

---

УДК 537.32



*Кокодий Н.Г.*

**Кокодий Н.Г., доктор физ.-мат. наук,  
професор<sup>1,2</sup>,  
Разиньков В.В., канд. физ.-мат. наук<sup>3</sup>**



*Разиньков В.В.*

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет  
имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, Харьков, 61022, Украина;

<sup>2</sup>Национальный фармацевтический  
университет, ул. Пушкинская,

53, Харьков, 61002, Украина, *e-mail: kokodiyng@gmail.com;*

<sup>3</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина, *e-mail: anatyach@gmail.com*

---

## **ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТРИЧНЫЙ ПРИЕМНИК ОПТИЧЕСКОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЙ**

---

*Матричный приемник электромагнитного излучения предназначен для работы в ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и терагерцевом диапазонах спектра. Размеры входного окна приемника – 20 x 20 мм. Количество элементов матрицы – 36. Чувствительность приемника – 8 В/Вт в оптическом диапазоне и 2-4 В/Вт в терагерцевом диапазоне. Максимальная интенсивность излучения – 4 Вт. Библиография, рис. 14, табл. 2.*

**Ключевые слова:** лазер, излучение, приемник, термоэлектрический, матрица.

### **Введение**

Сейчас происходит активное освоение средней и дальней областей инфракрасного диапазона (5-100 мкм) и примыкающей к ней области терагерцевого (субмиллиметрового) диапазона (100-1000 мкм). Интерес к ним возобновился после длительного перерыва. Это связано со специфическими возможностями, которые можно реализовать в этих диапазонах спектра:

1. Создание очень узких пучков излучения для радиосвязи и радиолокации (с шириной диаграммы направленности в доли миллирадиан). В радиолокации это обеспечивает пространственную разрешающую способность до нескольких сантиметров, в радиосвязи – возможность передачи информации без опасности ее утечки.
2. Намного большая, чем в сантиметровом и миллиметровом диапазонах информационная емкость каналов связи.
3. Использование в системах безопасности для обнаружения пластиковых взрывчатых веществ и оружия.
4. Для обнаружения в космосе объектов с температурой в десятки кельвин, излучающих в терагерцевом диапазоне, например, астероидов.
5. Для диагностики высокотемпературной плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза.

Очень важной характеристикой пучков излучения является их профиль (распределение

в поперечном сечении). Зная его, можно определить другие параметры пучка – энергию импульса, мощность излучения, диаметр пучка, положение его энергетического центра.

Проблема измерения профиля пучка излучения полностью решена для видимой, ближней инфракрасной и средней инфракрасной областей спектра (0.4-10 мкм). В фирмах COHERENT (США), OPHIR (США - Германия – Япония – Израиль), PRIMES и PROMETEC (Германия) разработаны приборы, использующие фотоэлектрические матрицы, матрицы на тепловых приемниках (термопары, пироэлектрические приемники) и сканирующие приемники.

Фотоэлектрические матрицы предназначены для работы с узкими пучками излучения (от 5 до 30 мм) и малыми мощностями (до 1 Вт) в спектральном диапазоне от 0.2 до 1 мкм. Матрицы на тепловых приемниках предназначены для работы с пучками излучения от 20 до 100 мм при мощности излучения от 1 мВт до 10 кВт в спектральном диапазоне от 0.2 мкм до 10 мкм. Сканирующие приборы предназначены для работы в фокальной области пучка, а также в пучках диаметром до 50 мм в спектральном диапазоне от 0.2 до 1 мкм.

Измерение характеристик излучения лазеров в терагерцовом диапазоне является еще не решенной проблемой лазерной метрологии. Известны приборы для работы в этом диапазоне, разработанные фирмой OPHIR – **Pyrocam III HR** и **Pyrocam IV** (рис. 1) [1]. Стоимость приборов большая – около \$30000. Характеристики приборов показаны в табл. 1.



Рис. 1. Приборы Pyrocam III HR и Pyrocam IV.

Таблица 1

Характеристики приборов Pyrocam III HR и Pyrocam IV

Прибор	Pyrocam III HR	Pyrocam IV
Спектральный диапазон	13-355 нм 1.06-3500 мкм	13-355 нм 1.06-3500 мкм
Входное окно	12.8 x 12.8 мм	25.6 x 25.6 мм
Количество элементов	160 x 160	320 x 320

В Институте термоэлектричества НАН и МОН Украины были разработаны матричные термоэлектрические приемники для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра (рис. 2) [2].



