

Термоэлектрический приёмник оптического излучения типа ТП-1

А.С. Ильин *¹, М.Н. Павлович²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 20.09.2024

Одобрена после рецензирования 03.12.2024

Принята к публикации 26.12.2024

Аннотация

Показана необходимость создания отечественного приёмника оптического излучения, способного измерять постоянные потоки оптического излучения в диапазоне освещённостей от 1 до 2000 Вт/м², спектральном диапазоне от 0,5 до 20 мкм со временем измерения не более 2 с. Приведены характеристики наилучших отечественных термоэлектрических приёмников излучения, работающих в этих же диапазонах, но по совокупности характеристик не удовлетворяющих поставленным требованиям.

Рассчитаны значения основных параметров приёмника, таких как коэффициент преобразования, постоянная времени. Выбрана «штыревая» конструкция чувствительного узла приёмника. По этой модели проведены расчёты составляющих теплопроводностей и составляющих теплоёмкостей элементов конструкции, а также рассчитано электрическое сопротивление приёмника.

Разработана конструкция приёмника: чувствительный узел смонтирован на стандартной ножке, корпус приёмника имеет диаметр 15 мм, высота – 9 мм. Входное окно – селенид цинка, при необходимости можно использовать окна из других материалов.

Разработан стенд для измерения коэффициента преобразования и для исследования его зависимости от уровня освещённости. В качестве образцового приёмника использовался термоэлектрический приёмник типа ПОИ-1, имеющий приёмный элемент в виде конуса, на котором расположена обмотка электрического замещения. Разработанный приёмник имел следующие основные характеристики: $K_{\Pi} = (0,5 \pm 0,2)$ В/Вт, постоянная времени $\tau = 0,4$ с, время одного измерения $t_{\text{изм}} \leq 2$ с, сопротивление $R = (0,5 \pm 0,2)$ Ом, размер приёмной площадки $A_{\Pi} = (4 \times 1)$ мм², спектральный диапазон от 0,5 до 20 мкм, обнаружительная способность $D^* = 8 \cdot 10^8$ см²·Гц^{0.5}·Вт⁻¹, что соответствует лучшим неохлаждаемым тепловым приёмникам излучения. Чернящее покрытие обеспечивает высокий коэффициент поглощения $\varepsilon_{\lambda} \approx 0,93 - 0,98$ в диапазоне от 0,4 до 25 мкм. Граница основной погрешности $\Delta = 3,5\%$.

Ключевые слова: коэффициент преобразования K_{Π} , тепловая проводимость Q_{Σ} [Вт/град], постоянная времени τ , суммарная теплоёмкость C_{Σ} [Дж/град], неисключённая систематическая погрешность НСП %, СКО – среднее квадратическое отклонение, граница основной погрешности, образцовый приёмник излучения, термоэлектрический приёмник излучения

EDN ZXRNP

doi:10.24412/2949-0553-2024-614-04-17

Введение

К началу 2000 годов сложилась ситуация, когда в стране отсутствовали приёмники оптического излучения, на базе которых можно было бы создавать рабочие средства энергетической освещённости (РСИ ЭО), позволяющие измерять плотности потоков излучения в диапазоне энергетической освещённости от 1,0 до 5000 Вт/м², спектральном диапазоне от 0,5 до 20,0 мкм, с погрешностью измерения не более 10% (поверочная схема ГОСТ 8.195-2013 [1]). Такие РСИ ЭО были бы востребованы в организациях охраны труда [2], медицине, сельском хозяйстве, теплоэнергетике, машиностроении и прочее.

Основные характеристики такого приёмника оптического излучения приведены в таблице 1.

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с разработкой такого приёмника излучения.

* Автор, ответственный за переписку: Александр Семёнович Ильин, iliin876@gmail.com

Таблица 1 – Основные характеристики требуемого приёмника

Характеристика	Размерность	Значение
Диапазон энергетической освещённости	Вт/м ²	от 1 до 2 · 10 ³
Спектральный диапазон	мкм	от 0,5 до 20,0
Время одного измерения	с	≤ 2
Предел допускаемой основной относительной погрешности	%	≤ 6
Габариты	Ø мм × мм	≤ 20 × 10
Масса	г	≤ 20

1. Основные требования к эксплуатационным характеристикам приёмника:

- выдерживать работу в условиях горячих цехов, повышенной влажности, при наличии сквозняков, запылённости помещений, при незначительных ударных нагрузках и т.п.

2. Наиболее известные отечественные тепловые термоэлектрические приёмники излучения

Как это ни парадоксально, но, несмотря на большое количество разработанных отечественных термоэлектрических приёмников излучения, не было приёмников, удовлетворяющих требованиям, приведённым в таблице 1.

В таблице 2 приведены характеристики и конструктивные особенности наиболее близких, аналогичных отечественных термоэлектрических приёмников излучения.

Таблица 2 – Обзор характеристик наиболее близких аналогичных приёмников излучения

Характеристики	РТН	ПП	ПИ	Пиргелиометры	Штыревые
Размер приёмной площадки, мм × мм. Ø	1x1; 3x3 1,5x12	Ø3; Ø6 1x9	Ø15	Ø5 - Ø30	0,2 x 2 до 0,5x4
Коэффициент преобразования, В/Вт	3 до 30	0,5 до 2,0	0,15- 0,3	0,05 – 0,5	10-40
Диапазон измеряемых освещённостей, Вт/м ²	1-200	1-1000	-	100-2000	0,01 - 10
Диапазон измеряемых мощностей, Вт	1·10 ⁻⁶ -2·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁶ 2·10 ⁻²	1·10 ⁻³ 1,0	1·10 ⁻³ 0,5	1·10 ⁻⁹ 1·10 ⁻⁵
Спектральный диапазон, мкм	0,2 – 5,5 1,7 - 15	0,2 - 15	0,4 – 10,6	0,2 - 20	0,2 - 20
Постоянная времени, с	0,1	5,0	30	10-30	0,03- 0,1
Время одного измерения, с	0,5	30	180	60 - 150	0,1 -0,5
Сопротивление, Ом	5- 1·10 ³	от1·10 ³ до	≤2·10 ³	от1·10 до 1·10 ³	20-300
Граница основной погрешности, %	5	3	2,5	-	-
Конструктивное исполнение	Вакуумный, тонкоплёночный	Воздушный, тонкоплёночный	Воздушный, проволочный	Воздушный, проволочный	Вакуумный, тонкоплёночный
Габариты: диаметр × длина. Длина × ширина × высота	Ø14x50 Ø19 x70 Ø30 x70	Ø32 x70 Ø32 x150	200x125x205	Имеется много типов	Ø19 x70
Литература	4,5	4,5	4,5	7	6,8

Из таблицы 2 следует, что рассмотренные приёмники не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к приёмнику (таблица 1), либо по спектральному диапазону, либо по постоянной времени, либо по совокупности параметров.

