

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СПЕКТРОКОМПАРАТОР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ.

Матвеев М.С., Походун А. И., Сильд Ю.А., Фуксов В.М., Цорин В.Г., [Никитин Ю.В.]
ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д.И. Менделеева"
(ВНИИМ), Санкт-Петербург

1. Введение

Со времени создания спектрокомпаратора Государственного первичного эталона прошло более 30 лет [1, 2]. За прошедшее время было создано много новых средств измерений (СИ), приборов и технологий, позволяющих на современной элементной базе осуществить процесс передачи размера единицы температуры с высоким качеством – точностью, достоверностью, автоматическим управлением, регистрацией и математической обработкой экспериментальных результатов. При этом есть возможность сократить трудоемкость процесса измерений, уменьшить расход ресурса работы эталонных мер – температурных ламп, обеспечить лучшую оценку влияния различных вспомогательных факторов на результат измерений.

Основным недостатком существующей схемы является модулятор – зеркало, колеблющееся с высокой частотой. Именно этот элемент препятствует дальнейшему развитию процедуры сравнения по точности и стабильности, стабильность его характеристик не поддается контролю; методики исключения дрейфа, зависимости от окружающих условий приводят к значительному увеличению времени процедуры измерений, что в свою очередь ведет к неоправданному расходованию ресурса вторичных эталонов (температурных ламп). В то же время основное преимущество процедуры сравнения – одновременность измерения – оказывается не востребуемым для передачи размера единицы температуры от излучателей типа "абсолютно черное тело (АЧТ) к температурным лампам (разных метрологических уровней: эталоны-копии, рабочие эталоны, образцовые) и с ламп на лампы из-за априорного требования высокой долговременной стабильности эталонных ламп.

Новая схема представляет собой одноканальный (по оптическому пути) спектральный (выделяется узкий участок спектра) радиометрический (выходной сигнал фотоприемника пропорционален мощности излучения источника) компаратор, в котором используется метод замещения, не нуждающийся в модуляторе. Основным преимуществом новой схемы является возможность поэлементного исследования и обновления установки - замещение слабых участков измерительной схемы на более совершенные аналоги, не нарушая общей целостности установки и повышая, таким образом, точность и эргономику измерений.

Вместо стабилизаторов напряжения для питания ламп были разработаны и применены более рациональные и удобные источники питания - стабилизаторы тока. Это обеспечило существенно лучшую стабильность электрической мощности питания, слабо чувствительную к изменению переходных сопротивлений в промежуточных контактах электрической силовой цепи питания температурных ламп.

Электроизмерительные приборы, используемые в новой схеме, являются современными прецизионными цифровыми приборами со средствами подключения к персональному компьютеру по интерфейсу КОП (GPIB, IEEE488).

Для сбора и обработки, поступающих в компьютер данных, написана специальная программа, позволяющая, практически, одновременно регистрировать значения тока, напряжения, сигнал с фотоприемника, температуру цоколя лампы, а также температуры воздуха в помещении, воды и масла в термостатах, стабилизирующих, соответственно, температуры цоколей и электрических мер сопротивления, которые используются для прецизионного измерения тока в цепях сравниваемых температурных ламп. В реальном масштабе времени также рассчитываются: сопротивление ленты лампы, значения температур по введенному интерполяционному уравнению, поправки, которые следует вносить в результат измерений, оцениваются параметры рассеяния измеряемых значений. Все эти данные представляются на одном экране сопротивления лампы. Отпала необходимость записи в журнал и ручного ввода в компьютер всех наблюдений для обработки. Кроме того, система сбора информации дополнена связью со вторым ПК через последовательный порт, что позволило строить графики измеряемых величин в реальном времени (в первую очередь - сигнала фотоприемника). Это дополнение в значительной мере облегчает работу при реализации фазовых переходов реперных точек.

2. Описание спектрокомпаратора

Возможности измерительной системы.

Новый фотоэлектрический компаратор способен выполнять все основные задачи метрологического обеспечения по передаче размера единицы температуры: передачу значения температуры с излучателя - модели "абсолютно черное тело" (АЧТ) на лампу, с одной лампы на другую, построение температурной шкалы методом экстраполяции, обеспечивает возможности поэлементного исследования всех влияющих факторов на точность передачи размера единицы и реализации температурной шкалы.