Рис. 2. Матричный приемник энергии излучения  
Института термоэлектричества  
НАН и МОН Украины.

Матрица со входным окном 16 x 16 мм содержит 256 элементов - полупроводниковых термопар размерами 1 x 1 мм. Спектральный диапазон приемника – от 0.4 мкм до 10 мкм, чувствительность – 100 мВ/Дж. Приемник рассчитан на измерение энергии импульса излучения. Мощность непрерывного излучения таким приемником измерять затруднительно. Причина этого следующая.

Из теории тепловых измерительных приборов известно, что их чувствительность по мощности  $S_p$  и чувствительность по энергии  $S_E$  связаны следующим соотношением:

$$S_p = S_E \cdot \tau,$$

где  $\tau$  – тепловая постоянная времени. Время установления показаний приемника равно  $4\tau$ . При чувствительности по энергии  $S_E = 100$  мВ/Дж и тепловой постоянной времени  $\tau = 0.75$  с, чувствительность по мощности получается равной  $S_p = 75$  мВ/Вт. Если считать, что уровень сигнала с приемника должен быть не меньше 1 мВ, то минимальная измеряемая мощность равна около 15 мВт, в то время как многие лазерные и светодиодные источники имеют значительно меньшую мощность излучения - несколько милливатт.

### Матричный приемник для измерения непрерывной мощности лазерного излучения

Для измерений непрерывной мощности лазерного излучения в Институте термоэлектричества НАН и МОН Украины был разработан измерительный преобразователь, в котором элементами матрицы служат полупроводниковые термоэлектрические приемники излучения с чувствительностью по мощности в оптическом диапазоне около 8 В/Вт.

Общий вид приемника показан на рис. 3.



Рис. 3. Матричный термоэлектрический приемник непрерывного излучения.

Размер входного окна приемника 20 x 20 мм. Количество элементов матрицы – 36. Схема приемного элемента показана на рис. 4. Приемная площадка элемента (1) – пластинка из феррита  $Fe_2(V_{1-x}Ti_x)Al$  размерами 3 x 3 мм и толщиной 0.3 мм. К тыльной стороне ферритовой пластинки через слой теплопроводящего клея (2) толщиной 15-20 мкм и слой припоя ПОС-61 (3) толщиной 50 мкм подсоединяются «горячие» спаи батареи полупроводниковых термопар (4) на основе  $BiTe$ , полученных методом экструзии. Длина термоэлектрического элемента 14.2 мм, размер торца  $p-n$  пары 0.38 x 0.19 мм. «Холодные спаи» батареи через слой припоя (5) и слой теплопроводящего клея (6) подсоединяются к пластинке из керамики (7) толщиной 0.63 мм, которая лежит на медном основании (9). Тепловой контакт между пластинкой и основанием обесперчивается слоем припоя (8) толщиной 50 мкм.

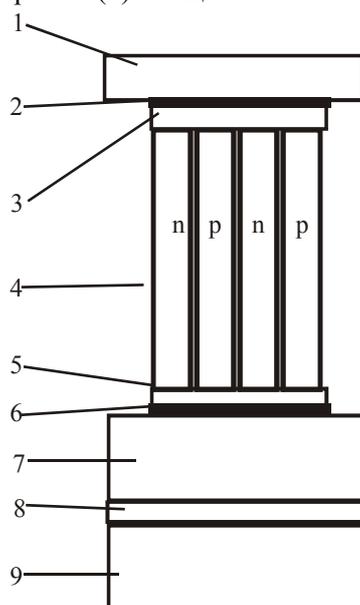


Рис. 4. Схема элемента матричного приемника.

На рис. 5а показана нумерация элементов матрицы (вид на матрицу спереди, по ходу луча лазера). В используемом при проведении экспериментов аналого-цифровом преобразователе Е14-140 есть 32 канала. Поэтому сигналы с угловых элементов матрицы не измерялись (рис. 5б). Их значения определялись с помощью интерполяции.

