

Метод установки заданной облученности от модели чёрного тела*А. И. Патрашин, К. В. Козлов, В. С. Ковшов, А. В. Никонов, В. А. Стрельцов*

Рассмотрен метод установки заданной облученности, создаваемой моделью черного тела (МЧТ) в произвольной плоскости. Метод основан на использовании нового параметра – коэффициента излучения МЧТ. Коэффициент излучения МЧТ – это отношение потоков излучения (квантового или энергетического), исходящих соответственно от излучающей площадки и от бесконечно большой излучающей плоскости с той же температурой и степенью черноты, но падающих в заданную точку параллельной плоскости. Данный параметр позволяет просто и корректно определить величину облученности в заданной точке плоскости, отстоящей от МЧТ на заданном расстоянии. МЧТ может иметь излучающую площадку с любой заданной формой, размерами, температурой и степенью черноты. Приведен вывод аналитических выражений коэффициента излучения и облученности, создаваемой МЧТ. Рассмотрены облученности, создаваемые МЧТ с круглыми и квадратными диафрагмами и распределения облученности по площади. Показано, что отличие облученностей от МЧТ с равновеликими круглой и квадратной излучающими площадками близко к одному проценту. На основе предложенного метода расчета облученности предложен метод установки заданной облученности и неоднородности облученности от МЧТ.

Ключевые слова: облученность, МЧТ, круглая диафрагма, квадратная диафрагма, распределение облученности по площади, неоднородность облученности, метод установки заданной облученности.

Введение

Модель черного тела (МЧТ) – устройство, используемое в качестве источника излучения в целом ряде применений. МЧТ играют большую роль в экспериментальной ИК-фотонике и используются для создания облученности с известным спектральным распределением [1–4]. Их спектр излучения, спектральная мощность излучения и спектральная плотность фотонов точно описываются аналитически [5]. Эти устройства выпуска-

ются различными производителями (MİKRON, IMPAC, ИОФ СО РАН и др.). Главными их характеристиками являются температура излучения, степень черноты в заданном спектральном диапазоне, форма и размеры излучающей площадки.

МЧТ имеют круглую или прямоугольную (в частности, квадратную) формы излучающих площадок. Размеры круглых площадок лежат в диапазоне 0,1–80 мм, а у квадратных площадок в диапазоне 40–300 мм. Спектральный диапазон излучения МЧТ распространяется от 1,5–1,6 мкм до 15–25 мкм. Температуры излучающих площадок МЧТ лежат в диапазоне от –40 °С до 3 000 °С. Коэффициент черноты излучающих площадок находится в диапазоне 0,97–0,994. Все выпускаемые МЧТ паспортизованы и метрологически аттестованы по температуре, коэффициенту черноты и размеру излучающей площадки.

Основными устройствами, в которых применяется МЧТ, являются стенды измерения фотоэлектрических характеристик одиночных инфракрасных (ИК) фотоприемников и ИК матричных фотоприемных устройств (ИК МФПУ), стенды калибровки фотопреобразователей и др.

С помощью МЧТ устанавливаются сигнальную и/или фоновую нагрузку на фотоприемник при

Патрашин Александр Иванович¹, в.н.с., к.ф.-м.н.

Козлов Кирилл Владимирович¹, инженер 1 кат., к.ф.-м.н.

Ковшов Владимир Сергеевич^{1,2}, инженер, студент.

Никонов Антон Викторович^{1,2}, нач. НИЦ, доцент, к.ф.-м.н.

Стрельцов Вадим Александрович^{1,2}, инженер, студент.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(государственный университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 19 июня 2018 г.

© Патрашин А. И., Козлов К. В., Ковшов В. С., Никонов А. В.,
Стрельцов В. А., 2018

измерении его амперваттной, вольтовой или температурной чувствительности, ограниченной шумом облученности, мощности, разности температур, а также при определении удельной обнаружительной способности и динамического диапазона. Эта нагрузка (облученность) имеет два вида – фотонная или энергетическая.

В настоящее время, в связи с некоторыми практическими задачами, возникает необходимость измерения фотоэлектрических характеристик ИК полупроводниковых фотопреобразователей (ФЭПП) или ИК матричных фотоприемных устройств (МФПУ) при **заданной** фотонной или энергетической облученности в **заданном** спектральном диапазоне. Поэтому целью данной работы была разработка способа установки заданной облученности от любого МЧТ в заданном спектральном диапазоне.

Нормативный метод расчета заданной облученности

В единственном нормативном источнике Российской Федерации описан метод расчета потока излучения (энергетического) от МЧТ первого типа, используемого для измерения параметров одиночного или многоэлементного фотоприемника [6]. Метод расчета основан на использовании закона Стефана-Больцмана. Согласно этому методу, стационарный поток излучения Φ , Вт, от МЧТ температурой $T_{\text{МЧТ}}$, К, падающий на приёмную площадку фотоприемника площадью A , см², отстоящую от излучающей площадки МЧТ величиной F , см², на расстоянии L , см, равен

$$\Phi = \frac{\sigma_P (\varepsilon_1 T_{\text{МЧТ}}^4 - \varepsilon_0 T_0^4) FA}{\pi L^2}, \quad (1)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \times 10^{-12}$ Вт см⁻² К⁻⁴;

ε_1 – степень серости излучения МЧТ;

ε_0 – степень серости заслонки МЧТ;

T_0 – температура заслонки (фонового излучения), К.

Формула (1) выражает превышение потока излучения от МЧТ над потоком излучения от заслонки. Это превышение используется для измерения фотоэлектрических характеристик фотоприемников при модулированном излучении, когда приращение потока излучения вызывает приращение сигнала на выходе фотоприемника. Выражение (1) не позволяет рассчитать облученность в заданном спектральном диапазоне и ее распределение по площадке.

Для стационарного потока излучения МЧТ формула (1) должна быть скорректирована с теми же обозначениями в следующем виде:

$$\Phi_{\text{МЧТ}_P} = \frac{\sigma_P \varepsilon_1 T_{\text{МЧТ}}^4 FA}{\pi L^2}. \quad (2)$$

В [6] отсутствует упоминание о фотонном потоке излучения МЧТ. Позволим себе восполнить эту недостачу, которая важна при измерении отдельных параметров фотонных приемников.

Поток излучения (фотонный) от МЧТ первого типа, падающий на приёмную площадку фотоприемника или на матрицу фоточувствительных элементов (МФЧЭ), можно выразить с помощью формулы, описывающей закон Стефана-Больцмана для фотонов [5], в следующем виде:

$$\Phi_{\text{МЧТ}_N} = \frac{\sigma_N \varepsilon_1 T_{\text{МЧТ}}^3 FA}{\pi L^2}, \quad (3)$$

где $\sigma_N = 1,52 \times 10^{11}$ фот с⁻¹ см⁻² К⁻³ – постоянная Стефана-Больцмана (фотонная).