Блок-схема спектрокомпаратора, иллюстрирующая состав установки, приведена на рис.1.

Установка позволяет, помимо непосредственных задач, проводить множество различных исследований. К ним относится исследование влияния поляризации излучения на

результаты измерений, оценка нелинейности и нестабильности фотодиода, оценка влияния вспомогательных факторов: температуры цоколя лампы и окружающей среды; исследование стабильности источников питания ламп и самих ламп, исследование эффекта размера источника и влияния длины волны на результат исследования, построение температурной шкалы методом удвоения яркостей.

Использование зеркальных объективов вместо линзовых позволяет проводить измерения в различных длинах волн без дополнительной юстировки оптической системы, а монохроматор позволяет выделять узкий участок спектра с любой длиной волны в диапазоне от 200 нм до 1200 нм с дискретностью 0,1 нм. Высокая линейность используемого фотодиода позволяет проводить экстраполяцию температурной шкалы без дополнительных источников излучения. В пределах температур от 800 до 1750 °С измерения можно производить без дополнительных светофильтров; при использовании ослабляющих светофильтров верхний предел измерений температуры, практически, неограничен. Ограничения обуславливаются только наличием источников излучения с заданной температурой, способных поддерживать стабильный уровень температуры, по крайней мере, в течение времени, достаточного для ее измерения и передачи нижестоящему по поверочной схеме СИ [4]. Порог чувствительности составляет $(0,02 \div 0,05)$ К для всей области спектра.

Алгоритм передачи размера единицы температуры на новом фотоэлектрическом компараторе.

Фотоэлектрический компаратор представляет собой совокупность измерительных приборов и оптической схемы и создан для передачи размера единицы температуры от первичного эталона к эталону-копии и к рабочим эталонам.

Оптическая схема приведена на рис.2

Принципиально, оптическую схему можно описать следующим образом.

Световой поток от источника излучения (излучатель АЧТ, температурная лампа) направляется поворотным зеркалом (Пов.3) на фокусирующее сферическое зеркало (зерк1), которое направляет поток излучения через ирисовую диафрагму (12) на сферическое зеркало (зерк2). С него поток излучения поступает к входной щели двойного монохроматора МДР-6, настроенного по схеме вычитания дисперсий, за которым расположен фотоприемник. Для контроля точности выставления лампы и излучателя имеются две видеокамеры (TV1, TV2) и оптический микроскоп (линзы О1 и О3). Лампы Л3, Л4 и полупрозрачное зеркало (5) образуют *экстраполятор*, служащий для удвоения яркости лампы Л2 при нанесении температурной шкалы на лампу. В конструкции компаратора предусмотрена система ограничительных

диафрагм 14, выполненных в виде расположенных на цилиндрической поверхности бленд, предназначенных для ограничения доступа в монохроматор постороннего рассеянного света.

Температурная шкала строится на ленточных вольфрамовых лампах, называемых температурными лампами, от реперных точек шкалы (точек затвердевания золота, меди и серебра). Каждому значению температуры присваивается соответствующее значение силы тока питания вольфрамовой ленты лампы. По полученным точкам строится интерполирующая функция зависимости силы тока от температуры, представляющая собой полином третьей или четвертой степени. Передача размера единицы происходит методом уравнивания яркости лампы и яркости излучателя АЧТ в момент фазового перехода. На компараторе существует два способа сравнивать яркости источников излучения: с помощью поворачивающегося зеркала и с помощью перемещения самих сравниваемых источников. Причем, в первом случае необходимо учитывать неодинаковость восприятия излучения приемной системой (сам фотодиод + монохроматор + зеркальная фокусирующая система + поворачивающееся зеркало), возникающей из-за различия отражения в зависимости от угла поляризации и других неконтролируемых оптических явлений, изменяющихся при различных оптических путях. Во втором случае оптические пути полностью совпадают.

В электрическую часть установки входят приемно-усилительные элементы, источники питания, измерительные приборы и другие устройства.

Цепи питания ламп включают в себя источники постоянного тока, образцовые меры электросопротивления и токоизмерительные шунты со стрелочными амперметрами. Значения силы тока в цепи определяются по падению напряжения на образцовых мерах сопротивления с помощью коммутатора и цифрового мультиметра Keithley 2700, напряжение на цоколях ламп измеряется цифровым вольтметром В7-39. Точность поддержания постоянного тока в цепи питания лампы равна 0,2 - 0,5 мА.