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36

а)

	1	2	3	4	
5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28
	29	30	31	32	

б)

Рис. 5. Матрица приемника излучения:  
а – элементы матрицы, б – номера каналов АЦП.

## Исследования приемника

### Неравномерность чувствительности термопар

На каждый из элементов матрицы наводился луч лазера диаметром около 1 мм и измерялся электрический сигнал, генерируемый термопарами этого элемента. Мощность излучения лазера контролировалась. Результаты измерений показаны на рис. 6. По оси абсцисс отложены номера термопар, по оси ординат – чувствительность каждой из батарей термопар по мощности  $S_p$ .

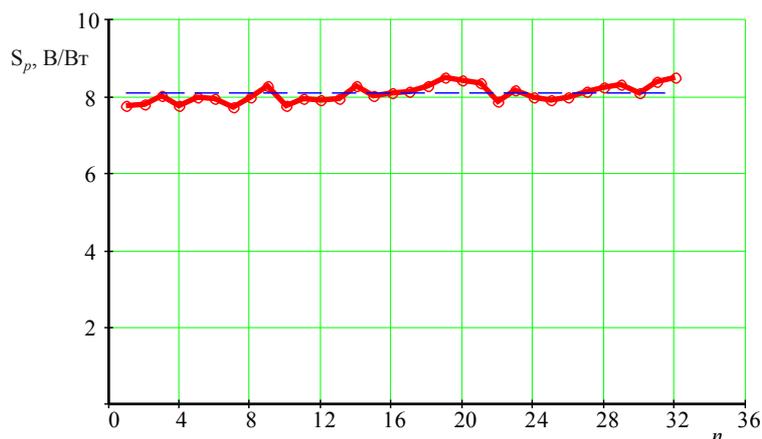


Рис. 6. Чувствительности термопар приемника.

Разброс величины чувствительности – примерно 5 % от среднего значения:

$$S_{p\text{ ср}} = 8.07 \pm 0.01 \text{ В/Вт.}$$

При обработке результатов измерений учитывалась чувствительность каждой термопары.

### Динамический диапазон приемника

#### Нижний предел измерений

Нижний предел измерений определяется дрейфом нуля при прогреве приемника, смещением нуля при случайных изменениях температуры окружающей среды, наводками от сети питания и других посторонних источников, внутренними шумами аналого-цифрового преобразователя.

Типичный вид сигнала с приемника излучения мощностью вблизи нижнего предела измерений показан на рис. 7. В течение 60 с записывался «нуль» сигнала. В течение следующих 60 с на приемник подавалось излучение, а затем излучение прекращалось и приемник остывал.

Ширина шумовой дорожки с учетом редких выбросов вверх и вниз составляет около 2 мВ, что при чувствительности приемника 8 В/Вт соответствует мощности 0.25 мВт. Для уверенного измерения необходимо, чтобы сигнал превышал шум, как минимум, в 10 раз. На рис. 7 представлена примерно такая ситуация:

1. Шум:  $U_0 = -0.77 \pm 0.07$  мВ.
2. Излучение:  $U_1 = 9.14 \pm 0.09$  мВ.
3. Сигнал:  $U = U_1 - U_0 = 9.9 \pm 0.1$  мВ.
4. Относительная погрешность измерения сигнала:  $\Delta U = 1.4$  %.

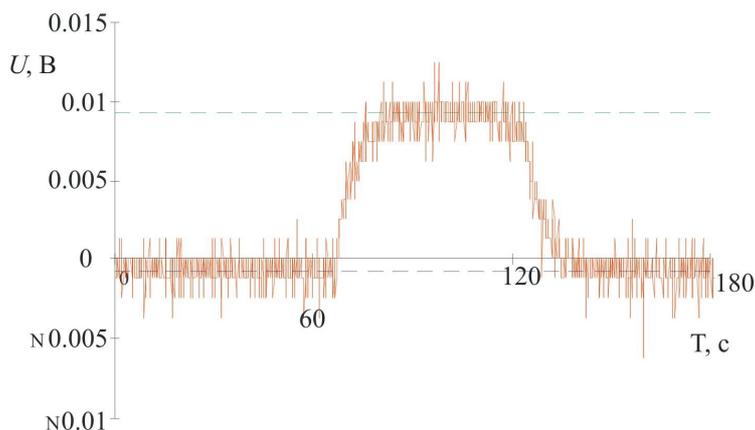


Рис. 7. Сигнал с элемента матричного приемника.