3. Расчёт характеристик приёмника

3.1. Выбор размера приёмной площадки

Одной из основных характеристик приёмника при измерении ЭО является размер приёмной площадки.

При измерении ЭО сигнал с приёмника прямо пропорционален площади приёмной площадки:

$$U_C = K_{\text{П}} \cdot A \cdot E, \quad (1)$$

где U_C – сигнал приёмника, [В],

E – освещённость приёмной площадки, [Вт/м²],

K_{Π} – коэффициент преобразования приёмника, [В/Вт],
 A – площадь приёмника, [м²].

При этом

$$A = b \cdot l, \quad (2)$$

где b – ширина площадки, [м],
 l – длина площадки, [м].

Выбор размера приёмной площадки зависит от следующих требований к приёмнику:

- размер корпуса, либо особенности конструкции вводов выбранной стандартной ножки;
- необходимый уровень сигнала при минимальной освещённости.

Наиболее подходящим изделием для монтажа чувствительного узла приёмника была выбрана стандартная «ножка» ПЖ3551001, используемая для фотодиодов типов СФ2-18 и СФ3-7А. Расстояние между вводами данной ножки равно 4 мм, поэтому принимаем следующие размеры приёмной площадки:

- длина $l = 4$ мм, ширина $b = 1$ мм. Итак, площадь приёмной площадки равна:

$$A_{\Pi} = b \cdot l = 4 \times 1 \text{ мм}^2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

3.2. Оценка необходимой величины коэффициента преобразования

Необходимая величина коэффициента преобразования K_{Π} определена из выражения:

$$K_{\Pi} = U_{\text{МИН}}/P_{\text{МИН}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{МИН}}$ – поток излучения, приходящий на приёмную площадку при минимальной освещённости, [Вт],

$$P_{\text{МИН}} = A_{\Pi} \cdot E_{\text{МИН}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times 1 \text{ Вт/м}^2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}, \quad (4)$$

Если принять значение темнового сигнала приёмника $U_{\text{Ш}} = 1 \cdot 10^{-7}$ В и то, что $U_{\text{МИН}} = 10U_{\text{Ш}} = 1 \cdot 10^{-6}$ В, то, в соответствии с (3),

$$K_{\Pi} = U_{\text{МИН}}/P_{\text{МИН}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ В}/4 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} = 0,25 \text{ В/Вт}.$$

Итак, диапазон выходного сигнала приёмника определён по выражению (1):

$$U_{\text{МИН}} = 10 U_{\text{Ш}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ В},$$

$$U_{\text{МАКС}} = K_{\Pi} \cdot A \cdot E = 0,25 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ В},$$

$$K_{\Pi} = 0,25 \text{ В/Вт}.$$

Диапазон выходного сигнала: $1 \cdot 10^{-6}$ В - $2 \cdot 10^{-3}$ В.

3.3. Оценка нагрева приёмной площадки

Нагрев приёмной площадки приёмника при облучении потоком излучения с освещённостью $E = 2000$ Вт/м² определён из выражения:

$$U_{\text{МАКС}} = \alpha_{1,2} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

Где $U_{\text{МАКС}}$ – сигнал с приёмника при освещённости 2000 Вт/м²,

$\alpha_{1,2}$ – суммарная термо-э.д.с. ветвей термопары, равная примерно 400 мкВ/град,

$$\Delta t = U_{\text{МАКС}}/\alpha_{1,2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ В} / 400 \cdot 10^{-6} \text{ В/град} = 5^{\circ} \text{ С}.$$

Итак, превышение температуры приёмной площадки над температурой окружающей среды при освещённости 2000 Вт/м² составит 5° С.

На рисунке 1 приведена схема устройства штыревого термоэлемента, в соответствии с которой, проведен расчёт характеристик приёмника.

В таблице 3 приведены физические характеристики материалов, используемых в чувствительном узле (рисунок 1).

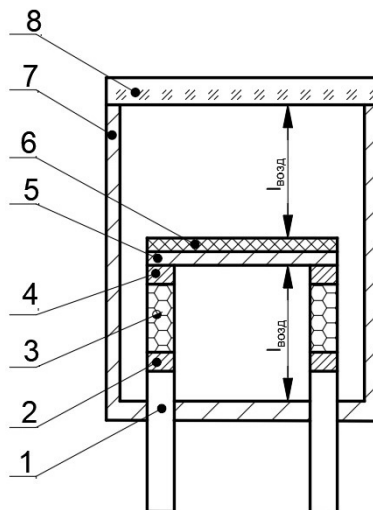


Рисунок 1 – Схема устройства чувствительного узла штыревого приёмника, где 1 – никелевый ввод, 2, 4 – контакт – оловянный-висмутовой припой, 3 – ветви термопары, n - тип Bi_2Te_3 , легированный селеном, и p – тип, легированный сурьмой, 5 – медная приёмная площадка, 6 – чернящее покрытие АК-243, 7 – входное окно $ZnSe$, 8 – корпус

Таблица 3 – Характеристики материалов, используемых в чувствительном узле

Наименование материала	Коэффициент теплопроводности Вт/(м·град)	Плотность кг/м ³	Удельная теплоёмкость Дж/(кг·град)	Удельное электросопротивление Ом·м
1 – ввод (Ni)	91	8900	450	$8,9 \cdot 10^{-8}$
2,4 – припой (BiSn)	65	7300	230	$11,5 \cdot 10^{-8}$
3 – ветвь термопары Bi_2Te_3	0.7	7900	200	$3 \cdot 10^{-5}$
5 – Площадка Cu	400	8900	380	$1,68 \cdot 10^{-8}$
6 – чернящее покрытие	0,9	700	400	диэлектрик