Электрическое питание 3х-секционной печи излучателя АЧТ осуществляется через специализированный блок управления с использованием ПИД-регуляторов мощности типа «Поликон 813» и «Поликон 611». Контроль температуры печи осуществляется тремя находящимися непосредственно под тиглем термопарами, которые являются датчиками для соответствующих регуляторов, в свою очередь связанных с обмотками нагревателя печи.

Цепь измерения яркости включает фотодиод Hamamatsu S6204-01SPL со встроенным усилителем и системой охлаждения на основе полупроводникового микрохолодильника (элемент Пельтье), управляющегося контроллером температуры Hamamatsu C1103-04, и цифровой мультиметр Agilent HP 34401. Для подавления шумов перед мультиметром

дополнительно устанавливается фильтр низкой частоты; при этом шумы уменьшаются на порядок, но значительно возрастает инерционность измерительной части.

К дополнительному электрооборудованию относятся:

- Поворотное зеркало с шаговым двигателем и блоком питания, управляемое компьютером и позволяющее совмещать оптическую ось спектрокомпаратора с центром ленты каждой из 4-х температурных ламп, а также – с центром излучающего отверстия модели АЧТ;

- Водяной и масляный термостаты с регуляторами «Поликон 811», обеспечивающими поддержание постоянной температуры цоколей ламп и образцовых мер электросопротивления соответственно;

- Электромеханические заслонки для ламп и печи (5 штук), управляющихся с пульта оператора. Во время измерений заслонки закрываются на всех лампах, кроме измеряемой в данный момент, во избежание паразитного влияния их излучения. Заслонки 3-й и 4-й лампы используются также при экстраполяции.

- Устройства измерения температуры, состоящие из полупроводниковых термометров сопротивления, преобразователей сопротивления термометров в частоту и блока питания преобразователя. Значение частоты компьютером программно преобразуется в значение температуры.

- Гелий-неоновый лазер ОКГ-13 (на рис.2 ОКГ) с блоком питания для юстировки оптической системы и подсветки АЧТ.

- Нормальный элемент, для периодического контроля измерительных приборов.

- 2 видеокамеры типа АСЕ-360Е с блоком питания, монитором и переключателем, для контроля положения ленты лампы или излучателя АЧТ во время измерения и наблюдения за правильностью юстировки.

Точность передачи значения температуры зависит от стабильности тока питания, точности вольтметров, уровня шумов в электрической цепи, точности выставления ламп и излучателя АЧТ, долговременной стабильности фотодиода и вспомогательных параметров, способных влиять на выходной сигнал. Для уменьшения влияния вспомогательных параметров используются следующие процедуры: стабилизация температуры цоколей ламп, кристалла фотодиода, помещения, в котором находится спектрокомпаратор, светоизоляция измеряемого объекта от внешних засветок, термостатирование образцовых мер электросопротивления.

Все температуры измеряются полупроводниковыми терморезисторами типа СТ4-16А с номинальным значением сопротивления 10 кОм, откалиброванными на калибраторе температуры DB-35L.

Недостатки используемой схемы

Нельзя не отметить ряд недостатков новой измерительной системы. Первый из них относится непосредственно к методу: время измерения в некоторой мере увеличилось по сравнению с измерениями на установке, использующей метод сравнения, из-за того, что приемник позиционируется на источники излучения попеременно. Также следует отметить недостаточную виброустойчивость установки, обусловленной значительной длиной оптического пути (около 5,5 метров) от источника до приемника излучения, что представляет ощутимую проблему и вызывает дополнительные трудности в процессе работы.

Исследование компаратора.

С целью определения и, по возможности, исключения или дальнейшей минимизации составляющих погрешности измерения при передаче размера единицы температуры и построения температурной шкалы исследование характеристик спектрокомпаратора проводилось, имея в виду источники погрешности, связанные с передачей размера единицы при помощи компаратора, которые обычно выделяют в исследовательской практике. Классификация составляющих общего бюджета погрешности (по международной терминологии – бюджет неопределенности) была разработана в Консультативном комитете по термометрии Международного комитета мер и весов [5]. В процессе оценки составляющих погрешности были определены значения для обычной (типовой) аппаратуры, которая реализована в большинстве метрологических лабораторий, занимающихся воспроизведением и передачей размера единицы температуры, и значения предельно достижимые на современном уровне технологических знаний. Таблица 1 в сокращенном виде иллюстрирует значения составляющих погрешности, присущих описываемому спектрокомпаратору.