Все остальные обозначения, как в формуле (1).

В [6] также указывается, что выражение (1) с погрешностью не более 1 % справедливо для расстояний от МЧТ до МФЧЭ, l , см, удовлетворяющих следующему соотношению:

$$l \geq 5\sqrt{F}. \quad (4)$$

Выражения (1), (2) и (3) справедливы, когда размеры фоточувствительной площадки малы по отношению к расстоянию l , а сама площадка расположена на нормали к центру излучающей площадки МЧТ и параллельна ей. В [6] отсутствует какое-либо упоминание о величине потока излучения, падающего на площадку, расположенную вне нормали к излучающей площадке МЧТ.

Из вышесказанного следует, что существующий нормативный метод расчета облученности должен быть усовершенствован, чтобы описывать оба вида облученности и их распределение по плоскости регистрации на любых расстояниях от МЧТ с излучающей площадкой произвольной формы и размеров в заданном спектральном диапазоне. В этом случае можно будет разработать корректный метод установки заданной облученности от МЧТ.

Коэффициент излучения МЧТ

Для получения аналитического выражения, описывающего облученность и её распределение по плоскости регистрации, рассмотрим произ-

вольную МЧТ, например, с круглой излучающей площадкой радиуса R . Её излучение можно рассматривать, как излучение МЧТ с температурой $T_{\text{МЧТ}}$ и степенью черноты $\varepsilon_{\text{МЧТ}}$. Геометрия задачи показана на рис. 1.

Пусть излучающая площадка МЧТ $S'(x', y')$ имеет ламбертовское распределение излучения и постоянную температуру $T_{\text{МЧТ}}$. Плоскость регистрации $S(x, y)$ параллельна плоскости излучающей площадки $S'(x', y')$ и отстоит от нее на рассто-

янии L . Рассчитаем облученность в произвольной точке плоскости регистрации облученности $S(x, y)$.

Спроектируем бесконечно малый элемент dS' излучающей площадки МЧТ $S'(x', y')$ на бесконечно малый элемент dS плоскости $S(x, y)$. Проектирование проведем вдоль линии, соединяющей точку $A(x, y)$, в которой необходимо определить заданную облученность, и произвольную точку $C(x', y')$ излучающей площадки МЧТ $S'(x', y')$.

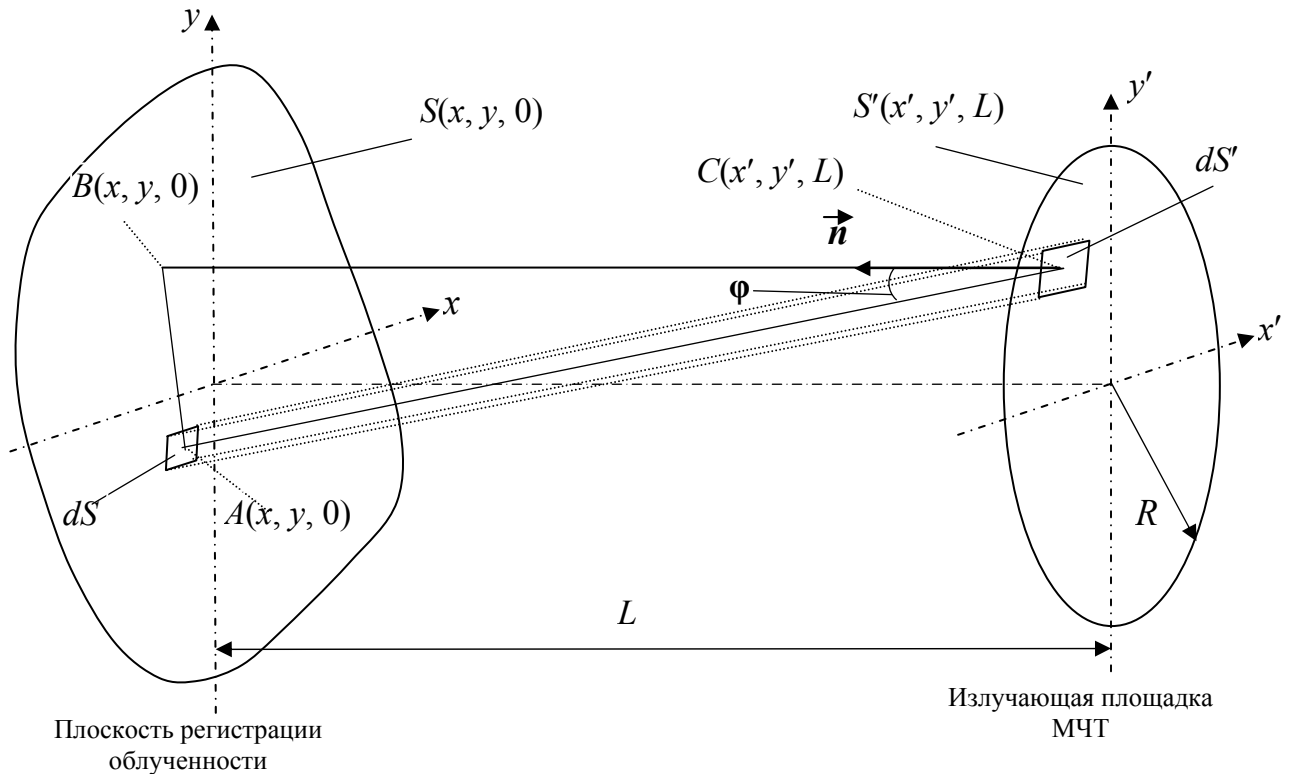


Рис. 1. Геометрия задачи расчета коэффициента излучения МЧТ.