Примерно такой же будет и относительная погрешность измерения мощности излучения, попавшего на данный элемент матрицы, то есть:

$$P = 79 \pm 1 \text{ мВт.}$$

Небольшая погрешность результата измерений при большом уровне шума объясняется усреднением по большому числу данных (от 400 до 600) при вычислении значений  $U_0$  и  $U_1$ .

Таким образом, нижний предел измерений матричным приемником при шуме, соответствующем мощности излучения 0.25 мВт, равен приблизительно 10 мВт.

### Верхний предел измерений

Верхний предел измерений определяется порогом разрушения ферритовой пластинки, служащей приемным элементом излучения, и температурой плавления припоя в соединениях «горячих» спаев термопар.

Для его оценки была решена тепловая задача, описывающая нагрев элемента матрицы [3]. Геометрия задачи показана на рис. 4. Слои теплопроводящего клея, припоя и керамики очень тонкие. Поэтому их наличие можно не учитывать, и элемент матрицы считать двухслойным – состоящим из ферритовой пластинки и полупроводниковых термопар.

Излучение лазера интенсивностью  $I$  падает на ферритовую пластинку. К ней подходят «горячие» спаи батареи термопар. «Холодные» спаи находятся на керамической пластинке и поддерживаются при постоянной температуре.

Уравнение теплопроводности при установившейся температуре имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} = 0, \quad (1)$$

где  $T$  – температура в точке с координатой  $x$ .

Начальная температура:

$$T_{1нач} = T_{2нач} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $T_1$  и  $T_2$  – температура феррита и термопары, соответственно.

Граничное условие на поверхности приемного элемента с координатой  $x = 0$  описывает ситуацию, когда излучение поглощается в бесконечно тонком поверхностном слое. Происходит кондуктивный отвод тепла внутрь тела (коэффициент теплопроводности  $k_1$ ) и конвективный отвод тепла во внешнюю среду (коэффициент теплообмена  $\alpha$ ):

$$k_1 \frac{dT_1(0)}{dx} = -I + \alpha T_1(0). \quad (3)$$

В месте соединения термопар с теплоотводом ( $x = L$ ) поддерживается начальная температура:

$$T_2(L) = 0. \quad (4)$$

В месте контакта феррита и термопары ( $x = l$ ) граничное условие описывает непрерывность температуры и потока тепла:

$$T_1(l) = T_2(l), \quad (5)$$

$$k_1 \frac{dT_1(l)}{dx} = k_2 \frac{dT_2(l)}{dx}. \quad (6)$$

Здесь  $T_1$  и  $k_1$  – температура в ферритовой пластинке и ее теплопроводность;  $T_2$  и  $k_2$  – температура в термопаре и ее теплопроводность.

Решение уравнения (1) при граничных условиях (3) – (6) выглядит так:

$$T(x) = \begin{cases} T_1(x) & \text{при } 0 \leq x \leq l \\ T_2(x) & \text{при } l < x \leq L \end{cases}, \quad (7)$$

где

$$T_1(x) = I \frac{k_1(L-l) + k_2(l-x)}{k_1 k_2 + \alpha[k_1(L-l) + k_2 l]}, \quad T_2(x) = I \frac{k_1(L-x)}{k_1 k_2 + \alpha[k_1(L-l) + k_2 l]}. \quad (8)$$

На рис. 8 показан график распределения температуры вдоль оси  $x$  при следующих значениях параметров:

$$I = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2, \quad l = 0.3 \text{ мм}, \quad L = 14.5 \text{ мм}, \\ k_1 = 4.2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, \quad k_2 = 1.38 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, \quad \alpha = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

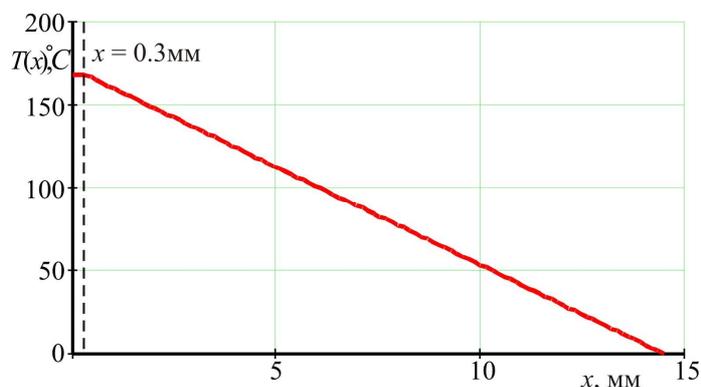


Рис. 8. Распределение температуры в элементе матрицы.

