

И. А. Коптелова, Б. В. Мак, А. С. Борисов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА
ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
С ПОМОЩЬЮ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Волгоградский государственный технический университет

shilina@yandex.ru, macbienbg@gmail.com, alexanderbor0134@mail.ru

Автор, ответственный за переписку:

Ирина Александровна Коптелова, shilina@yandex.ru

Предложена методика определения отношения оптического коэффициента полезного действия оптико-электронного прибора с помощью аппарата нечеткой логики. Оптический коэффициент полезного действия, предложенный М. М. Мирошниковым показывает какая часть потока излучения преобразуется в полезный сигнал. Поскольку все спектральные характеристики оптоэлектронных элементов прибора получены экспериментально, то использование аппарата нечеткой логики позволяет значительно упростить расчет их спектральной совместимости.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент излучения, пирометрия, оптико-электронные приборы, аппарат нечеткой логики

I. A. Koptelova, B. V. Mac, A. S. Borisov

**DETERMINATION OF OPTICAL EFFICIENCY OF OPTOELECTRONIC
DEVICES USING A FUZZY LOGIC DEVICE**

Volgograd State Technical University

A method for determining the ratio of the optical efficiency of an optoelectronic device using a fuzzy logic apparatus is proposed. The optical efficiency coefficient proposed by M. M. Miroshnikov shows which part of the radiation flux is converted into a useful signal. Since all the spectral characteristics of the optoelectronic elements of the device have been obtained experimentally, the use of fuzzy logic makes it possible to significantly simplify the calculation of their spectral compatibility.

Keywords: efficiency, radiation coefficient, pyrometry, optoelectronic devices, fuzzy logic apparatus

Уравнения преобразования сигналов в ОЭП

При проектировании оптико-электронных приборов основным условием их работоспособности является спектральная совместимость элементов оптоэлектронного тракта. Функциональная зависимость спектральной плотности

энергетической светимости абсолютно черного тела определяется законом Планка [1]. Для практических расчетов формула Планка является сложной, и поэтому при анализе спектральных характеристик целесообразно использовать относительную (безразмерную) величину

функции спектральной плотности энергетической светимости [1]:

$$y(\lambda, T) = \frac{M_{\lambda}^0(\lambda, T)}{M_{\lambda_m}^0(\lambda_m, T)} = 142,32 \cdot x_{\lambda}^{-5} \left(e^{\frac{4,9651}{x_{\lambda}}} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{где } x_{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_m} = \frac{\lambda T}{c_2} \cdot \frac{1}{0,2014} = 4,9651 \frac{\lambda T}{c_2}.$$

Величина потока излучения, поступающего на вход фотоприемника, определяется выражением [2]:

$$U_{\Phi} = \frac{q}{4} \left(\frac{D_{\text{ВХ}}}{f} \right)^2 \frac{S_{\lambda, \text{max}} R_H R_i R_{yc}}{(R_H + R_i)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda) \varepsilon(\lambda, \Theta) \tau(\lambda) M_{\lambda}^0(\lambda, \Theta) d\lambda, \quad (3)$$

где R_i – внутреннее сопротивление фотоприемника; R_H – сопротивление нагрузки; K_{yc} – коэффициент усиления усилителя фототока; $S_{\lambda, \text{max}}$ – максимальная спектральная чувствительность фотоприемника; S_{λ} – абсолютная спектральная чувствительность фотоприемника; $s(\lambda) = S_{\lambda} / S_{\lambda, \text{max}}$ – относительная спектральная чувствительность фотоприемника.

Спектральные коэффициенты $\varepsilon(\lambda, \Theta)$, $\tau(\lambda)$ и $s(\lambda)$ задаются в виде таблиц и графиков, и по этой причине использовать аналитическое уравнение (3) в расчетах практически невозможно. Поэтому для вычисления выходного напряжения (3) используются численные методы.