Мощность излучения (или количество квантов в единицу времени) в спектральном интервале $d\lambda$, попадающее на бесконечно малый элемент плоскости регистрации dS от элемента излучающей площадки МЧТ с площадью dS' с температурой $T_{\text{МЧТ}}$ будет определяться следующим фундаментальным соотношением из радиометрии [5]:

$$dW = \varepsilon_{\text{МЧТ}} M_{2\pi}(T_{\text{МЧТ}}, \lambda) \frac{1}{\pi} \frac{\cos^2 \varphi}{AC^2} dS' dS, \quad (5)$$

где AC – длина прямой, см, соединяющей точку $A(x, y)$ в плоскости S и точку $C(x', y')$ в плоскости S' ; φ – угол между нормалью к плоскости $S'(x', y')$ и прямой BC ;

$\varepsilon_{\text{МЧТ}}$ – степень черноты излучающей площадки МЧТ;

$M_{2\pi}(T_{\text{МЧТ}}, \lambda)$ – спектральная энергетическая светимость МЧТ, Вт см⁻² мкм⁻¹ или спектральная фотонная светимость МЧТ, фотон см⁻² с⁻¹ мкм⁻¹,

являющаяся подынтегральной функцией в выражениях, описывающих с помощью закона Планка [5] энергетическую или фотонную облученности от МЧТ с бесконечно большой излучающей площадкой.

$$P(T_{\text{МЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T_{\text{МЧТ}}}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (6)$$

$$N(T_{\text{МЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T_{\text{МЧТ}}}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (7)$$

где $c = 2,998 \times 10^{10}$ см с⁻¹ – скорость света;

$k_B = 1,381 \times 10^{-23}$ Вт с К⁻¹ – постоянная Больцмана;

$h = 6,626 \times 10^{-34}$ Вт с² – постоянная Планка;

$\lambda_1; \lambda_2$ – границы спектрального диапазона, в котором необходимо получить заданную облученность, см.

Суммируя излучатели dS' по всей излучающей площадке МЧТ $S(x', y', L)$, получим, что спектральная плотность интегральной облученности бесконечно малого элемента dS плоскости $S(x, y)$ равна

$$\begin{aligned} E(x, y, L, T_{\text{МЧТ}}, \lambda) &= \frac{1}{dS} \iint_{S'} dW = \\ &= \varepsilon_{\text{МЧТ}} M_{2\pi} \times \\ &\times (T_{\text{МЧТ}}, \lambda) \frac{1}{\pi} \iint_{S'} \frac{\cos^2 \varphi(x, y, L, x', y')}{AC^2} dS'. \end{aligned} \quad (8)$$

Для нахождения $\cos \varphi$ рассмотрим прямоугольный треугольник ABC на рис. 1, в котором BC и AB – катеты, а AC – гипотенуза.

$$W(x, y, L, T_{\text{МЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) = \iint_{S'} \frac{L^2 dS'}{\pi [L^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2]^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\text{МЧТ}} M_{2\pi}(T_{\text{МЧТ}}, \lambda) d\lambda. \quad (12)$$

Интеграл по длинам волн в выражении (8) описывает интегральную облученность в диапазоне $[\lambda_1; \lambda_2]$ от бесконечно большой излучающей поверхности и определяется выражениями (6) или (7). Тогда из отношения облученности $W(x, y, L, T, \lambda_1; \lambda_2)$ к интегральной облученности мы получим общее выражение для **коэффициента излучения МЧТ**, которое будет нам необходимо для последующих расчетов.

$$\begin{aligned} K_{\text{излМЧТ}}(x, y, L) &= \\ &= \iint_{S'} \frac{L^2 dS'}{\pi [L^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2]^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где S' – излучающая площадка МЧТ произвольной формы.

Следует отметить, это выражение совпадает с выражением коэффициента ослабления излучения холодной диафрагмой МФПУ [7], что вполне справедливо.

Сравнение результатов расчета облученности

Напомним, что коэффициент излучения МЧТ определяется как отношение мощностей потоков, исходящих от излучающей площадки МЧТ и от

$$AC^2 = L^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2 \quad (9)$$

$$\cos^2 \varphi = \frac{BC^2}{AC^2} = \frac{L^2}{L^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2}. \quad (10)$$

Подставим (9) и (10) в (8), получим спектральную плотность облученности плоскости регистрации в точке А.

$$\begin{aligned} E(x, y, L, T_{\text{МЧТ}}, \lambda) &= \\ &= \varepsilon_{\text{МЧТ}} M_{2\pi}(T_{\text{МЧТ}}, \lambda) \times \\ &\times \frac{1}{\pi} \iint_{S'} \frac{L^2 dS'}{[L^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2]^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение для облученности в точке $A(x, y, 0)$ получится интегрированием выражения (11) в заданном спектральном диапазоне $[\lambda_1; \lambda_2]$.

бесконечно большой излучающей плоскости с той же температурой, но попадающих в заданную точку плоскости регистрации, отстоящей от излучающей площадки МЧТ на расстоянии L . Величина коэффициента излучения МЧТ всегда меньше единицы.

Выражения $K_{\text{излМЧТ}}(x, y, L)$ для МЧТ с круглой и прямоугольной излучающими площадками имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} K_{\text{излМЧТ}}(x, y, L) &= \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{L^2 \rho}{[L^2 + (\rho \cos \varphi - x)^2 + (\rho \sin \varphi - y)^2]^2} d\rho d\varphi \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} K_{\text{излМЧТ}}(x, y, L) &= \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{L^2}{[L^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2]^2} dx' dy'. \end{aligned} \quad (15)$$

Коэффициент излучения МЧТ – безразмерная величина, позволяющая легко вычислить облученность в заданном спектральном диапазоне в любой заданной точке плоскости регистрации, параллельной излучающей площадке МЧТ. Облученность вычисляется умножением коэффициента

излучения МЧТ на интегральную облученность от МЧТ с бесконечно большой излучающей площадью (выражения (6) и (7)) в заданном спектральном диапазоне.

$$W_{\Phi}(x, y, L, T_{\text{МЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) = K_{\text{излМЧТ}}(x, y, L) \varepsilon_{\text{МЧТ}} N(T_{\text{МЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) \quad (16)$$

$$W_{\Xi}(x, y, L, T_{\text{МЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) = K_{\text{излМЧТ}}(x, y, L) \varepsilon_{\text{МЧТ}} P(T_{\text{МЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2). \quad (17)$$

В случае установки в оптический канал оптических элементов (оптические окна, полосовые и нейтральные светофильтры) в интегральной облученности от МЧТ с бесконечно большой излучающей площадью учитывается спектр пропускания $K_{\text{ср}}(\lambda)$, равный произведению их спектров

пропускания, который вводится в подинтегральные функции выражений (6) и (7).

Следует отметить, что предлагаемый метод позволяет точно рассчитывать облученность от МЧТ с излучающей плоскостью любого размера, расположенной даже на небольших расстояниях от плоскости МФЧЭ, во всех точках фотоприемной плоскости также любого размера в заданном спектральном диапазоне. Доказательством этого утверждения служит метод вывода величины коэффициента излучения МЧТ, в котором используются лишь точные формулы без каких-либо приближений.