Значение интенсивности излучения выбрано таким, чтобы в месте контакта термопар с ферритовой пластинкой температура нагрева была равна  $160^\circ \text{C}$ , что при температуре внешней среды  $20^\circ \text{C}$  создает в этом месте температуру плавления припоя ПОС-61, равную  $180^\circ \text{C}$ .

Интенсивность излучения при этом должна быть равной  $2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ . Она получается при мощности излучения, попавшего на приемник, 8 Вт. При этом температура поверхности ферритовой пластинки – около  $200^\circ \text{C}$ .

Для безопасной работы приемника необходимо, чтобы температура его поверхности не превышала  $100^\circ \text{C}$ . Это будет при мощности излучения около 4 Вт.

### Амплитудная характеристика

Источником излучения служила проекционная лампа накаливания с мощностью излучения до 5 Вт. Зависимость величины сигнала с приемника от мощности излучения показана на рис. 9. По оси ординат отложена сумма значений сигналов со всех элементов матрицы. В этом диапазоне мощностей амплитудная характеристика приемника линейная.

Чувствительность приемника по мощности в видимом диапазоне –  $6.2 \pm 0.5$  В/Вт.

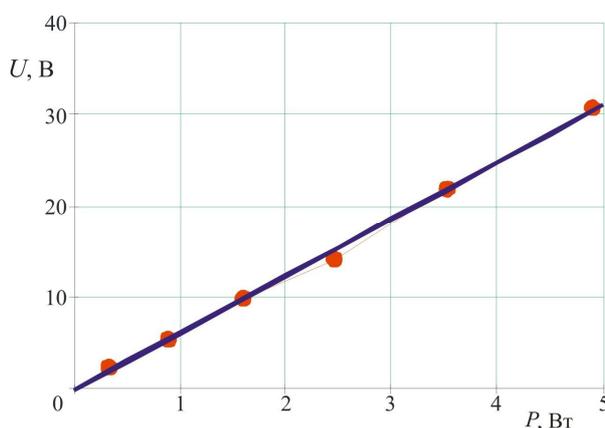


Рис. 9. Амплитудная характеристика матричного приемника.

### Постоянная времени

На приемник подавалось излучение проекционной лампы накаливания. Мощность излучения – 0.75 Вт. Световое пятно - горизонтальный эллипс с большой осью 16 мм, малой осью 10 мм.

Снималась зависимость сигнала с термопары  $U$  от времени. На рис. 10 точками показаны результаты измерений. Сплошная линия – аппроксимация этой зависимости функцией

$$U(t) = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Обработка по методу наименьших квадратов дает:  $\tau = 4.3$  с. Время установления показаний  $t_{уст}$  равно  $4\tau = 17.2$  с.

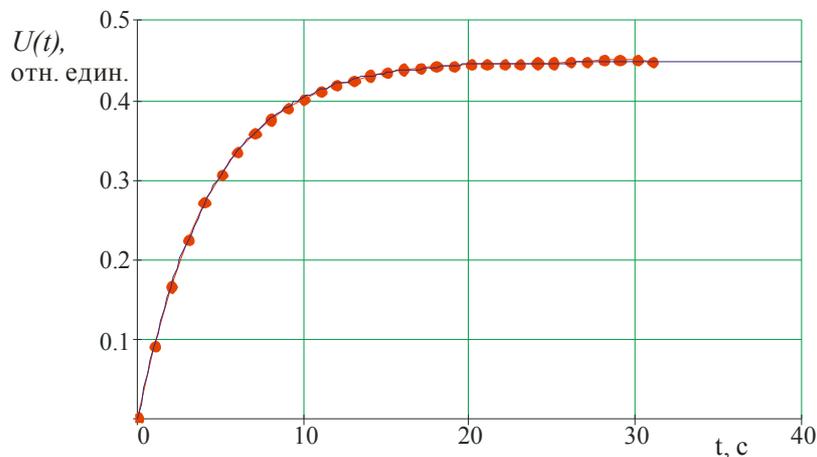
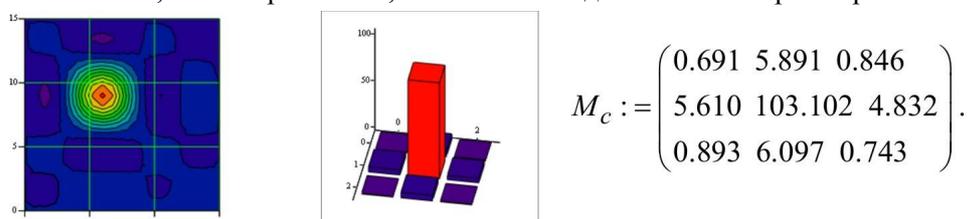