Таблица 1. Бюджет погрешности спектрокомпаратора по [5]

Компонента X_i	Тип ⁽¹⁾	Составляющая погрешности $u(x_i)$		Вклад в суммарную погрешность $u_i(y)$, мК			
				При $T_{репера}$		При 3000 К	
		Обычн. зн-е	Лучшее зн-е	Обычн. зн-е	Лучшее зн-е	Обычн. зн-е	Лучшее зн-е
Изменение длины волны ⁽²⁾ , нм	В	0.08	0.03	0	0	464	166
Рассеяние, поляризация, нм	В	0.0009	0.0006	0	0	5	3
Внеполосовое пропускание, нм	В	0.015	0.002	0	0	86	11
Эффект размера излучателя	В	0.0005	3×10^{-5}	44	3	220	13
Нелинейность ⁽³⁾	В	0.0003	5×10^{-5}	0	0	1610	268
Дрейф	В	0.0022	0.00011	181	9	909	45
Отношение сигналов	В	0.0005	0.0001	40	8	203	41
Интерполяция полиномом, мК	В	50	10	50	10	100	30
Позиционирование	В	0.001	0.0002	81	16	283	56

Окружающие условия	A	0.0003	2×10^{-5}	24	2	122	8
Сходимость	A	0.0001	3×10^{-5}	11	2	58	11

Примечания:

- (1) В зарубежной литературе погрешности (неопределенности) делятся на два типа: тип А – соответствующий в отечественной классификации случайной погрешности, и тип В – соответствующий систематической погрешности
- (2) Для приборов на базе монохроматора
- (3) Для числа шагов удвоения $N = 13.2$

Новый компаратор позволяет проводить исследование источников неопределенностей по отдельности, при постоянных прочих условиях.

Погрешность длины волны, внеполосовое пропускание и дрейф пропускания фильтрового элемента (каковым является монохроматор) – составляющие погрешности, относящиеся к монохроматору. В исследовании этих составляющих большую роль играет выбор рабочей длины волны 656,3 нм, которая соответствует одной из линий излучения водорода в газовом разряде низкого давления, спектральная ширина которой весьма мала. Поэтому, найдя максимум излучения от такого газоразрядного источника, можно с большой точностью определить истинное значение длины волны. Значение этой составляющей погрешности, таким образом, снижается, практически, до нуля. Дрейф пропускания монохроматора исследуется аналогичным способом, и составляющая погрешности, связанная с ним, по нашим оценкам составляет в пределах $0 \div 0,01$ К на всем рабочем диапазоне.

Пропускание вне полосы также связано с монохроматором. Используемый двойной монохроматор со схемой вычитания дисперсий обеспечивает уровень рассеянного света при обратной линейной дисперсии 4,3 нм/мм не более $10^{-3} \div 10^{-4} \%$. При этом вклад в суммарную погрешность составляет не более 0,02 К.

Поляризация связана в основном с различными углами падения/отражения на поворотное зеркало, и, как было указано выше, может быть исследована и исключена благодаря перемещению платформы с источниками. Эти исследования были освещены в работе [6].

Интерполяция и нелинейность сигнала имеют значение при использовании фотодиода как средство измерения, например, при нанесении градуировки на лампу экстраполяцией без вспомогательной лампы 4. В ином случае, при использовании фотодиода только как средство сравнения, эти составляющие отсутствуют. Исследование нелинейности фотодиода проводилось с помощью экстраполятора: на лампах поочередно устанавливаются одинаковые по яркости сигналы, а затем измеряется суммарный сигнал. Отличие от 2х отношения значений напряжения на фотодиоде при начальном и удвоенном сигнале и составляет степень нелинейности. У фотодиода Hamamatsu S6204-01SPL, используемого в установке, значение нелинейности

составило 0,04% до напряжения сигнала равного 4 В. Это дает оценку погрешности от нелинейности сигнала 0,045 К

Эффект размера источника обуславливается неидеальностью элементов оптической системы, наличием пыли и рассеянием излучения на конструктивных узлах установки. Он вызывает дополнительный прирост сигнала от больших излучающих поверхностей. В нашем случае этот эффект мал, поскольку различие в размерах поверхностей излучателя АЧТ и лампы невелико. Экспериментальное подтверждение было получено при измерениях методом изменяющейся (ирисовой) диафрагмы, которая расположена в месте фокусировки промежуточного изображения. По нашей оценке погрешность от эффекта размера источника находится в пределах 0,02 – 0,03 К.