Для оценки корректности нового метода расчета мы сравнили рассчитанные величины облученностей $\Phi_{\text{МЧТ}}/A$, Вт см⁻², или фот с⁻¹ см⁻² обоими методами в точках, расположенных на оптической оси МЧТ. Результаты показаны в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение нормативного и предложенного методов

Радиус излучающей площадки МЧТ, R , см	0,06	0,12	0,24	0,4
Площадь излучающей площадки МЧТ, F , см ²	0,011	0,045	0,18	0,5
Минимально возможное расстояние от МЧТ до плоскости регистрации [6], L , см	0,56	1,13	2,26	3,76
Угол из центра плоскости регистрации к краям излучающей площадки МЧТ, α , град.	12,2	12,2	12,2	12,2
Максимальная облученность в центре плоскости регистрации при $T_{\text{МЧТ}} = 500 \text{ K}$, $W_{\text{МЧТ}_P}$, Вт м ⁻² :				
нормативный метод	$3,94 \times 10^{-3}$	$3,94 \times 10^{-3}$	$3,94 \times 10^{-3}$	$3,94 \times 10^{-3}$
предложенный метод	$3,90 \times 10^{-3}$	$3,90 \times 10^{-3}$	$3,90 \times 10^{-3}$	$3,90 \times 10^{-3}$
$W_{\text{МЧТ}_N}$, фот с ⁻¹ см ⁻² :				
нормативный метод	$2,11 \times 10^{17}$	$2,11 \times 10^{17}$	$2,11 \times 10^{17}$	$2,11 \times 10^{17}$
предложенный метод	$2,09 \times 10^{17}$	$2,09 \times 10^{17}$	$2,09 \times 10^{17}$	$2,09 \times 10^{17}$
Относительная разность облученностей, рассчитанных в центре плоскости регистрации, Δ , %	1	1	1	1

В табл. 1 показаны результаты расчета максимальной облученности $W_{\text{МЧТ}} = \Phi_{\text{МЧТ}}/A$, рассчитанные нормативным и предложенным методом в центре плоскости регистрации при $T_{\text{МЧТ}} = 500 \text{ K}$, а также относительные разности облученностей, %, рассчитанные по формуле

$$\Delta = \frac{W_{\text{МЧТ}1} - W_{\text{МЧТ}2}}{W_{\text{МЧТ}1}}. \quad (18)$$

Приведены также и минимальные расстояния L [6] между МЧТ с малой излучающей площадкой с $T_{\text{МЧТ}} = 500 \text{ K}$ и плоскостью регистрации, определяемые выражением (4), апертурные углы из центра плоскости регистрации к краям излучающей площадки МЧТ, α , рассчитанные по формуле

$$\alpha = 2 \arctg\left(\frac{R}{L}\right), \quad (19)$$

где R – радиус излучающей площадки МЧТ, см.

Результаты расчета предложенным методом практически совпадают с результатами расчета

нормативным методом [6]. Полученные результаты указывают на корректность предложенного метода расчета облученности.

Возможности нового метода расчета облученности от МЧТ

Полученные выражения (14), (15), (16) и (17) практически представляют собой новый метод расчета облученности от МЧТ, имеющий гораздо более широкие возможности.

Представленный метод позволяет рассчитать неоднородность облученности плоскости регистрации, ΔW , которая определяется по стандартной формуле:

$$\Delta W_{\text{МЧТ}}(x, y, L, R) = \frac{W(0, 0, L, R) - W(x, y, L, R)}{W(0, 0, L, R)} \quad (20)$$

где x, y – координаты точки, относительно которой рассчитывается неоднородность облученности.

Обычно выбирают угловую точку облучаемой площадки.

Метод позволяет рассчитывать распределение энергетической и фотонной облученности от МЧТ с произвольной формой излучающей площадки, расположенной на любом расстоянии от плоскости регистрации. Приведем несколько примеров в спектральном диапазоне 8–10,6 мкм. Переход к

любому другому диапазону потребует лишь замену численных значений λ_1 и λ_2 в выражениях (6) и (7).

На рис. 2 показано распределение энергетической облученности в плоскости регистрации от четырех МЧТ (см. табл. 1). Это распределение построено по диагонали площадки длиной 1,24 см, эквивалентной МФЧЭ формата 640×512 с шагом 15 мкм и размерами 9,7×7,7 мм.

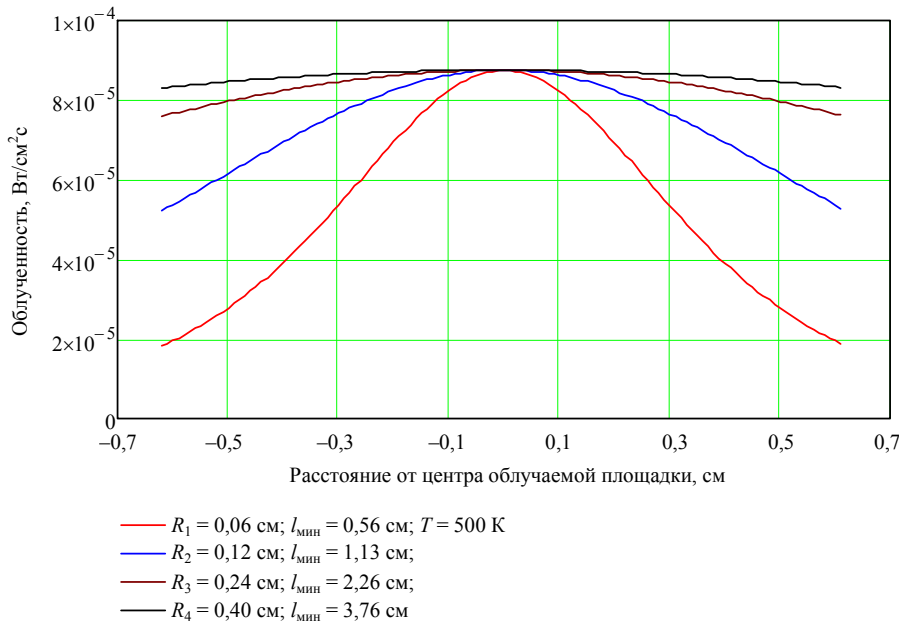


Рис. 2. Распределение облученности по плоскости регистрации.

Распределения облученности по площади, несмотря на одинаковую облученность в центре площадки, совершенно разные. Максимальная неоднородность облученности наблюдается у МЧТ с минимальными диафрагмой и расстоянием до облучаемой площадки.

На рис. 3 приведены распределения облученности от МЧТ с большой квадратной излучающей площадкой размером $a = b = 4$ см для четырех расстояний до плоскости регистрации. Коэффициент излучения определялся выражением (15).