Рис. 10. Установление во времени сигнала с термопары.

### Тепловая связь между элементами матрицы

При измерении непрерывной мощности в приемнике спустя время  $t_{уст}$  устанавливается стационарный тепловой режим. При этом тепло от более нагретых элементов матрицы может переходить к менее нагретым, в результате чего искажается распределение температуры по поверхности приемника, а значит, искажается профиль пучка излучения.

Для проверки тепловой связи между элементами матрицы, на один из них направлялся узкий пучок излучения от лазера-указки. На рис. 11 показаны результаты измерений. Диаметр луча примерно равен размеру элемента – 3 x 3 мм. На диаграмме в виде столбцов видно, что сильно нагрет один элемент. Он показан красным цветом. Нагрев соседних элементов на диаграмме почти не заметен. Матрица  $M_c$  показывает распределение температуры (в относительных единицах) на нагретом и соседних с ним элементах. Видно, что температура соседних элементов не превышает 6% от температуры нагреваемого элемента. Таким образом, тепловая связь между элементами слабая, и погрешность, обусловленная этой причиной, невелика. Она не больше, чем погрешность, вызванная неодинаковыми термопарами.



Мощность излучения  $P = 9$  мВт,

$X_c = 6.16$  мм,  $Y_c = 8.66$  мм,  $D_x = 2.19$  мм,  $D_y = 4.02$  мм,  $D = 2.97$  мм.

Рис. 11. Тепловая связь между элементами матрицы.

### Спектральная характеристика

Для измерения спектральной характеристики приемника были использованы цветные светодиоды, перекрывающие видимый диапазон спектра (синий, зеленый, желтый и красный), белый светодиод, красный и зеленый полупроводниковые лазеры, две лампы накаливания, инфракрасный лазер и два терагерцевых лазера. Результаты измерений показаны в табл. 2.

Таблица 2

Спектральная характеристика приемника

Источник света	Длина волны, мкм	Чувствительность, В/Вт
Синий светодиод	0.460	6.8
Зеленый светодиод	0.505	7.0
Желтый светодиод	0.590	6.5
Красный светодиод	0.635	4.4
Белый светодиод	0.4 - 0.7	7.6
Лампа 1	0.4 - 0.7	6.4
Лампа 2	0.4 - 0.7	6.2
Зеленый лазер	0.532	8.0
Красный лазер	0.650	6.4
ИК лазер	10.6	7.0
ТГц лазер 1	119	4.9
ТГц лазер 2	432	2.0

Эта же характеристика показана на рис. 12.

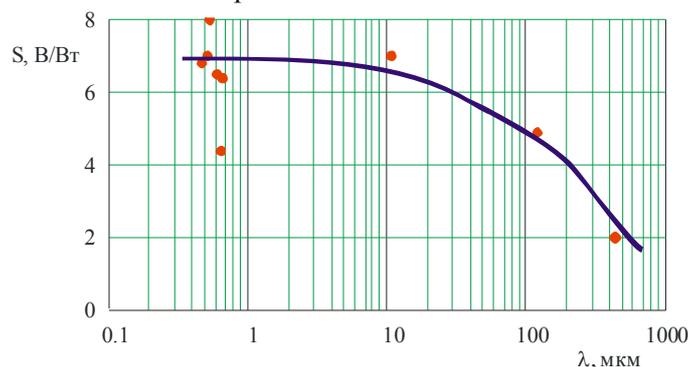


Рис. 12. Спектральная характеристика приемника.