3.4. Оценка суммарной теплопроводности при максимальной освещённости

Суммарная теплопроводность определяется из выражения:

$$P = Q_{\Sigma} \Delta t, \tag{6}$$

где P – поток излучения, [Вт],

Q_{Σ} – суммарная тепловая проводимость чувствительного узла приёмника, [Вт/град],

Δt – температура нагрева чувствительного элемента, [град],

$$Q_{\Sigma} = P_{\text{МАК}} / \Delta t = A_{\text{П}} \cdot E_{\text{МАК}} / \Delta t = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 / 5 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ В/град.}$$

$$Q_{\Sigma} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ В/град.}$$

3.5. Оценка суммарной теплоёмкости чувствительного узла

Суммарная теплоёмкость C_{Σ} определится из выражения:

$$\tau = C_{\Sigma} / Q_{\Sigma}. \tag{7}$$

$$C_{\Sigma} = \tau \cdot Q_{\Sigma}, \tag{8}$$

где τ – постоянная времени приёмника.

Постоянная времени приёмника τ связана с временем выхода сигнала на уровень $0,95U_{\text{МАКС}}$ зависимостью:

$$t_{\text{ВЫХ}} = 5 \tau \tag{9}$$

Из (9) следует:

$$\tau = t_{\text{ВЫХ}} / 5 = 0,4 \text{ с.}$$

И из (8) находим:

$$C_{\Sigma} = \tau \cdot Q_{\Sigma} = 0,64 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/град}$$

Рассмотрим составляющие суммарной проводимости и суммарной теплоёмкости.

3.6. Оценка составляющих суммарную теплопроводность

Суммарная теплопроводность состоит из следующих составляющих:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{ИЗЛ}} + Q_{\text{ВОЗД}} + Q_{\text{ВЕТВИ}}, \tag{10}$$

где $Q_{\text{ИЗЛ}}$ – теплопроводность, обусловленная излучением,
 $Q_{\text{ВОЗД}}$ – теплопроводность, обусловленная теплопроводностью воздуха, находящегося в корпусе,
 $Q_{\text{ВЕТВИ}}$ – теплопроводность по ветвям термопары.

3.6.1. Теплопроводность, обусловленная излучением

При малых изменениях температуры тела

$$Q_{\text{ИЗЛ}} = 4 \cdot A_{\text{П}} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^3 \tag{11}$$

Значения составляющих и соответствующие расчёты по данной формуле приведены в таблице 3.

$$Q_{\text{ИЗЛ}} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/град}$$

3.6.2. Теплопроводность, обусловленная проводимостью по воздуху

$$Q_{\text{ВОЗД}} = \lambda_{\text{ВОЗ}} \cdot A_{\text{П}}/l = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/град}. \tag{12}$$

В таблице 4 приведены значения составляющих данной формулы и соответствующий расчёт.

В связи с тем, что приёмная площадка имеет незначительный перегрев при максимальной освещённости и конструктивно воздушные промежутки не превышают трёх мм, то теплопроводностью, обусловленной конвекционными переносами тепла, пренебрегаем.

3.6.3. Теплопроводность, обусловленная проводимостью по материалам ветвей термопар

Оценка соотношения величин тепловых проводимостей контактных элементов и материала ветви термопары выполнена в соответствии со схемой рисунка 2.

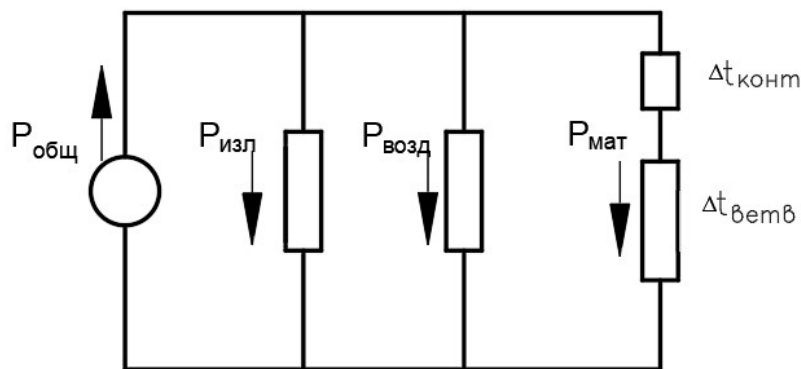


Рисунок 2 – Схема тепловых потоков штыревого термоэлемента, где $P_{\text{Общ}}$ – тепловой поток, поглощённый приёмной площадкой, $P_{\text{Изл}}$ – тепловой поток, уходящий с площадки за счёт излучения, $P_{\text{Возд}}$ – тепловой поток за счёт проводимости по воздуху от нагретой площадки, $P_{\text{Мат}}$ – тепловой поток, проходящий через ветви термопар

Ветвь термопары состоит из контактных площадок (2), (4), а также из термоэлектрического материала Bi_2Te_3 (3). При прохождении теплового потока через ветвь термопары на её элементах (2), (3) и (4) происходит повышение температуры, $\Delta t_{\text{КОНТ}}$ и $\Delta t_{\text{ВЕТВ}}$ (рисунок 2). Так как величина сигнала с термопары зависит только от $\Delta t_{\text{ВЕТВ}}$, то необходимо, чтобы на контактах выделялось как можно меньше тепла, а на ветви, как можно больше, например в 100 раз. Из этого условия следует:

$$\Delta t_{\text{ВЕТВ}}/\Delta t_{\text{КОНТ}} = Q_{\text{КОНТ}}/Q_{\text{ВЕТВ}} \geq 100 \tag{13}$$

3.6.4. Теплопроводность $Q_{\text{ВЕТВИ}}$, обусловленная проводимостью по материалам ветвей термопар

Данная тепловая проводимость вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{ВЕТВИ}} = \lambda_{\text{ВЕТВИ}} \cdot A_T / h = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/град} \tag{14}$$

В таблице 4 приведены значения составляющих данной формулы и соответствующий расчёт.