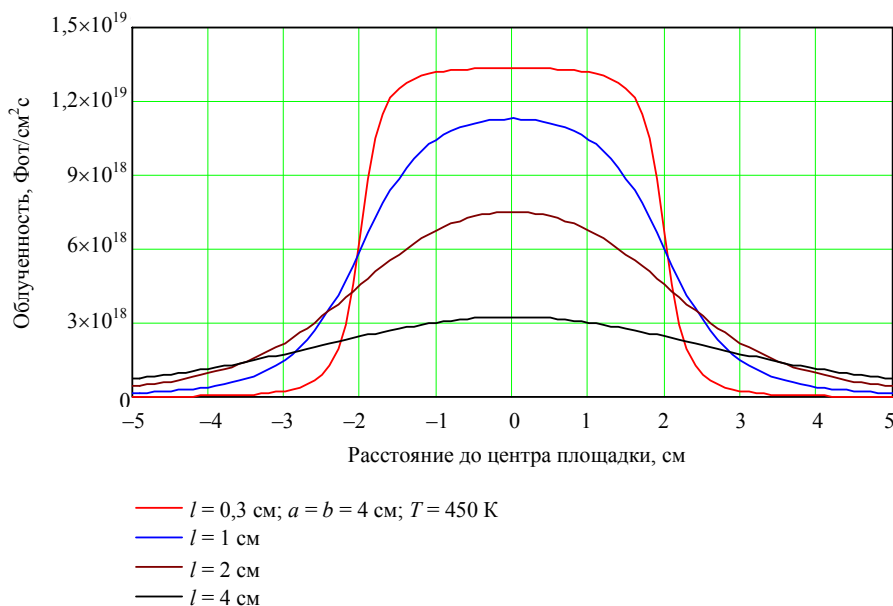


Рис. 3. Распределение облученности по площади для четырех расстояний плоскости регистрации от МЧТ с квадратной диафрагмой.

На рис. 4 показаны зависимости энергетической облученности от МЧТ с разными радиусами и одинаковыми температурами от расстояния до облучаемой плоскости.

Представлены зависимости для всей гаммы размеров круглых излучающих площадок. Кривые имеют общее максимальное значение, которое определяется температурой МЧТ, и выплощение

графика, зависящее от соотношения между радиусом излучающей площадки и расстоянием от нее.

Чтобы подтвердить влияние температуры МЧТ на максимальное значение облученности, рассмотрим зависимости фотонной облученности от расстояния до плоскости регистрации, изображенные на рис. 5 с фиксированным размером и разными температурами излучающей площадки.

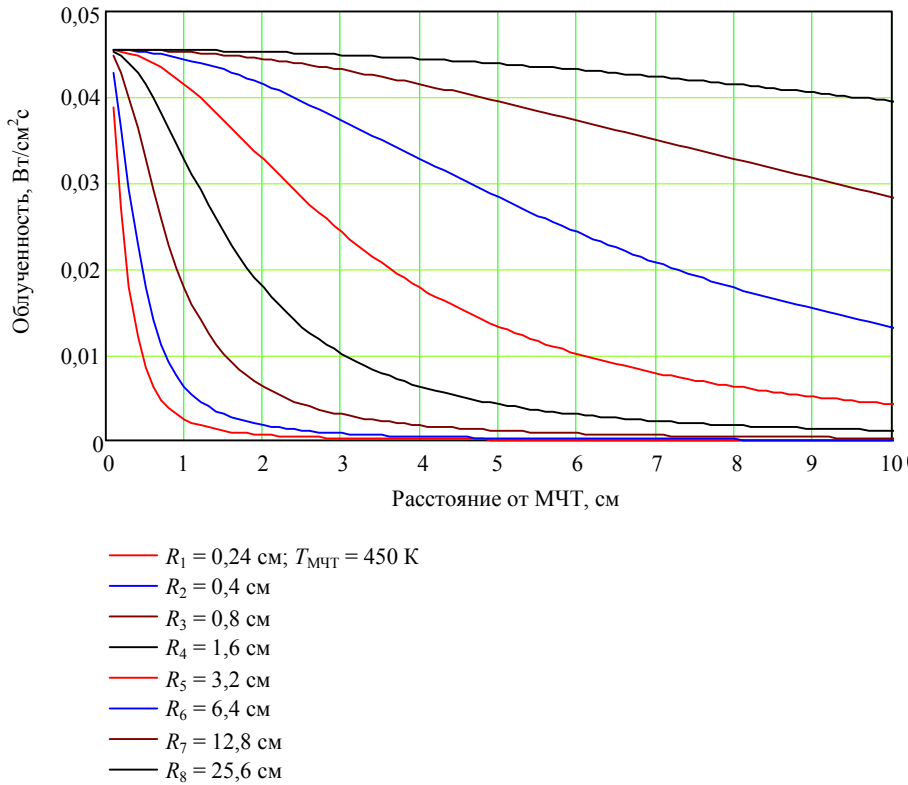


Рис. 4. Зависимость облученности в центре плоскости от расстояния до МЧТ с разными радиусами излучающих площадок.

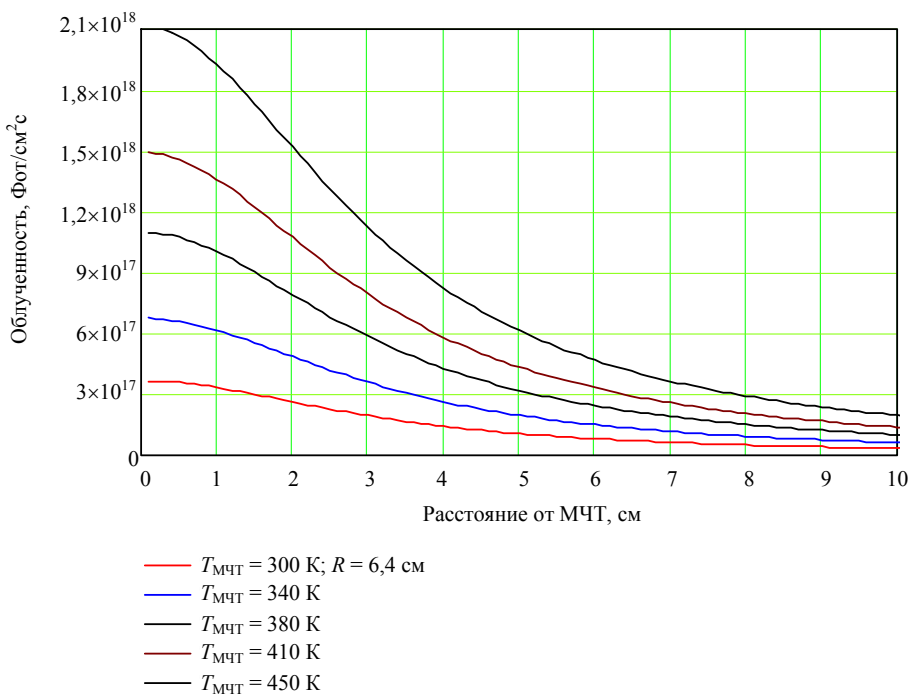


Рис. 5. Зависимость облученности в центре плоскости от расстояния до МЧТ с разными температурами излучающей площадки.