В видимом диапазоне и инфракрасном диапазоне вплоть до 10 мкм чувствительность почти постоянная. Разброс экспериментальных точек объясняется погрешностями измерений мощности излучения. В терагерцевом диапазоне чувствительность значительно ниже. Это связано с уменьшением поглощательной способности феррита на длинах волн, близким к микроволновому диапазону.

### Измерение энергии импульса излучения

Источником импульсного излучения служила лампа-вспышка с энергией (запасенной в конденсаторе) 30 Дж. Длительность импульса – около 1 мс. На рис. 13 показан вид сигнала с приемника при действии на него импульса излучения.

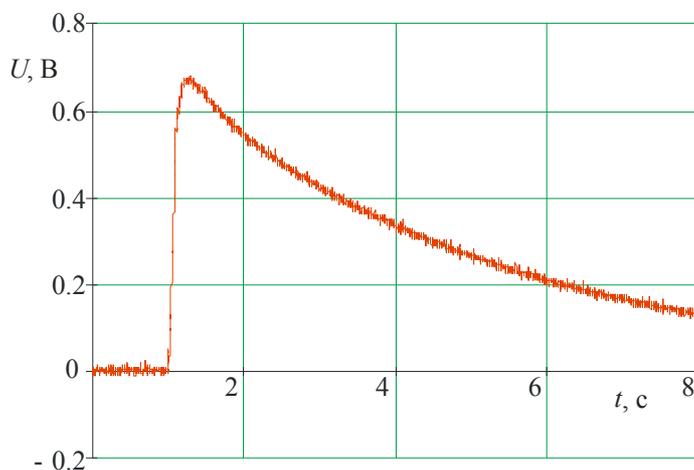


Рис. 13. Отклик приемника на оптический импульс.

При чувствительности приемника по мощности  $S_p = 8$  В/Вт и тепловой постоянной времени  $\tau = 4.3$  с, чувствительность по энергии равна

$$S_E = \frac{S_P}{\tau} = 1.86 \text{ В/Дж.}$$

Амплитуда сигнала с приемника равна 0.7 В. Это соответствует энергии излучения около 1.3 Дж.

Чувствительность исследованного приемника по энергии значительно больше, чем у матричного приемника [2]. Поэтому он может с успехом применяться и для измерения энергии импульса излучения. Уступает он только по инерционности – постоянная времени равна 4.3 с, а не 0.75 с, как у приемника [4].

### Измерение параметров излучения терагерцового лазера

На рис. 14 показаны результаты измерения профиля пучка излучения газового лазера, работающего на парах метанола в терагерцовом диапазоне. Длина волны излучения - 118.9 мкм, мощность излучения 10 мВт. Лазер работал в режиме генерации моды ТЕМ<sub>00</sub>.

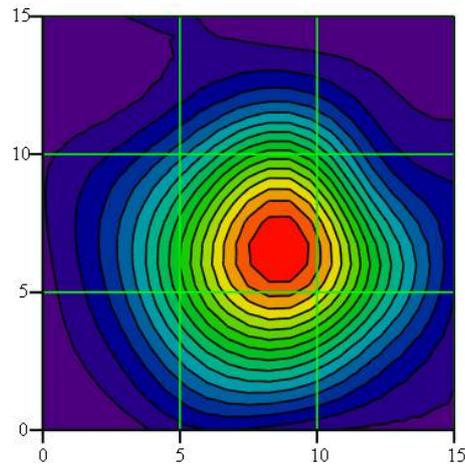


Рис. 14. Профиль пучка излучения терагерцового лазера.

Параметры пучка излучения, посчитанные в соответствии с методикой, изложенной в стандарте ISO/DIS 11146 [5], получились такими:

Координаты энергетического центра пучка определяются соотношениями:

$$x_c = \frac{\int_s x I(x, y) dS}{\int_s I(x, y) dS}, \quad y_c = \frac{\int_s y I(x, y) dS}{\int_s I(x, y) dS}. \quad (9)$$

Здесь  $I(x, y)$  – функция распределения интенсивности в поперечном сечении пучка. Интегрирование идет по площади его поперечного сечения.