3.6.5. Теплопроводность, обусловленная проводимостью по припою Q_{BiSn}

Проводимость Q_{BiSn} определяется по формуле (14), все составляющие и результаты расчёта приведены в таблице 4.

В таблице 4 приведены формулы расчёта составляющих теплопроводностей, численные значения их составляющих, а также результаты расчёта.

Таблица 4 – Результаты расчёта тепловых проводимостей

Тип проводимости	Формула	Численные значения составляющих	Результат
$Q_{\text{ИЗЛ}}$	$4 \cdot A_{\text{П}} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^3$	$A_{\text{П}}=4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ $T = 300\text{К} \quad \varepsilon = 1$	$2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/град}$
$Q_{\text{ВОЗД}}$	$2 \cdot \lambda_{\text{ВОЗД}} \cdot A_{\text{П}} / l$	$\lambda_{\text{ВОЗД}} = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$; $A_{\text{П}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, $l = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$7,2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/град}$
$Q_{\text{ВЕТВИ}}$	$2 \cdot \lambda_{\text{ВЕТВИ}} \cdot A_T / h$	$\lambda_{\text{ВЕТВИ}} = 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ [9], $A_T = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, $h = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/град}$
$4Q_{\text{BiSn}}$	$4 Q_{\text{BiSn}} = \lambda_{\text{BiSn}} \cdot A_T / h$	$\lambda_{\text{BiSn}} = 65 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$, $A_{\text{BiSn}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ $h = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ Эту проводимость не учитываем, т.к. практически она не участвует в создании сигнала термопары	3,25
Q_{Σ}			$1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/град}$

Сумма теплопроводностей $Q_{\text{ВОЗД}} + Q_{\text{ИЗЛ}} \approx 1 \cdot 10^{-4}$, что примерно в 16 раз меньше суммарной теплопроводности, так что их в дальнейших расчётах не учитываем.

3.6.6. Оценка постоянной времени приёмника

Постоянная времени приёмника излучения определяется выражением:

$$\tau = C_{\Sigma} / Q_{\Sigma}, \tag{15}$$

где Q_{Σ} – суммарная теплопроводность элементов узла приёмника, C_{Σ} – сумма теплоёмкостей элементов чувствительного узла приёмника:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{П}} + 2 C_{\text{ВЕТВИ}} + C_{\text{Ч}} + 4 C_{\text{КОНТ}}, \tag{16}$$

где $C_{\text{П}}$ – теплоёмкость приёмной площадки,
 $C_{\text{ВЕТВИ}}$ – теплоёмкость ветви термопары, для оценки считаем, что ветви одинаковы,
 $C_{\text{Ч}}$ – теплоёмкость чернящего покрытия,
 $C_{\text{КОНТ}}$ – теплоёмкость контакта.

Теплоёмкость элементов чувствительного узла рассчитывается по формуле:

$$C_i = P_i \cdot c_i = \rho_i \cdot V_i \cdot c_i, \tag{17}$$

где C_i – теплоёмкость элемента, [Дж/град]
 P_i – вес элемента [кг]
 ρ_i – удельный вес элемента, [кг/м³],
 c_i – удельная теплоёмкость материала, Дж/ (кг·град)
 V_i – объём элемента, [м³].

В таблице 5 приведены значения составляющих формул (15 – 17) и приведены результаты расчётов.

Постоянная времени приёмника излучения определяется выражением:

$$\tau = C_{\Sigma} / Q_{\Sigma} = 0,4 \text{ с.}$$

Таблица 5 – Результаты расчёта теплоёмкости приёмника

Материал	Плотность ρ [кг/м ³]	Уд. теплоёмкость [Дж/(кг·°C)]	Геометрические размеры [м]			Объём V[м ³]	Вес P [кг]	Теплоёмкость [Дж/°C]
			Длина L [м]	Ширина B [м] (Ar)[м ²]	Толщина h [м]			
Ветвь В ₁₂ Те ₃ [9]	$7,9 \cdot 10^3$	200	$0,44 \cdot 10^{-3}$	$(0,53 \cdot 10^{-6})$		$5,3 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$ ($0,7 \cdot 10^{-3}$)
Приёмная площ. Cu	$8,93 \cdot 10^3$	380	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Чернь ABRO	$0,7 \cdot 10^3$	400	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Контакт BiSn	$7,3 \cdot 10^3$	230	$1 \cdot 10^{-5}$	$(0,53 \cdot 10^{-6})$		$5,3 \cdot 10^{-12}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-6}$
C_{Σ}								$0,71 \cdot 10^{-3}$

3.7. Оценка электрического сопротивления

Электрическое сопротивление чувствительного узла приёмника, рисунок 1, определяется выражением:

$$R_{\Sigma} = 2 R_1 + 4 R_2 + 2 R_3 + R_5, \quad (18)$$

где R_1 – сопротивление ввода (1),
 R_2 – сопротивление контакта (2),
 R_3 – сопротивление ветви термопары (3),
 R_5 – сопротивление приёмной площадки (5).

Составляющие уравнения (18) вычисляются по выражению:

$$R_i = \rho_i \cdot l_i / A_i \quad (19)$$

В таблице 6 приведены результаты расчётов электрических сопротивлений элементов чувствительного узла приёмника в соответствии с выражениями (18, 19).

Таблица 6 – Результаты расчётов электрических сопротивлений элементов чувствительного узла приёмника

Элемент	Численные значения составляющих выражение	Результат Ом
R_1	$\rho_{Ni} = 7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $A_{Ni} = \pi d^2 / 4 = 0,78 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^2 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ $l_{Ni} = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $R_1 = 7 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 10^{-2} / 2 \cdot 10^{-7} = 1,4 \cdot 10^{-2}$ Ом	$1,4 \cdot 10^{-2}$
R_2	$\rho_{BiSn} = 1 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, $A_{BiSn} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, $l = 5 \cdot 10^{-5}$ м	$2 \cdot 10^{-6}$
R_3	$\rho_{Bi2Te3} = 3 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $l = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $A_{Bi2Te3} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$	$6 \cdot 10^{-2}$
R_5	$\rho_{Cu} = 1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $l_{Cu} = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $a = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 3 \cdot 10^{-6}$ м, $A_{Cu} = a \cdot h = 1 \cdot 10^{-3} \times 3 \cdot 10^{-6} = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ $R_5 = 1,68 \cdot 10^{-8} \times 4 \cdot 10^{-3} / 3 \cdot 10^{-9} = 1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
R_{Σ}		$2 \cdot 10^{-1}$ Ом.