Дрейф сигнала между калибровками контролируется периодическим измерением сигнала с источника, обладающего высокой стабильностью (лампа СИ10-300 №14, постоянно и неподвижно находящаяся на позиции 1). При использовании фотодиода только как средства индикации равенства сигналов, на результаты измерений влияет только краткосрочный дрейф, который вполне можно объединить со сходимостью результатов.

Изменение окружающих условий (температуры воздуха) контролируется термометром сопротивления одновременно с проведением измерений. При проведении серии одинаковых измерений при различных температурах воздуха в помещении можно определить степень влияния этого параметра на результат измерений. Составляющая погрешности, связанная с этим параметром составляет $0,01 \div 0,05$ К в рабочем диапазоне спектрокомпаратора.

Сходимость является составляющей случайной погрешности и определяется через среднеквадратичное отклонение серии наблюдений. Её значение оценивается в 0,02%.

Суммарную погрешность передачи размера единицы температуры можно рассчитать путем квадратичного суммирования составляющих, приведенных в таблице 2, по формуле:

$$S_{\Sigma} = k \cdot \sqrt{S^2 + \frac{1}{3} \cdot (\sum_{i=1}^{14} \theta_i^2)}, \quad (1)$$

Таблица 2. Оценка бюджета погрешности одноканального спектрокомпаратора

Составляющая погрешности	Источник составляющей	Значение, К
Спектральная погрешность	Погрешность длины волны	0.01
	Рассеяние, поляризация	0.02
	Дрейф пропускания монохроматора	0.005
	Пропускание вне полосы монохроматора	0.02
	Интерполяция сигнала	0.005

Погрешность сигнала фотодиода	Эффект размера источника	0.025
	Нелинейность сигнала	0.045
	Дрейф сигнала между калибровками	-
	Изменение окружающих условий	0.03
	Сходимость	0.02
Суммарная погрешность (S_{ϵ}) для $k=1$		0,05
Доверительная погрешность для доверительной вероятности 0,99 ($k=2$)		0,09

Заключение

Создан и исследован спектрокомпаратор, предназначенный для эталонных работ по передаче размера единицы температуры от первичного эталона к эталону-копии, а также для построения температурной шкалы оптическим методом. Проведены исследования его метрологических характеристик. Сделана оценка составляющих бюджета погрешности, по результатам расчета которого можно сделать вывод о том, что описываемый прибор вполне может заменить компаратор, используемый в настоящее время в Государственном первичном эталоне единицы температуры, с лучшими метрологическими характеристиками по диапазону, точности, воспроизводимости и существенно лучшими эргономическими свойствами.

Литература:

1. Киренков И.И., Крахмальникова Г.А. Спектропирометрическая установка для построения температурной шкалы фотоэлектрическим методом. Сб. трудов ВНИИМ. Исследования в области тепловых измерений, вып. 7 (131). 1963.М.-Л. Стандартгиз.
2. Киренков И.И., Крахмальникова Г.А. Государственный первичный эталон единицы температуры – кельвина в диапазоне 1337...2800 К, Измерительная техника, 1973, № 4.
3. Походун А.И., Матвеев М.С. Иванова А.Г., Термометрия, Российская Метрологическая энциклопедия, 2001, "Лики России", гл.ред Гарбеев Ю.В., стр. 426 – 435.
4. ГОСТ 8.558 – 93 "ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры" Часть 3
5. Fischer, J. и др., "Uncertainty Budgets for Realization of ITS-90 by Radiation Thermometry". В сборнике: TEMPERATURE. Its Measurement and Control in Science and Industry, v. 7, 8th International Temperature Symposium, National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Dr., Gaithersburg, MD, USA, Chicago, Illinois, 21-24 October 2002, стр. 631-638
6. Матвеев М. С., Макаренко А. Ю., Цорин В. Г. Влияние поляризации излучения на точность передачи размера единицы температуры в радиационной термометрии.