Если фоторезистор (ФР) имеет толщину фоточувствительного элемента H , длину l и ширину d , то суммарный ток через него при приложении внешнего напряжения [3]:

$$I = G V_n = \sigma_0 \frac{dH}{l} V_n + \Delta \sigma \frac{dH}{l} V_n = I_T + I_{\Phi}, \quad (4)$$

где G – общая проводимость ФР, Ом^{-1} ; I_T – темновой ток ФР; I_{Φ} – фототок ФР, А; $\Delta \sigma$ – приращение удельной проводимости ФР при освещении, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; σ_0 – собственная темновая удельная проводимость ФР, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; V_n – напряжение питания.

Темновой ток ФР определяет уровень его собственных шумов, а следовательно, его пороговый поток и обнаружительную способность, поэтому его стремятся уменьшить за счет уменьшения d или H или σ_0 при охлаждении. Фототок в установившемся режиме для собственного полупроводника [3]:

$$\Phi = \frac{q}{4} \left(\frac{D_{\text{ВХ}}}{f} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, \Theta) \tau(\lambda) M_{\lambda}^0(\lambda, \Theta) d\lambda, \quad (2)$$

где q – площадь щелевой диафрагмы; $D_{\text{ВХ}}$ – диаметр входного зрачка; f – фокусное расстояние объектива; $\varepsilon(\lambda, \Theta)$ – коэффициент излучения поверхности нагретого изделия; $\tau(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптики; $M_{\lambda}^0(\lambda, \Theta)$ – спектральная плотность энергетической светимости изделия.

Напряжение на выходе усилителя фототока вычисляется по формуле [7]:

$$I_{\Phi} = \frac{e}{hc} \{ \alpha(\lambda) \eta(\lambda) \lambda \} [\tau(u_e + u_h)] \frac{H}{l^2} \Phi_{e, \lambda} V_n, \quad (5)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ А.с – заряд электрона; u_e и u_h – подвижности электронов и дырок, $\text{см}^2/(\text{В.с})$; h – толщина пластинки полупроводника ПОИ; c – скорость распространения электромагнитных колебаний; $\eta(\lambda)$ – квантовый выход полупроводника, фотон $^{-1}$; $\alpha(\lambda)$ – спектральный показатель поглощения, см^{-1} ; $\Phi_{e, \lambda}$ – спектральная плотность потока излучения.

Откуда монохроматическая токовая чувствительность ФР на основе собственной проводимости определяется выражением [3]:

$$S_{I, \lambda} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi_{e, \lambda}} = \frac{e}{hc} \{ \alpha(\lambda) \eta(\lambda) \lambda \} [\tau(u_e + u_h)] \frac{H}{l^2} V_n. \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) фигурные скобки содержат параметры, определяющие монохроматическую чувствительность ФР, а квадратные – физические параметры полупроводника. Из выражений видно, что фототок и монохроматическая чувствительность ФР пропорциональны толщине H и обратно пропорциональны квадрату его длины l^2 . Данное выражение справедливо при малом монохроматическом потоке.

Критерии совместимости позволяют выбирать элементы с совместимыми характеристиками. В качестве основного критерия совместимости оптических элементов системы целесообразно использовать спектральный коэффициент полезного действия (КПД) χ преобразователя [2], определяющий какая часть из общего интегрального потока излучения может быть использована или преобразована [3; 4]:

$$\chi = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda) \varphi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda} d\lambda}, \quad (7)$$

где $\Phi_{e\lambda m}$ – максимальная спектральная плотность входного потока излучения; $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – спектральное распределение спектральной плотности входного потока излучения; $\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_{e\lambda}(\lambda)/\Phi_{e\lambda m}$ – относительное распределение спектральной плотности входного потока излучения.

Этот критерий определяет работоспособность преобразователя.

Выбор объектива, характеризующегося коэффициентом пропускания $\tau(\lambda)$, должен осуществляться по условию максимального значения спектрального КПД χ . По этому условию выбирается и фотоприемник, а именно [5]:

$$\chi = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda) \tau(\lambda) y(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} \tau(\lambda) y(\lambda, T) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda) y_1(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} y_1(\lambda, T) d\lambda}, \quad (8)$$

где $y_1(\lambda, T) = \tau(\lambda) y(\lambda, T)$ – безразмерная величина функции спектральной плотности энергетической светимости на выходе оптического элемента.