Итак, $R_{\Sigma} \approx 2 \cdot 10^{-1}$ Ом

4. Выбор чернящего покрытия

В качестве чернящего покрытия использовалась аэрозольная краска ABRO SP-012 102284 SPRAY PAINT чёрная матовая.

Состав краски: пропан, бутан, акриловая полимерная эмульсия, вода, пигменты, стабилизаторы, толуол, ацетон.

Были измерены коэффициенты отражения этой краски в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,1 мкм на спектрофотометре СФ-16 и в диапазоне длин волн от 1,7 до 25 мкм на спектрофотометре Фурье.

Спектральные характеристики представлены на рисунках 3, 4.

Данная краска имеет хорошее сцепление с полированной медной поверхностью. Краска не выцветает, химически нейтральна ко многим агрессивным средам и сохраняет измеренный коэффициент отражения в течение длительного времени.

5. Характеристики входного окна

Входное окно приёмника выполнено из ZnSe. Типовая спектральная характеристика пропускания приведена на рисунке 5.

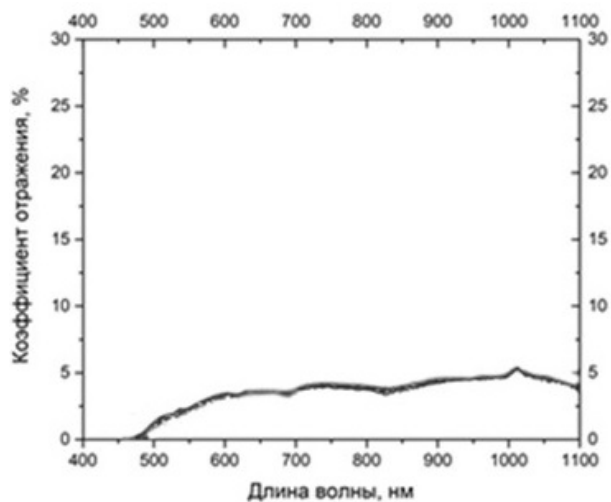


Рисунок 3 – Спектральные коэффициенты отражения аэрозольной краски АВРО в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,1 мкм

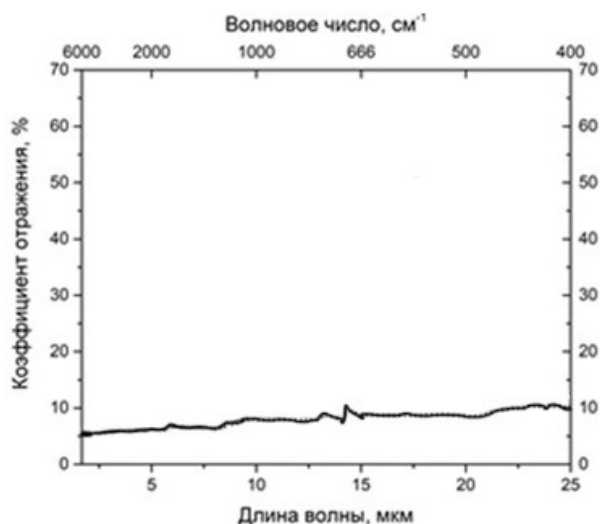


Рисунок 4 – Спектральные коэффициенты отражения аэрозольной краски АВРО в диапазоне длин волн от 1,7 до 25 мкм

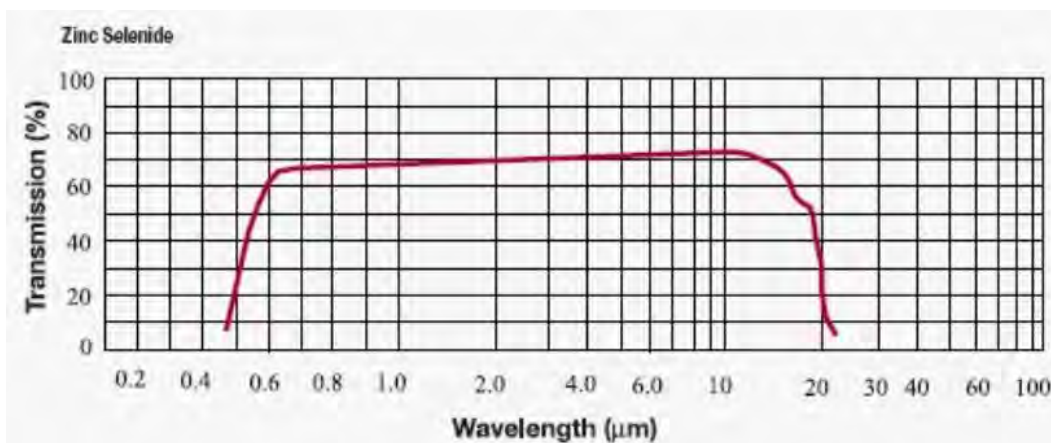


Рисунок 5 – Типовая спектральная характеристика пропускания материала ZnSe

6. Сравнение качества рассчитанного приёмника с аналогами

Для оценки приёмников независимо от площади приёмной площадки используется понятие обнаружительная способность приёмника D^* [10], значение которой определяется из соотношения:

$$D^* = (A_{\Pi} \cdot \Delta f)^{0,5} / W_{\Pi}, \quad (20)$$

где A_{Π} – площадь приёмной площадки в $[\text{см}^2]$,

Δf – полоса пропускания, приведённая к ГГц,

W_{Π} – пороговое значение $\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-0,5}$, рассчитываемое по выражению

$$W_{\Pi} = U_{\text{Ш}} / K_{\Pi}. \quad (21)$$

В свою очередь, приняв, что тепловой шум в термоэлементе является преобладающим, по известной из электротехники формуле Найквиста определяем $U_{\text{Ш}}$:

$$U_{\text{Ш}} = 1,28 \cdot 10^{-10} (R \cdot \Delta f)^{0,5}. \quad (22)$$

Для нашего случая $U_{\text{Ш}} = 1,28 \cdot 10^{-10} (R \cdot \Delta f)^{0,5} = 6 \cdot 10^{-11} \text{ В} \cdot \text{Гц}^{0,5}$.