Максимумы кривых сдвинуты друг относительно друга. Этот сдвиг, как показали расчеты, равен изменению облученности, обусловленной изменением температуры МЧТ при постоянном размере излучающей площадки.

Также представляет интерес соотношение облученностей от двух МЧТ с равновеликими излучающими площадками круглой и квадратной формы.

Радиус круглой излучающей площадки МЧТ в этом случае определяется следующим выражением:

$$R(a,b) = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} \quad (21)$$

где a, b – стороны квадратной диафрагмы.

На рис. 6 показаны сравнительные зависимости облученности в точке $M(0,0)$ плоскости регистрации от расстояния до МЧТ. Показаны результаты расчетов для двух МЧТ с равновеликими излучающими площадками (квадратной и круглой). Одна площадка имеет размеры 10×10 см, а другая – радиус $R = 5,642$ см. Из графика следует практически полное соответствие облученностей.

Для уточнения на рис. 7 показаны результаты расчета зависимости относительной разности облученностей этих же МЧТ с $T_{\text{МЧТ}} = 450$ К от расстояния до центра плоскости регистрации. Отно-

сительная разность облученностей описывается следующим выражением:

$$\Delta_{\text{МЧТ}} = \frac{W_{\text{кр}}(0,0,L,R(a,b)) - W_{\text{кв}}(0,0,L,a,b)}{W_{\text{кр}}(0,0,L,R(a,b))}. \quad (22)$$

Из результатов, показанных на графике, следует, что относительная разность облученностей 1,2 % во всем диапазоне размеров излучающих площадок МЧТ. Иначе говоря, величины облученностей в центре плоскости регистрации практически равны друг другу при облучении МЧТ с равновеликими квадратными или круглыми излучающими площадками.

Таким образом, показано, что предлагаемый метод расчета облученности от МЧТ позволяет корректно рассчитывать как энергетическую облученность, так и фотонную облученность, распределение облученности по плоскости регистрации и однородность облученности по площадке заданного размера при любой форме излучающей площадки и любом расстоянии до плоскости регистрации, причем в любом спектральном диапазоне, а также любые другие зависимости облученности МЧТ.

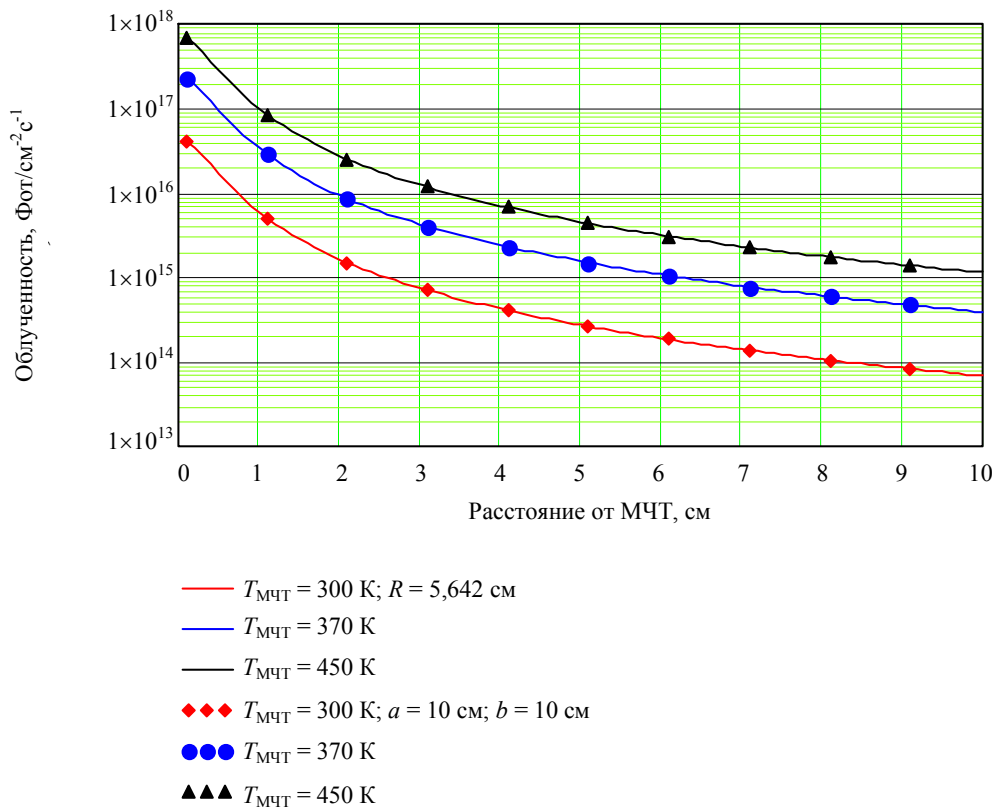


Рис. 6. Сравнительные зависимости облученности в точке $M(0,0)$ плоскости регистрации от расстояния до МЧТ для равновеликих круглых и квадратных излучающих площадок.