Абсолютная спектральная чувствительность фотоприемника S_λ зависит от материала чувствительного слоя и от отдельного экземпляра, а относительная спектральная чувствительность зависит только от материала, и эта характеристика является общей для большого количества фотоприемников [2]. Поэтому эту харак-

теристику удобно использовать на первом уровне выбора фотоприемников.

Длины волн, соответствующие максимальным значениям функций для температур $\theta_1=873$ К; $\theta_2=1273$ К, имеют значения:

$$\lambda_{1\max} = \frac{2896}{\theta_1} = 3,32 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{2\max} = \frac{2896}{\theta_2} = 2,28 \text{ мкм}$$

Практически весь спектр излучения нагретого изделия при некоторой температуре находится в диапазоне от $0,5\lambda_{2\max}$ до $3\lambda_{1\max}$. На основании этого определяется спектральный диапазон измерительного преобразователя:

$$\lambda_{\min} = 0,5\lambda_{2\max} = 1,14 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{\max} = 3\lambda_{1\max} = 9,96 \text{ мкм}$$

Определение оптического коэффициента полезного действия

Зависимость спектральной плотности излучения в относительных единицах для заданных температур [1]. Для проектирования оптико-электронных приборов разработана база данных для оптического материала, источников излучения и фотоприемников [6]. По относительной спектральной чувствительности фоторезистора ФСА (PbS), монокристалла из InSb, Ge:Hg при 30 К [3; 4] и спектральной плотности излучения для АЧТ в относительных единицах при температурах: $\theta_1=1273$ К; 2 – $\theta_2=873$ К; 3 – $\theta_3=773$ К; 4 – $\theta_4=573$ К; 5 – $\theta_5=373$ К, построены графики, определяющие КПД приемников [5] на рис. 1.

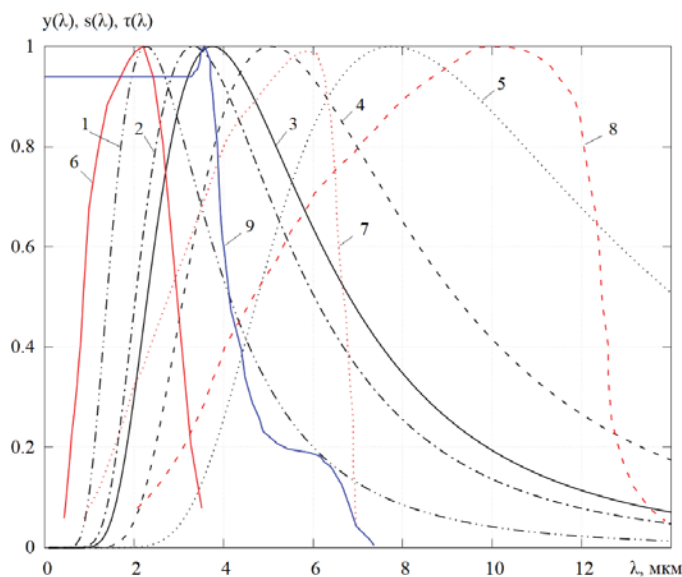


Рис. 1. Графики спектральной плотности излучения для АЧТ в относительных единицах при температурах:

1 – $\theta_1=1273$ К; 2 – $\theta_2=873$ К; 3 – $\theta_3=773$ К; 4 – $\theta_4=573$ К; 5 – $\theta_5=373$ К, относительной спектральной чувствительности фоторезистора: 6 – PbS, 7 – InSb, 8 – Ge:Hg, 9 – силикат

Из выражения (8) и спектральных характеристик на рис. 1 с помощью компьютерной

программы определяем КПД приемников излучения.

Таблица 1

Определение точности КПД фотоприемников с пропускающим оптическим материалом для АЧТ в относительных единицах при температурах

Тип прибора	Фоторезисторы $s(\lambda)$	$\chi_{\text{точн}} (\%)$				
		1273 К	873 К	773 К	573 К	373 К
1	PbS	58,275	37,447	30,403	15,183	2,892
2	InSb	48,642	61,075	64,803	73,139	81,037
3	Ge:Hg	16,970	26,219	29,537	38,538	53,431

С помощью компьютерных программ и программы Gnuplot строится график, изображающий кривые зависимости КПД приемников по формуле (8) от изменения температуры на рис. 2.

