему в качестве энергоанализатора электронов, работающего как в режиме торможения электронов, так и в режиме их предварительного ускорения в поле линзы.

Судя по результатам приведенных исследований, для создания фотоэмиссионного пирометра наиболее подходящим может быть фототетрод ВФТТ с внешним усилителем, который характеризуется низким напряжением питания, малыми размерами, линейной градуировочной характеристикой и удовлетворительными значениями параметра преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснов К.В., Осипов Г.И., Ростовцева В.В. // Измер. техника. 1987. № 3. С. 10.
2. Каспаров К.Н. Фотоэмиссионная пирометрия. Минск: Беларуская навука, 2018.
3. Авдеев В.Н., Каспаров К.Н., Морозов Г.А., Старовойтова В.Н. // Вести АН БССР. Сер. физ.-техн. 1966. № 1. С. 119.
4. Каспаров К.Н., Терпиловский А.И. // ПТЭ. 1981. № 1. С. 198.
5. Козлов И.Г. Современные проблемы электронной спектроскопии. М.: Атомиздат, 1978. С. 34–65.