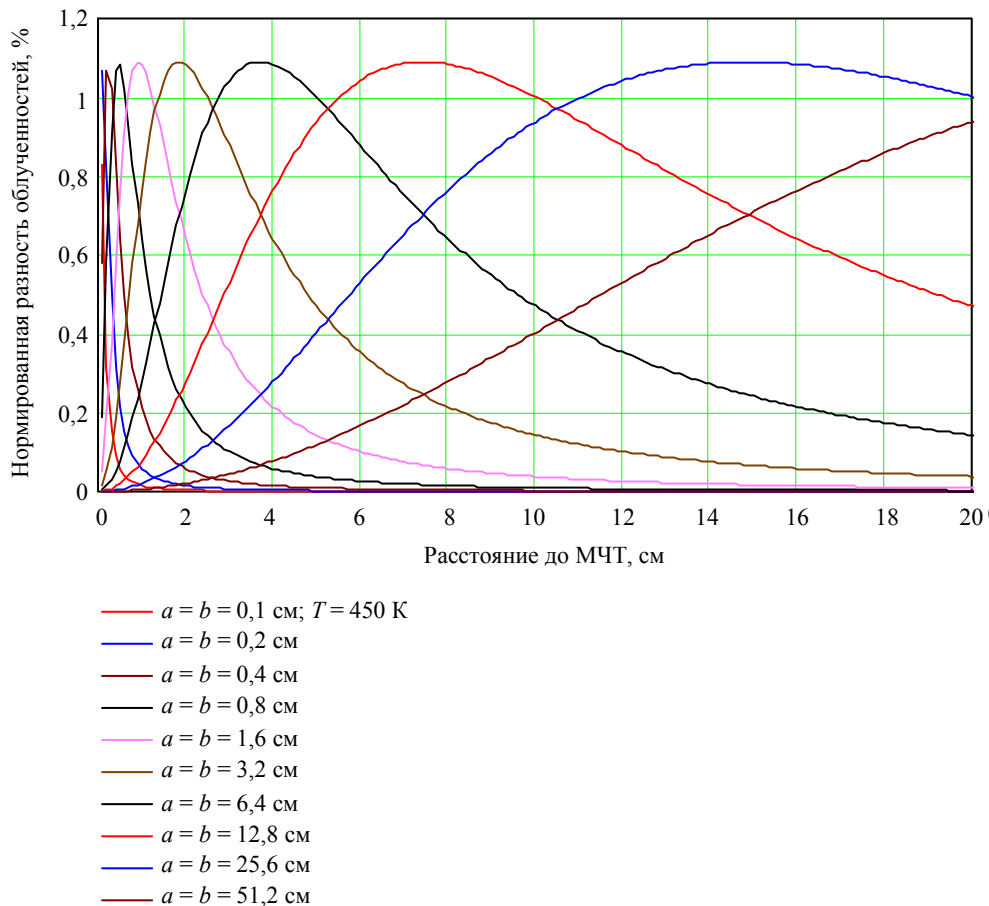


Рис. 7. Зависимость относительной разности облученностей МЧТ с равновеликими круглыми и квадратными излучающими площадками.

Выведенные аналитические выражения позволили разработать новый метод установки заданной облученности от МЧТ на стандартном стенде измерения характеристик ИК МФПУ.

Метод установки заданной облученности от МЧТ

Метод установки заданной облученности может быть реализован с помощью стандартного стенда измерения характеристик ИК МФПУ. Такие стенды включают, как минимум, следующие составные части:

1. МЧТ, аттестованная по температурам, размерам и степени черноты излучающей площадки, с блоком питания и установки температуры.
2. Модулятор излучения для МЧТ с малой, относительно расстояния до МФЧЭ, излучающей площадкой.
3. Держатель, позволяющий установить МФПУ соосно с МЧТ.
4. Блок питания, вырабатывающий необходимые для работы МФПУ и МКС постоянные, импульсные и тактовые напряжения.
5. Блок первичной обработки сигналов МФПУ, принимающий импульсные сигналы ФЧЭ

и постоянные сигналы от датчиков температуры МФПУ, выдающий выходные сигналы, согласованные с последующими устройствами.

6. ПЭВМ, осуществляющая управление работой МФПУ и реализующая расчеты, необходимые для установки заданной облученности.

Для реализации данного метода была разработана соответствующая компьютерная программа автоматизированного расчета, позволяющая получить необходимые для получения заданной облученности величины температуры $T_{\text{МЧТ}}$ и расстояния L .

Стенд позволяет регулировать, как минимум, либо температуру $T_{\text{МЧТ}}$, либо расстояние L от МЧТ до плоскости, в которой расположена матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ).

Все ИК МФПУ включают вакуумированный или газонаполненный корпус с оптическим окном, в котором расположена сборка БИС-МФЧЭ, окруженная, если это необходимо, охлажденным светоизолирующим экраном с диафрагмой, закрытой охлажденным светофильтром.

Теперь представим следующую задачу: необходимо измерить фотоэлектрические характеристики МФПУ, у которого сигнальная облучен-

ность центральных ФЧЭ должна быть равна $N_{\text{МЧТ}} = 4 \times 10^{13}$ фот $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в спектральном диапазоне 3,4–4,9 мкм, который задается его светофильтром.

Светофильтр в спектральной полосе имеет средний коэффициент пропускания 0,91. Просветленное германиевое окно МФПУ имеет пропускание 0,92 в том же спектральном диапазоне.

Форма холодной диафрагмы МФПУ обеспечивает обзор любым ФЧЭ всей излучающей площадки МЧТ.

Суммарное пропускание оптического канала от МЧТ до МФЧЭ (произведение коэффициентов пропускания входного окна и светофильтра ФПУ) $K_{\text{сф}} = 0,8372$ в спектральном диапазоне чувствительности.

МЧТ имеет диапазон установки температуры от 350 К до 1 000 К, радиус излучающей площадки $R = 0,4$ см, степень черноты МЧТ $\varepsilon = 0,99$. Излучение МЧТ модулируется. В соответствии с [6] модулятор имеет коэффициент формы модуляции $\beta = 0,42$.

Установка заданной облученности выполняется следующим образом:

1. Включаем ПЭВМ стенда, запускаем программу установки облученности.
2. Вводим в программу следующие параметры:
 - диапазон рабочих температур МЧТ $T_{\text{МЧТ}} = 370\text{--}500$ К;
 - радиус излучающей площадки МЧТ $R = 0,4$ см;
 - степень черноты МЧТ $\varepsilon = 0,99$;
 - коэффициент формы модуляции $\beta = 0,42$;
 - спектральную полосу пропускания светофильтра 3,4–4,9 мкм;
 - суммарную величину пропускания оптического канала $K_{\text{сф}} = 0,8372$;
 - диапазон возможных для используемого стенда расстояний между излучающей пло-

щадкой МЧТ и плоскостью регистрации облученности $L = 10\text{--}60$ см;

- заданную величину фотонной облученности $N_{\text{МЧТ}} = 4 \times 10^{13}$ фот $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

3. Рассчитываем с помощью программы установки облученности зависимость расстояния между излучающей площадкой МЧТ и плоскостью регистрации облученности (МФЧЭ) от температуры МЧТ при заданной величине облученности. Эта зависимость показана на рис. 8.

4. Получаем диапазон расстояний между излучающей площадкой МЧТ и плоскостью регистрации облученности, а также диапазон возможных температур МЧТ.

5. Выбираем и вводим в ПЭВМ выбранную величину температуры МЧТ $T_{\text{МЧТ}} = 410$ К.

6. ПЭВМ автоматически рассчитывает необходимое расстояние между плоскостью излучающей площадки МЧТ и плоскостью МФЧЭ $L = 16,36$ см, которое обеспечивает получение фотонной облученности $N_{\text{МЧТ}} = 4 \times 10^{13}$ фот $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в плоскости МФЧЭ (регистрации), при температуре $T_{\text{МЧТ}} = 410$ К, с учетом поглощения во входном окне и светофильтре МФПУ.