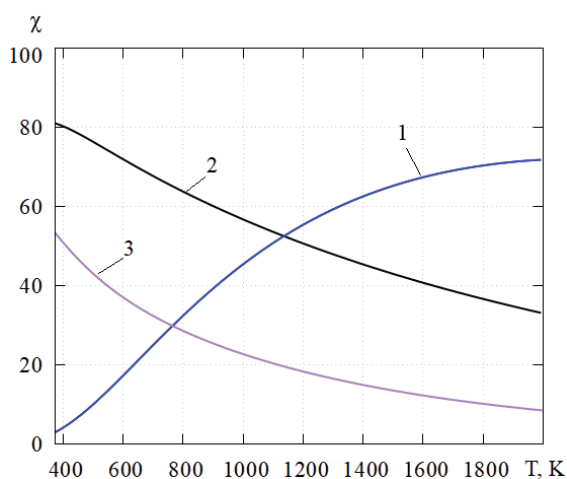


Рис. 2. Кривые зависимости КПД приемников от изменения температуры:
1 — PbS; 2 — InSb; 3 — Ge:Hg

Аппарат нечеткой логики

Необходимо отметить, что для вычисления КПД необходимы спектральные характеристики оптических и оптико-электронных элементов оптико-электронного прибора. Все спектральные относительные характеристики определяются экспериментально, представлены в виде графиков, имеют сложную форму и при-

ведены в справочниках. Поэтому расчеты КПД могут быть выполнены только с помощью численных методов. Для реализации этих методов необходима оцифровка большого количества характеристик, а при морфологическом синтезе осуществляется перебор большого количества элементов, что требует очень большого объема вычислений. Решение этой проблемы возможно при аппроксимации спектральных характеристик трапецидальной формой, для построения которой необходимо четыре координаты, а для узких характеристик возможна аппроксимация треугольной формой с тремя координатами. Математические операции с такими функциями используются в теории нечеткой логики. Для выполнения этих операций разработаны пакеты программ, что позволяет значительно сократить время перебора вариантов с учетом совместности элементов по оптическому КПД. Причем координаты этой функции могут быть выбраны так, что площадь под трапецидальной функцией равна площади под аппроксимируемой функцией. На рис. 3 приведена симметричная трапецидальная функция принадлежности, которая описывается зависимостью [7]:

$$\mu_{A^{(i)}}(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{для } x > z \text{ или } x < y \\ 1 & \text{для } c - \frac{1}{2} \leq x \leq c + \frac{1}{2} \\ s(z - y) & \text{для } y \leq x \leq c - \frac{1}{2} \\ s(z - x) & \text{для } c + \frac{1}{2} \leq x \leq z \end{cases} \quad (9)$$

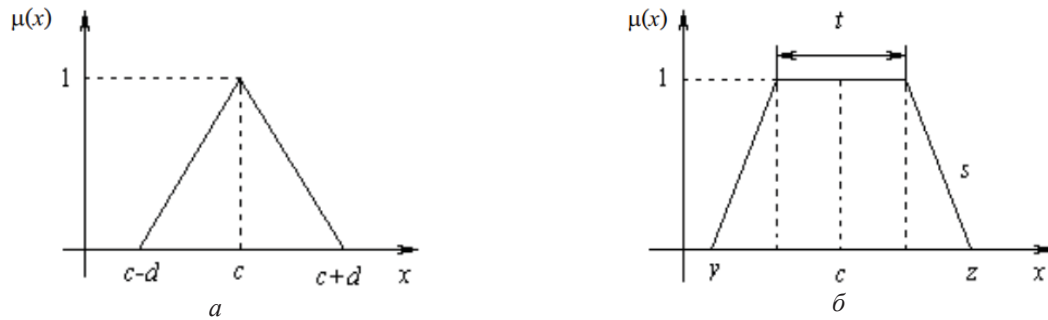


Рис. 3. Функции принадлежности:
а – треугольная; б – трапецидальная

Чтобы ускорить расчеты, упрощаем обработку спектральных плотностей излучения АЧТ, используя аппроксимации трапецевидной по изменению температуры, которые приводят спектральные плотности излучения АЧТ к простому интуитивному приближению с небольшой ошибкой.