Вычисления по этим формулам дают:

$$x_c = -7.9 \text{ мм}, \quad y_c = 6.8 \text{ мм}.$$

Диаметры пучка вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$  определяются так:

$$D_x = 4 \sqrt{\frac{\int_s (x - x_c)^2 I(x, y) dS}{\int_s I(x, y) dS}}, \quad D_y = 4 \sqrt{\frac{\int_s (y - y_c)^2 I(x, y) dS}{\int_s I(x, y) dS}}. \quad (10)$$

Используется также среднее геометрическое значение диаметра:

$$D = \sqrt{D_x D_y}. \quad (11)$$

Вычисления дают следующие значения этих величин:

$$D_x = 14.1 \text{ мм}, \quad D_y = 14.0 \text{ мм}, \quad D = 14.0 \text{ мм}.$$

## Выводы

Впервые в Украине разработан матричный приемник лазерного излучения, перекрывающий видимый, инфракрасный и терагерцевый диапазоны со следующими характеристиками:

спектральный диапазон – 0.4...500 мкм;

количество приемных элементов матрицы – 36;

размер приемного элемента – 3 x 3 мм;

чувствительность приемника по непрерывной мощности – 8.07 В/Вт;

чувствительность приемника по энергии – 1.86 В/Дж;

время установления показаний – 17 с.

## Литература

1. Pyrocam III HR, Pyrocam IV // [www. ophiropt.ru](http://www.ophiropt.ru)
2. Multielement laser radiation detector // [www.ite.inst.cv.ua](http://www.ite.inst.cv.ua)
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1966. – 600 с.
4. Гончарский А.А., Нестеров А.В., Низьев В.Г., Новикова Л.В., Якунин В.П. Оптические элементы лазерного резонатора для генерации луча с осесимметричной поляризацией // Оптика и спектроскопия. – 2000. – Т. 89, № 1. – С. 160-164.
5. Draft International Standard ISO/DIS 11146. Optics and optical instruments – Laser and laser-related equipment - Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle and beam propagation factor. – 1995.

Поступила в редакцию 20.04.2018

**Kokodiy N.G.**, *Doctor phys.-mat. sciences, professor*<sup>1,2</sup>,  
**Razinkov V.V.**, *Cand. phys.-mat. sciences*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>V.N.Karazin Kharkiv National University,  
4, Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine;

<sup>2</sup>National Pharmaceutical University, 53, Pushkinskaya str.,  
Kharkiv, 61002, Ukraine, *e-mail: kokodiyng@gmail.com*;

<sup>3</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1, Nauky str.,  
Chernivtsi, 58029, Ukraine, *e-mail: anatykh@gmail.com*,

## THERMOELECTRIC MATRIX RECEIVER OF OPTICAL AND TERAHERTZ RADIATIONS

*Matrix receiver of electromagnetic radiation is designed to work in the ultraviolet, visible, infrared and terahertz spectral ranges. The size of the receiver input window is 20 x 20 mm. The number of matrix elements is 36. The sensitivity of the receiver is 8 V/W in the optical range and 2-4 V/W in the terahertz range. The maximum intensity of radiation is 4 W. Bibl. 5, Fig. 14, Table 2,*

**Key words:** laser, radiation, receiver, thermoelectric, matrix.

## References

1. Pyrocam III HR, Pyrocam IV // [www. ophiropt.ru](http://www.ophiropt.ru)
2. Multielement laser radiation detector // [www.it.inst.cv.ua](http://www.it.inst.cv.ua)
3. Lykov A.V. (1966). *Teoriia teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]*. Moscow: Vysshaia shkola [in Russian].
4. Goncharkii A.A., Nesterov A.V., Niziev V.G., Novikova L.V., Yakunin V.P. (2000). Opticheskiye elementy lasernogo resonatora dlia generatsii lucha s osesimmetrichnoi poliarizatsiei [Optical elements of laser resonator for generation of a beam with axisymmetric polarization]. *Optika i spektroskopiia – Optics and Spectroscopy*, 89(1), 160-164 [in Russian].
5. *Draft International Standard ISO/DIS 11146*. Optics and optical instruments – Laser and laser-related equipment - Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle and beam propagation factor. – 1995.

Submitted 20.04.2018