7. Устанавливаем МФПУ в держатель стенда.

8. Юстируем держатель так, чтобы ось излучающей площадки МЧТ проходила через центр МФЧЭ.

9. Подключаем МФПУ к аппаратуре стенда.

10. Устанавливаем заданную температуру $T_{\text{МЧТ}} = 410$ К, при которой мы получим заданную величину облученности в плоскости МФЧЭ.

11. Устанавливаем определенное с помощью ПЭВМ расстояние от излучающей площадки МЧТ до плоскости МФЧЭ $L = 16,36$ см.

12. Проводим измерение фотоэлектрических характеристик МФПУ при заданной величине облученности в плоскости МФЧЭ. Цель достигнута.

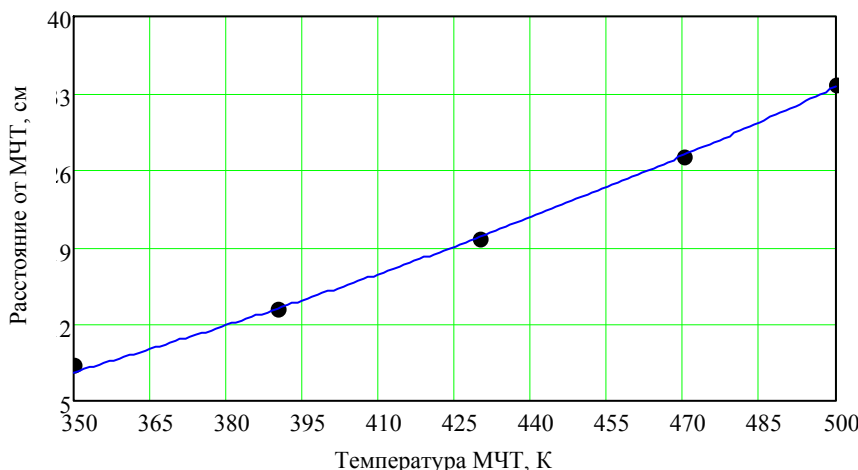


Рис. 8. Зависимость расстояния между плоскостями МЧТ и МФЧЭ от температуры МЧТ при условии сохранения заданной облученности ФЧЭ в центре матрицы $N_{\text{ФЧЭ}} = 4 \times 10^{13}$ фот $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Аналогичную процедуру можно выполнить и для установки заданной величины энергетической облученности. В этом случае ПЭВМ рассчитывает аналогичную задачу для энергетической облученности, описанной выражениями (6), (14) и (16).

В пунктах 5–12 можно поменять местами $T_{\text{МЧТ}}$ и L . Тогда будет задаваться расстояние до МЧТ и определяться температура излучающей площадки МЧТ.

Представленный метод позволяет обеспечить заданную величину фотонной или энергетической облученности в плоскости регистрации (плоскость МФЧЭ) в любом заданном спектральном диапазоне и для любых типов МЧТ.

Заключение

Предлагаемый метод установки облученности МЧТ позволяет получить заданную величину облученности в плоскости МФЧЭ, необходимую для измерения фотоэлектрических характеристик МФПУ, и тем самым расширяет возможности исследователей.

Метод расчета облученности от МЧТ по своим результатам эквивалентен методу, изложенному в ГОСТ 17772-88, и фактически расширяет его возможности.

Метод расчета облученности от МЧТ позволяет корректно рассчитать как энергетическую облученность, так и фотонную облученность, распределение облученности по плоскости регистрации и однородность облученности по площадке заданного размера при любой форме излучающей площадки и любом расстоянии до плоскости регистрации, причем в любом спектральном диапазоне, а также любые другие зависимости облученности МЧТ с учетом пропускания оптического канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов А. В. Опτικο-электронные приборы (Основы теории и расчета). Источники излучения. – М.: «Энергия», 1974.
2. Zissis G. J. Sources of Radiation. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Vol. 1. – SPIE Optical Engineering Press. 1993.
3. Козелкин В. В., Усольцев И. Ф. Основы инфракрасной техники. — М.: Изд. «Машиностроение», 1967.
4. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. – М.: Изд. «Высшая школа», 1974.
5. Daniels A. Field Guide to Infrared Systems. Vol. FG09 – SPIE Field Guides, 2006.
6. ГОСТ 17772-88. Приложение 4. Госкомитет СССР по стандартам. – М.: Изд. стандартов, 1988.
7. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 123.

PACS: 85.60.Gz, 44.40 +a, 07.57.Kp, 42.88. +h

The BB's specified irradiation setting method

A. I. Patrashin¹, K. V. Kozlov¹, V. S. Kovshov^{1,2}, A. V. Nikonov^{1,2}, and V. A. Streltsov^{1,2}

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received June 19, 2018

The BB's specified irradiation setting method has developed. It is based on introducing new parameter named "BB's radiation coefficient". It equals to the ratio of the irradiance from the BB in a given point of the parallel registration plane to the irradiance in the same point from the infinite irradiant area with the same temperature. This parameter allows simple and correct defining the irradiation value in the specified point of the plane with specified distance from BB. BB's radiative area can be any shape, size, temperature and emissivity. The analytical expressions are showed for explaining the BB's irradiation and radiation coefficient. The irradiations of BB with circular and square radiative area and irradiations distributions had been analyzed. The difference between irradiations of BB with equivalent circular and square radiative areas is near one percent. The BB's specified irradiation setting method has introduced.

Keywords: irradiation, black body model, , МЧТ, circular diaphragm, squared diaphragm, area irradiation distribution, inhomogeneity of irradiation, given irradiance setting method.

REFERENCES

1. A. V. Pavlov, *Optical-Electronic Devices* (Energiya, Moscow, 1974) [in Russian].
2. G. J. Zissis, *Sources of Radiation. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Vol. 1.* (SPIE Optical Engineering Press, 1993).
3. V. V. Kozelkin and I. F. Usoltsev, *Foundations of IR Devices* (Izd. Mashinostroenie, Moscow, 1967) [in Russian].
4. N. A. Soboleva and A. E. Melamid, *Photo Electronic Devices* (Vysshaya Shkola, Moscow, 1974) [in Russian].
5. A. Daniels, *Field Guide to Infrared Systems, Vol. FG09* (SPIE Field Guides, 2006).
6. *GOST 17772-88, Prilozhenie 4. Goskomitet SSSR po Standartam.* (Moscow, Izd. Standartov, 1988) [in Russian].
7. A. I. Patrashin, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 123 (2010).