Приблизительная спектральная плотность излучения АЧТ трапецией ABCD:

– Прямая АВ касается спектральной характеристики плотности излучения АЧТ на пересечении $y_{\lambda < \lambda_{\max}} = 0.5$ и $y = 0$ и $y = 1$ соответственно.

– Прямая CD касается спектральной характеристики плотности излучения АЧТ на пересечении $y_{\lambda > \lambda_{\max}} = 0.5$ и $y = 1$ и $y = 0$ соответственно.

Положения четырех точек А, В, С, D показаны на рис. 4.

При изменении температуры Т изменится спектральная плотность излучения абсолютно черного тела, а также изменится положение 4-х

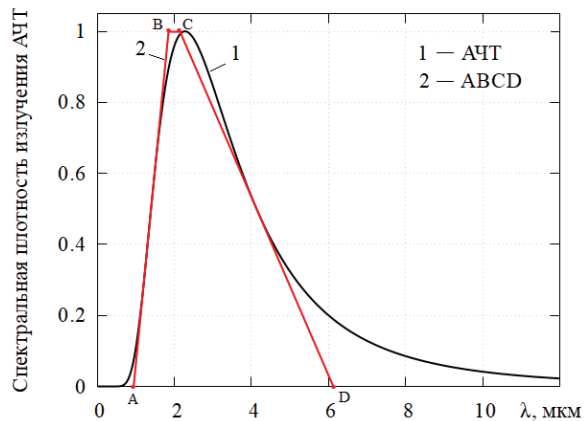


Рис. 4. График спектральной плотности излучения АЧТ по методу трапецевидной аппроксимации

вершин трапеции. Изучим изменение координат этих 4-х точек на λ -оси при изменении температуры Т от 373 до 11273 К. Широкая амплитуда температуры помогает уменьшить погрешность при обработке данных на следующем шаге для нахождения функций зависимости λ_A , λ_B , λ_C , λ_D от температуры Т.

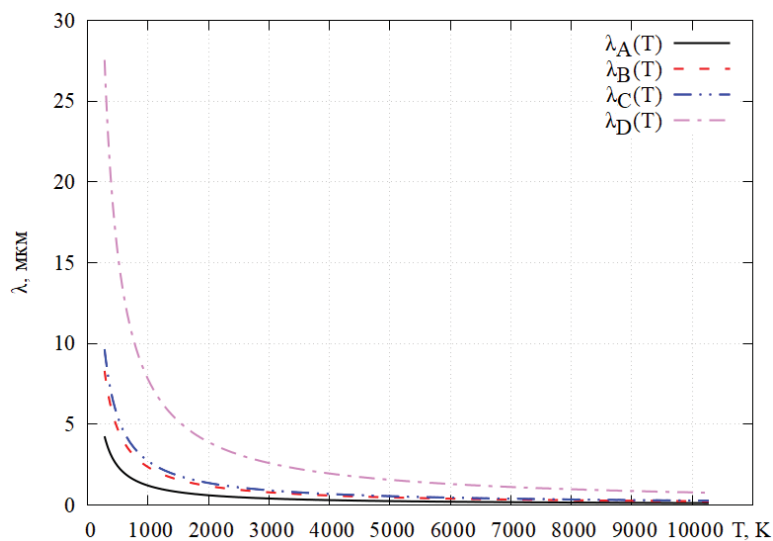


Рис. 5. Графики функций $\lambda_A(T)$, $\lambda_B(T)$, $\lambda_C(T)$, $\lambda_D(T)$ в зависимости от температуры

Из графика на рис. 5 предположим, что функции зависимости λ_A , λ_B , λ_C , λ_D от температуры T имеют тот же вид, что и выражение закона смещения Вина, то есть:

$$\begin{aligned}\lambda_A(T) &= \alpha(T)^{-1} & \lambda_B(T) &= \beta(T)^{-1} \\ \lambda_C(T) &= \gamma(T)^{-1} & \lambda_D(T) &= \rho(T)^{-1}\end{aligned}\quad (10)$$

где α , β , γ , ρ – коэффициенты; T – температура.