Подставляя в (21) соответствующие значения, получим

$$W_{\Pi} = U_{\text{Ш}} / K_{\Pi} = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-0,5}.$$

По выражению (20) определяем

$$D^* = (A_{\Pi} \cdot \Delta f)^{0,5} / W_{\Pi} = 8,5 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0,5} \cdot \text{Вт}^{-1}$$

Наиболее близкие аналогичные вакуумные тонкоплёночные термоэлементы типов РТН, работающие на постоянных (не модулированных) потоках излучения, имеют значения обнаружительной способности от $(8 \text{ до } 12) \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0,5} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

7. Конструкция приёмника

Конструкция приёмника представлена на рисунке 6. На стандартной ножке смонтирован чувствительный узел, все элементы которого выполнены в соответствии с рассчитанными размерами. Узел устанавливается в дюралевый корпус с входным окном. Фиксация чувствительного узла и входного окна производится эпоксидным компаундом, что обеспечивает герметичность прибора. Диаметр корпуса равен 15 мм, высота 9 мм. Угол обзора равен 150° .

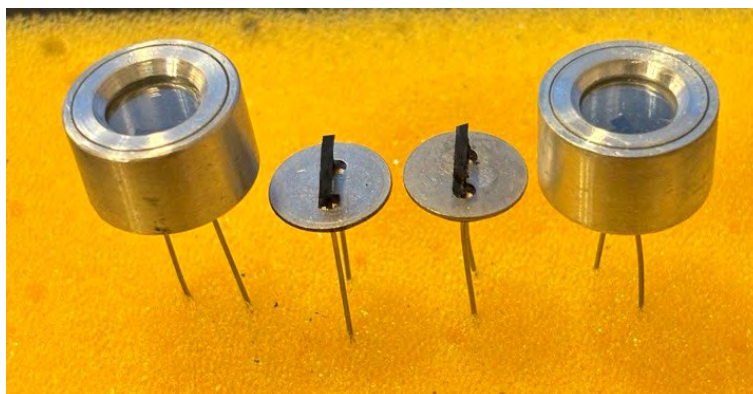


Рисунок 6 – Фото чувствительного узла приёмника, смонтированного на стандартной ножке, и приёмник в сборе

8. Исследование характеристик разработанного приёмника

8.1. Измерение коэффициента преобразования

Коэффициент преобразования приёмника ТП-1 определяется методом сличения с образцовым приёмником ПОИ-1 на установке, схема которой приведена на рисунке 7.

Приёмником ПОИ-1 измеряется освещённость в плоскости, в которой находится исследуемый приёмник ТП-1. Источником излучения является лампа РН-8-20.

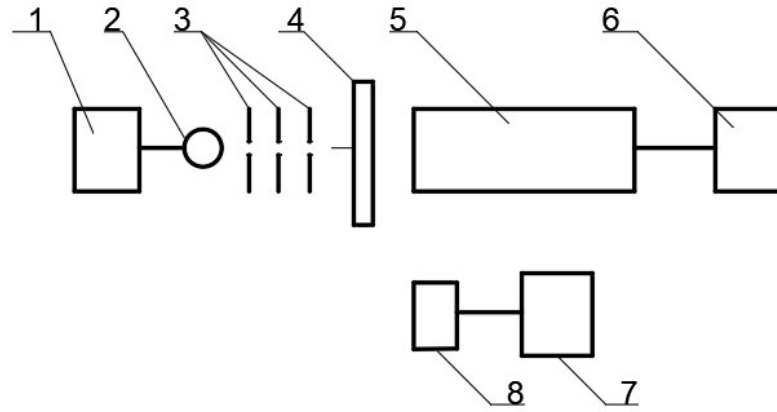


Рисунок 7 – Блок схема измерительного стенда для определения коэффициента преобразования, где 1 – блок питания лампы, штатный осветитель к микроскопу МБС-10, 2 – лампа типа РН-8-20, 3 – блок диафрагм, 4 – заслонка, 5 – образцовый приёмник излучения типа ПОИ-1, 6 – мультиметр типа АРРА-09, 7 – мультиметр типа АРРА-09, 8 – исследуемый приёмник, ТП-1

Блок-схема измерительного стенда для определения коэффициента преобразования приёмника излучения приведена на рисунке 7.

Коэффициент преобразования исследуемого приёмника рассчитывается по следующему выражению:

$$K_{\Pi} = U_{\Pi} \cdot A_{\text{ОБР}} \cdot K_{\text{ОБР}} / U_{\text{ОБР}} \cdot A_{\Pi}, \quad (23)$$

где $U_{\text{ОБР}}$ – сигнал с образцового приёмника, В,

$A_{\text{ОБР}}$ – площадь приёмной площадки образцового приёмника, м²,

A_{Π} – площадь приёмной площадки исследуемого приёмника, м²,

$K_{\text{ОБР}}$ – коэффициент преобразования образцового приёмника, В/Вт,

K_{Π} – коэффициент преобразования исследуемого приёмника, В/Вт.

Основные характеристики образцового приёмника ПОИ-1 приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Основные характеристики приёмника ПОИ-1

Характеристика	Единица измерения	Значение
Сопротивление термобатарей	Ом	5±1
Сопротивление обмотки нагревателя	Ом	101,1
Диаметр входной диафрагмы	мм	6
Расстояние от торца корпуса до входной диафрагмы	мм	17
Температурный коэффициент преобразования в диапазоне температур от 10 до 40°С положителен и имеет значение	1/град	0,002
Коэффициент преобразования	В/Вт	0,266±0,002
Время выхода сигнала на уровень 0,99U _{max} t _{выхода}	сек	60
Граница основной погрешности	%	2
Диапазон измеряемых мощностей	Вт	10 ⁻⁴ – 2,0
Габаритные размеры: диаметр	мм	32
длина	мм	120
Масса	кг	0,15

Приёмник ПОИ-1 предназначен для измерения оптического излучения с равномерной освещённостью в спектральном диапазоне от 0,2 до 30 мкм и в диапазоне мощностей от 1,10 - 4 до 2,0 Вт. Приёмник имеет электрическую калибровку.