С помощью программы *Gnuplot* и ее функ-

ции *fit* получены коэффициенты: $\alpha = 1202,89$, $\beta = 2349,25$, $\gamma = 2729,07$, $\rho = 7795,66$, то есть:

$$\begin{aligned}\lambda_A(T) &= 1202,89(T)^{-1} & \lambda_B(T) &= 2349,25(T)^{-1} \\ \lambda_C(T) &= 2729,07(T)^{-1} & \lambda_D(T) &= 7795,66(T)^{-1}\end{aligned}\quad (11)$$

В диапазоне температур от 373 К до 1273 К аппроксимация дает хорошие результаты с очень низкой погрешностью.

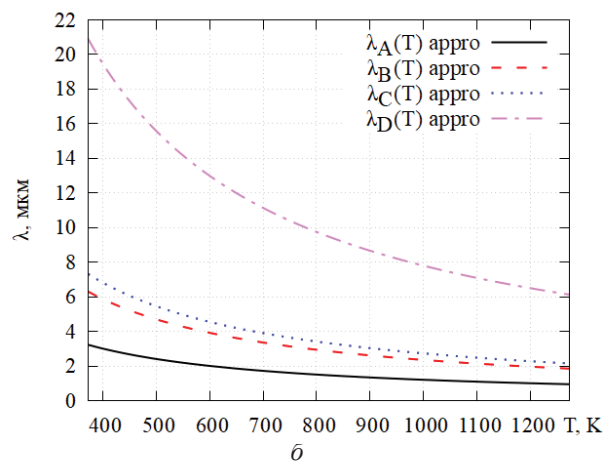
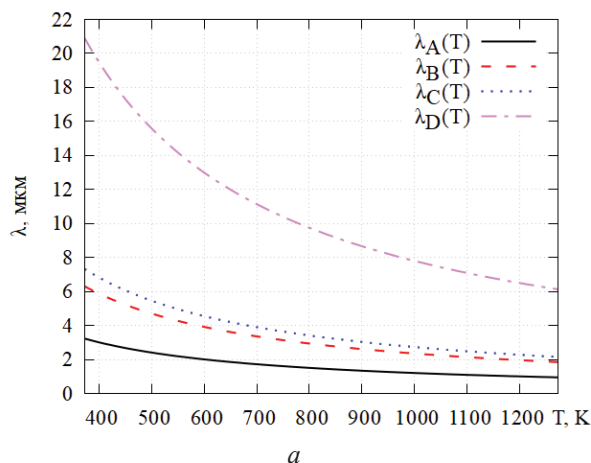


Рис. 6. Графики функций $\lambda_A(T)$, $\lambda_B(T)$, $\lambda_C(T)$, $\lambda_D(T)$ и их аппроксимации в диапазоне температур от 373 К до 1273 К

С помощью языка программирования Dev-C++ получаем результирующий набор точек λ_A , λ_B , λ_C , λ_D при значениях температур

$T_1 = 1273$ К; $T_2 = 873$ К; $T_3 = 773$ К; $T_4 = 573$ К; $T_5 = 373$ К (табл. 2).

Таблица 2

Результирующий набор точек λ_A , λ_B , λ_C , λ_D при заданных значениях температуры

Коэффициент	T_1 1273 К	T_2 873 К	T_3 773 К	T_4 573 К	T_5 373 К
λ_A , мкм	0,94	1,38	1,56	2,10	3,22
λ_B , мкм	1,85	2,69	3,04	4,10	6,30
λ_C , мкм	2,14	3,13	3,53	4,76	7,32
λ_D , мкм	6,12	8,93	10,08	13,61	20,90

По данным табл. 2 можно построить графики спектральной плотности АЧТ, относительной спектральной чувствительности фоторезистора и силикатного оптического материала по методу трапецевидной аппроксимации, представленному на рис. 7.