В соответствии с (23) производится измерение сигнала $U_{\text{ОБР}}$ приёмником ПОИ-1, затем в эту же позицию помещается исследуемый приёмник и измеряется сигнал U_{Π} . Далее K_{Π} рассчитывается по выражению (23), все составляющие которого известны.

В таблице 8 приведены сигналы образцового приёмника ПОИ-1 в зависимости от освещённости.

Основные характеристики образцового приёмника ПОИ-1

Приёмник ПОИ-1 предназначен для измерения оптического излучения с равномерной освещённостью в спектральном диапазоне от 0,2 до 30 мкм и в диапазоне мощностей от $1,10^{-4}$ до 2,0 Вт. Приёмник имеет электрическую калибровку. Основные характеристики приёмника приведены в таблице 7.

В таблице 8 приведены сигналы образцового приёмника ПОИ-1 в зависимости от освещённости, а также соответствующие сигналы с приёмника ТП-1, (имеющего $K_{\Pi} = 0,5 \text{ В/Вт}$).

Таблица 8 – Величины сигналов приёмников ПОИ-1 и ТП-1 в зависимости от освещённости

$U_{\text{ОБР}} \text{ В}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
$U_{\text{ТП-1}} \text{ В}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
$E \text{ Вт/м}^2$	10	100	500	1000

8.2. Результаты измерения коэффициента преобразования

Значения коэффициента преобразования приёмников ТП-1 находились в пределах от 0,35 до 0,7 В/Вт, или $(0,5 \pm 0,2) \text{ В/Вт}$.

Изменение K_{Π} в зависимости от величины освещённости от 10 до 1000 Вт/м² не превышало 2%.

Время выхода сигнала на уровень $0,95U_{\text{МАК}}$ не превышал 2 с.

Сопrotивление приёмников ТП-1 находилось в диапазоне от 0,1 до 0,5 Ом, или $R = (0,3 \pm 0,2) \text{ Ом}$.

9. Метрологическое исследование приёмника ТП-1

Так как K_{Π} (23) есть результат косвенного измерения, то среднее значение данной величины будет результатом деления средних значений величин сигналов $\overline{U}_{\text{ТП}}$ и $\overline{U}_{\text{ОБР}}$. Средние арифметические значения указанных величин определялись из серии пяти измерений по формуле:

$$\overline{U}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i. \quad (24)$$

Относительное среднее квадратическое отклонение измеренных сигналов определялось по формуле:

$$S_{\overline{U}_i} = \frac{100}{\overline{U}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \overline{U})^2}{n(n-1)}}. \quad (25)$$

Доверительные границы ε случайной погрешности оценки измеряемой величины вычислялись по формуле:

$$\varepsilon = t S_{\overline{U}_{\text{ОТН}}}, \quad (26)$$

где t - коэффициент Стьюдента, значение которого зависит от доверительной вероятности P и числа измерений n (приложение Д ГОСТ 8.736-2011). В нашем случае для доверительной вероятности $P = 0.95$ и числа измерений, равном пяти, коэффициент Стьюдента равен $t = 2,571$:

$$S_{\overline{U}_{\text{ОТН}}} = \sqrt{S_{\overline{U}_{\text{ТП}}}^2 + S_{\overline{U}_{\text{ОБР}}}^2} \quad (27)$$

В соответствии с ГОСТ 8.736-2011 результат метрологического исследования K_{Π} приёмника ТП-1 должен быть представлен в виде:

$$\overline{K_{\Pi}} \pm \Delta, P, \quad (28)$$

где Δ - граница погрешности оценки измеряемой величины,

P – доверительная вероятность, равная, в нашем случае, 0,95:

$$\Delta = K S_{\Sigma}, \quad (29)$$

где K – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности S_{Σ} и неисключённой систематической погрешности Θ_{Σ} (НСП); S_{Σ} – суммарное среднее квадратическое отклонение измеряемой величины вычисляется по формуле:

$$S_{\overline{U}_{\Sigma}} = \sqrt{S_{\Theta}^2 + S_{\overline{U}_{\text{ОТН}}}^2} \quad (30)$$

где S_{Θ} – среднее квадратическое отклонение НСП, которое, в нашем случае, оценивается по формуле:

$$S_{\Theta} = \frac{\Theta(P)_{\Sigma}}{\sqrt{3}}, \quad (31)$$

где $\Theta(P)_\Sigma$ – граница НСП, которая определялась по формуле:

$$\Theta_\Sigma(P) = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2}, \tag{32}$$

где Θ_i – граница i – й НСП;
 k – коэффициент, равный 1,1 для вероятности 0,95.

Таблица 9 – Основные метрологические характеристики приёмника ТП-1

Составляющие основной погрешности	Обозначение	Процент %
Граница основной погрешности	$\Delta_{0,95}$	3,5
НСП основная погрешность ПОИ-1	$\Theta_{\text{ПОИ}}$	2
НСП от линейных размеров приёмной площадки	Θ_L	0,5
НСП от величины измеряемого напряжения мультиметром АРРА-09	Θ_U	1
НСП от величины измеряемой температуры	Θ_t	0,02
НСП от измеряемой мощности	Θ_P	2,0
СКО относительное, сигнал с ТП-1	$S_{\text{отн.ТП-1}}$	0,5
СКО относительное, сигнал с ПОИ-1	$S_{\text{отн.ОБР}}$	0,5
СКО суммарное	$S_{U_{\text{отн}}}$	0,7
Границы суммарной НСП	$\Theta_\Sigma(P)$	2
СКО НСП	S_Θ	1,35
СКО суммарное	S_Σ	1,6
Доверительные границы случайной погрешности	ε	1,8
Коэффициент К	К	1,4