Например, на рис. 8 приведены приближенные спектральные характеристики фотоприемников – InSb с силикатным оптическим материалом и АЧТ при 1273 К. Отношение площадей под кривыми 4 и 1 – есть коэффициент полезного

действия $\chi = (S_4/S_1)$. С помощью теории нечетких множеств площадь под кривой 4 определяется как логическое произведение множеств площадей под всеми трапецевидальными характеристиками. Этот способ вычисления использует всего несколько точек и поэтому позволяет повысить быстродействие вычислений. Вычисленные таким способом значения χ отличаются от вычисленных с помощью точной формулы значений, но на выбор варианта совместимости эта погрешность не оказывает практического влияния.

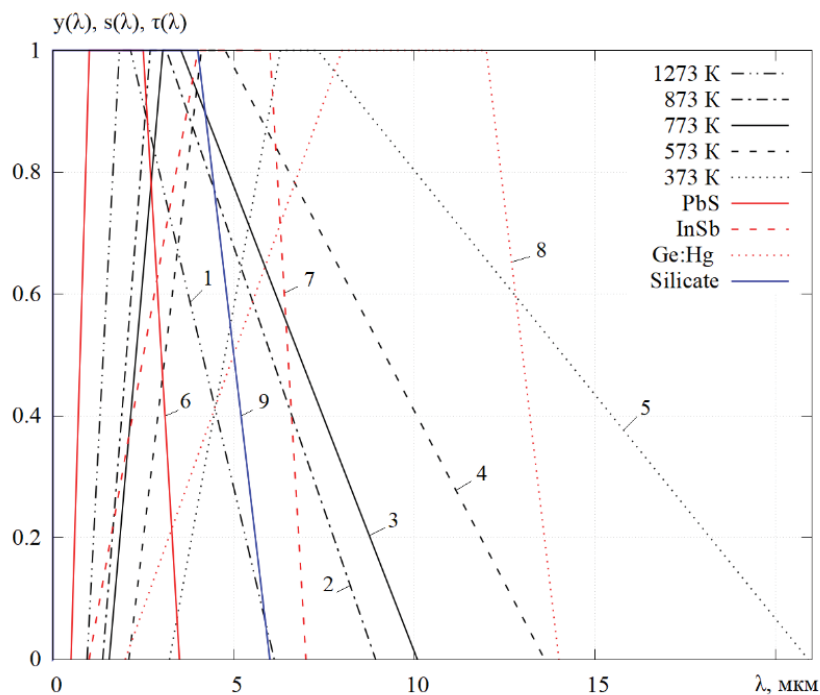


Рис. 7. Графики спектральной плотности излучения для АЧТ в относительных единицах при температурах:
1 – $\theta_1=1273$ K; 2 – $\theta_2=873$ K; 3 – $\theta_3=773$ K; 4 – $\theta_4=573$ K; 5 – $\theta_5=373$ K, 6 – PbS, 7 – InSb, 8 – Ge:Hg и 9 – силикат

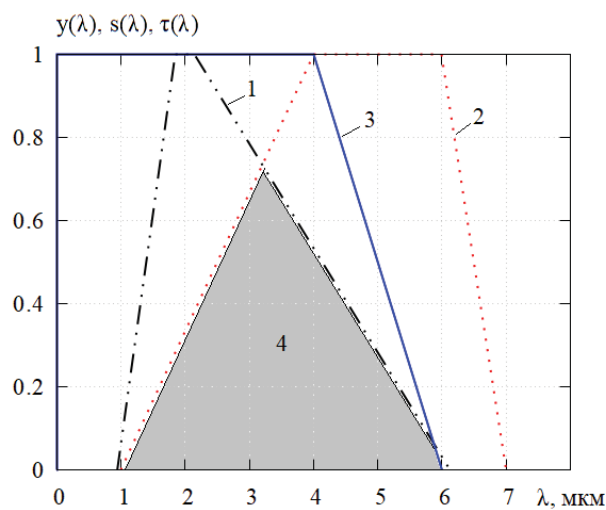


Рис. 8. Графики спектральной плотности излучения для АЧТ при температуре:
1 – 1273 K, приемник: 2 – InSb, пропускающий оптический материал: 3 – силикатный оптический материал

КПД приемников излучения с пропускаемым оптическим материалом согласно табл. 3.

Таблица 3

Определение приближения КПД фотоприемников с пропускающим оптическим материалом для АЧТ в относительных единицах при температурах

Тип прибора	Фоторезисторы $s(\lambda)$	$\chi_{\text{приб}} (\%)$				
		1273 K	873 K	773 K	573 K	373 K
1	PbS	64,75	26,9	18,78	6,02	0,10
2	InSb	76,8	67,5	60,45	35,05	9,10
3	Ge:Hg	34,78	18,40	18,40	18,40	8,90

Абсолютная погрешность:

$$\Delta = |\chi_{\text{приб}} - \chi_{\text{точн}}|, \quad (12)$$

где $\chi_{\text{приб}}$ – коэффициент полезного действия приближения; $\chi_{\text{точн}}$ – коэффициент полезного действия точности.

Относительная погрешность:

$$\delta(\%) = \frac{\Delta}{\chi_{\text{точн}}} \cdot 100 \% = \frac{|\chi_{\text{приб}} - \chi_{\text{точн}}|}{\chi_{\text{точн}}} \cdot 100 \% \quad (13)$$

Результаты расчета абсолютной погрешности и относительной погрешности приемников с пропускаемым оптическим материалом АЧТ при 873 К по формулам (12) и (13) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Абсолютная и относительная погрешность приемников с пропускаемым оптическим материалом АЧТ при заданных значениях температуры

Температура, К	Фоторезисторы s(λ)					
	PbS		InSb		Ge:Hg	
	Δ(%)	δ(%)	Δ(%)	δ(%)	Δ(%)	δ(%)
1273	6,48	11,11	28,16	57,89	17,81	104,95
873	10,55	28,17	6,43	10,52	7,82	29,82
773	11,62	38,23	4,35	6,72	11,14	37,71
573	9,16	60,35	38,09	52,08	20,14	52,25
373	2,79	96,54	71,94	88,77	44,53	83,34

Выводы

Из вышеприведенных расчетов и анализа видно, что у приемника излучения с одним и тем же оптическим материалом, соответствующим разным фотоприемникам (ФСА – PbS, InSb и Ge:Hg), КПД будут меняться. На рис. 2 видно, что КПД фоторезистора ФСА увеличивается с ростом температуры. Напротив, КПД приемников InSb и Ge:Hg снижается с повышением температуры. Поэтому для измерения высоких температур следует применять фотоприемник фоторезистора ФСА, а для измерения низких температурах следует использовать фотоприемник глубоководного фоторезистора Ge:Hg. Метод трапецевидной аппроксимации увеличит скорость обработки, поскольку нужно определить только четыре вершины трапеции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Криксунов, Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л. З. Криксунов. – М.: Сов.радио, 1978. – 400 с., ил.
2. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
3. Ишанин, Г. Г. Приемники оптического излучения: учебник / Г. Г. Ишанин, В. П. Челибанов; под ред. про-

фессора В. В. Коротаева. – СПб.: Изд-во «Лань», 2021. – 304 с.: ил.

4. Ишанин, Г. Г. Приемники излучения: учебное пособие для вузов / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, В. П. Челибанов. – СПб.: Папирус, 2003. – 527 с.

5. Коптелова, И. А. Морфологический синтез оптико-электронных систем измерения размеров нагретых деталей / И. А. Коптелова, А. Н. Шилин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 3. – С. 51–61.

6. Ишанин, Г. Г. Источники и приемники излучения: учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г. В. Польшиков. – СПб.: Политехника, 1991. – 240 с.: ил. – ISBN 5-7325-0164-9.

7. Коптелова, И. А. Использование уравнений совместимости элементов в методике морфологического синтеза оптико-электронных приборов / И. А. Коптелова, А. Н. Шилин, М. В. Гиркин // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 3 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 3). – С. 64–69.

8. Бабичев, А. П. Справочник / Физические величины / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. – ISBN 5-283-04013-5.

9. Брамсон, М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. В 2 т. – М.: Наука, 1964. – 318 с.

10. Шейндлин, А. Е. Излучательные свойства твердых материалов: справочник. Под общ. ред. А. Е. Шейндлина. – М.: «Энергия», 1974. – 472 с.