Таблица 10 – Расчётные и реально полученные характеристики приёмников ТП-1

Характеристика	Размерность	Расчётное значение	Реальное значение
Размер приёмной площадки	мм x мм	4 x 1	4 x 1
Сопротивление	Ом	0,2	0,3 ± 0,2
Коэффициент преобразования	В/Вт	0,25	0,5 ± 0,2
Температурный коэффициент преобразования в диапазоне температур от 10 до 40°C положителен и имеет значение	1/град	0,0005	0,002
Диапазон освещённостей	Вт/м ²	1 - 2000	10 - 2000
Постоянная времени	с	0,44	0,4 - 0,6
Обнаружительная способность, D*	см·Гц ^{0,5} ·Вт ⁻¹	8,5·10 ⁸	(7,5 - 8) · 10 ⁸

Коэффициент К (20) определяется по формуле:

$$K = \frac{(\varepsilon + \Theta_\Sigma)}{(S_{U_{\text{отн}}} + S_\Theta)}. \tag{33}$$

Основные метрологические характеристики, используемые для расчёта границы основной погрешности приёмника ТП-1, приведены в таблице 9.

Неисключённые систематические погрешности Θ_i , относящиеся к приёмнику, рассчитывались по формуле:

$$\Theta_i = K_{\text{Пн}} - K_{\text{Пв}} \cdot 100 / K_{\text{Пн}}, \tag{34}$$

где $K_{\text{Пн}}$ – значение $K_{\text{П}}$, полученное при начальной калибровке,
 $K_{\text{Пв}}$ – значение $K_{\text{П}}$, полученное при максимальном значении влияющего фактора при прочих номинальных условиях.

9. Заключение

В таблице 10 приведены расчётные и реально полученные характеристики приёмников ТП-1.

В результате данной работы был создан достаточно универсальный термоэлектрический приёмник излучения. При использовании серийных, дешёвых мультиметров типа АРРА-09 и им подобным, с разрешением $1 \cdot 10^{-6}$ В, приёмником ТП-1 можно уверенно измерять потоки от $5 \cdot 10^{-6}$ Вт до $1 \cdot 10^{-2}$ Вт. Если использовать современные малошумящие микромодули с цифровой обработкой сигнала, то можно измерять потоки мощностью от $5 \cdot 10^{-8}$ Вт.

Финансирование

Работа выполнена за счёт внутренних средств ИТПЭ РАН.

Список литературы

- [1] ГОСТ 8.195-2013 Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещённости, силы излучения и энергетической освещённости в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм.
- [2] Госкомсанэпиднадзор в области «Сан.Пин. 2.2.4.548-96.2.2.4. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».
- [3] Радиометр неселективный “Аргус 03” Паспорт, техническое описание и инструкция по эксплуатации.
- [4] Ильин А.С., Котюк А.Ф. Термоэлектрические приёмники оптического излучения с плёночными и проволочными термопарами для прецизионных измерений // Опτικο-электронные измерения. Сборник статей. Под редакцией В.С. Иванова. М.: Университетская книга, 2005. С. 280 - 291.
- [5] Ильин А.С. Разработка и исследование термоэлектрических первичных измерительных преобразователей для эталонных, образцовых и рабочих средств измерений энергетических характеристик оптического излучения сплошного и дискретного спектра в диапазоне длин волн 0,25- 15 мкм. Диссертация на соискание ... к.т.н. Москва, 1985. 240 с.
- [6] Левин Ю.З., Маслов В.А., Чернова Л.Ф. О термоэлементах для спектральных приборов // Тепловые приёмники излучения. Труды 1 Всесоюзного симпозиума. 21-25 октября 1966г. Киев: Издательство «Наукова думка», 1967. С. 132-145.
- [7] Кмито А.А., Скляр Ю.А. Пиргелиометрия. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 230 с.
- [8] Смит Р., Джонс Ф., Чесмер Р. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения / Под редакцией проф. В. А. Фабриканта. - Москва: Издательство иностранной литературы, 1959. С. 90 – 94.
- [9] Анатычук Л.И. Материалы для термопарных элементов. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. Киев: «Наукова думка», 1979. С. 252 – 281.
- [10] Козёлкин В.В., Усольцев И.Ф. Основы инфракрасной техники. Москва: «Машиностроение», 1981. С. 122.

Thermoelectric optical radiation receiver type TP-1

A.S. Ilyin^{*1}, M.N. Pavlovich²

¹ Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

² Federal State Budgetary Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Optical and Physical Measurements", Moscow, Russia.

* iliin876@gmail.com

Abstract

It is shown that it is necessary to create a domestic optical radiation receiver capable of measuring constant optical radiation fluxes in the illumination range from 1 to 2000 W/m², in the spectral range from 0.5 to 20 microns with a measurement time of no more than 2 seconds. The characteristics of the best domestic thermoelectric radiation receivers operating in the same ranges, but, according to the set of characteristics, do not meet the set requirements, are given.

The receiver design has been developed: the sensing unit is mounted on a standard leg, the receiver body has a diameter of 15 mm, height – 9 mm. The entrance window is zinc selenide, if necessary, windows made of other materials can be used.

A stand has been developed to measure the conversion coefficient and to study its dependence on the level of illumination. A thermoelectric receiver of the POI-1 type was used as an exemplary receiver, having a receiving element in the form of a cone on which an electric substitution winding is located. The developed receiver had the following main characteristics: $K_P = (0,5 \pm 0,2)$ V/W, time constant $\tau = 0,4$ s, time of one measurement $T = \leq 2$ s, resistance $R = (0,5 \pm 0,2)$ ohms, size of the receiving area $A_P = (4 \times 1)$ mm², spectral range from 0.5 to 20 microns, detection capacity $D^* = 8 \cdot 10^8$ cm·Hz^{0.5}·W⁻¹, which corresponds to the best uncooled thermal radiation receivers. The blackening coating provides a high absorption coefficient of $\varepsilon_\lambda \approx 0,93 - 0,98$ in the range from 0.4 to 25 microns. The limit of the basic error $\Delta = 3,5\%$.

Key words: conversion coefficient K_P , thermal conductivity Q_Σ [W/deg], time constant C ., total heat capacity C_Σ [J/deg], non-excluded systematic error NSP %, COEX -mean square deviation, boundary of the basic error, exemplary radiation receiver, thermoelectric radiation receiver
