

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) RU<sup>(11)</sup>

(51) МПК<sup>7</sup> G02B26/12

2239215<sup>(13)</sup> C2

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2001131918/28, 27.11.2001

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
27.11.2001

(43) Дата публикации заявки: 27.08.2003

(45) Опубликовано: 27.10.2004

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: БЕБЧУК Л.Г. и др. Прикладная оптика. Учебное пособие для приборостроительных специальностей ВУЗов. /Под ред. Н.П.Заказнова. - М.: Машиностроение, 1988, с.275-277. SU 1732322 A1, 07.05.1992. RU 2079157 C1, 10.05.1997. US 5149969 A, 22.09.1992.

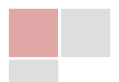
Документ находится в Патентном отделе  
**ОКБ АСТРОН**  
140081, Московская область, г.Лыткарино,  
ул.Парковая, д.1

(54) ОПТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

(57) Реферат:

Оптическое устройство тепловизионной сканирующей системы содержит апертурную диафрагму, вращающуюся призму с зеркальными гранями и приводом, колеблющееся зеркало с приводом, зеркальную оптическую систему, приемник излучения. Дополнительно содержит по крайней мере первую иммерсию, заполняющую пространство оптического пути оптического устройства и зеркальной оптической системы, вторую иммерсию, оптически связывающую приемник излучения с зеркальной оптической системой, третью иммерсию с возможностью оптической связи апертурной диафрагмы с объектом. Апертурная диафрагма выполнена в виде спектрального фильтра из эластичной пленки, колеблющееся зеркало выполнено в виде эшелетта, вращающаяся призма с зеркальными гранями и колеблющийся эшелетт заключены в капсулы из материала, пропускающего инфракрасное излучение, приемник излучения выполнен в виде заключенных в одну экранирующую оболочку пироэлектрического кристалла и полупроводникового шунта, входом устройства является третья иммерсия, оптически связанная через спектральный фильтр, оптическое устройство, зеркальную оптическую систему, вторую иммерсию с пироэлектрическим кристаллом. Технический результат - повышение разрешающей способности прибора, обеспечивающего качественное отображение границ температурных полей исследуемых объектов. 6 з.п. ф-лы, 4 ил.

Изобретение относится к радиационной пирометрии, а именно к пирометрам с электрическим детектором излучения, и может быть использовано для изучения температурных полей биологических объектов.



Известно устройство сканирующей оптической системы тепловизора (Кариженский Е.Я., Мирошников М.М. Сканирующие системы для тепловизоров, - "Оптико-механическая промышленность", 1970, N 10), содержащее многоэлементный линейный приемник излучения, объектив, зеркальную вращающуюся пирамиду с приводом.

Недостаток данного устройства состоит в том, что сканирование возможно только по одной из координатных осей и может быть использовано для сканирования перемещающихся объектов.

Наиболее близким по технической сущности является оптическое устройство тепловизионной сканирующей системы с пространственным сканированием по двум координатам (Прикладная оптика: Учеб. Пособие для приборостроительных специальностей вузов /Л.Г. Бебчук, Ю.В. Богачев, Н.П. Заказов и др. Под общ. ред. Н.П. Заказова. - М.: Машиностроение, 1988. - С.275-277), содержащее апертурную диафрагму, вращающуюся призму с зеркальными гранями и приводом, колеблющееся зеркало с приводом, зеркальную оптическую систему, приемник излучения.

Аналогичные устройства описаны в (Geneve R. Introduction a la thermographic medical. - "Acta Electronica", 1969, Vol. 12, N 1) и (Л.З. Криксунов. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Сов. Радио, 1978. - С.217-218).

К недостаткам устройства относится инерционность приемника излучения, порождающая размытость границ температурных полей и невозможность обнаружения слабых (имеющих малую массу с постоянно контрастной температурой относительно окружающей) источников теплового излучения.

Задачей изобретения является получить оптическое устройство тепловизионной сканирующей системы с высокой разрешающей способностью, которое за счет определенных конструктивных особенностей, основанных на физических свойствах используемых материалов и компонентов, обеспечит качественное отображение границ температурных полей исследуемых объектов.

Поставленная задача решается тем, что оптическое устройство тепловизионной сканирующей системы, содержащее апертурную диафрагму, вращающуюся призму с зеркальными гранями и приводом, колеблющееся зеркало с приводом, зеркальную оптическую систему, приемник излучения, дополнительно содержит по крайней мере первую иммерсию, заполняющую пространство оптического пути оптического устройства, вторую иммерсию, оптически связывающую приемник излучения с зеркальной оптической системой, третью иммерсию с возможностью оптической связи апертурной диафрагмы с объектом. Апертурная диафрагма выполнена в виде спектрального фильтра из эластичной пленки. Колеблющееся зеркало выполнено в виде эшелетта с возможностью изменения положения в плоскости, отличной от оси его колебания. Вращающаяся призма с зеркальными гранями и колеблющийся эшелетт заключены в капсулы из материала, пропускающего инфракрасное излучение. Зеркальная оптическая система выполнена с возможностью изменения фокусного расстояния, фокусирующая зеркальная линза которой расположена в центральной части тонкой германиевой пластины. Приемник излучения выполнен в виде заключенных в по крайней мере одну экранирующую оболочку и электрически связанных между собой по крайней мере одного пирозлектрического кристалла и полупроводникового шунта. Входом устройства является третья иммерсия, оптически связанная через спектральный фильтр из эластичной пленки, первую иммерсию, зеркальные грани вращающейся призмы, первую иммерсию, колеблющийся эшелетт, первую иммерсию, зеркальную оптическую систему, вторую иммерсию с пирозлектрическим кристаллом, выходом устройства являются электрические электроды полупроводникового шунта. Экранирующая оболочка выполнена с радиационно-, тепло-, влаго-, магнитоизоляцией и с возможностью электрического заземления. Спектральный фильтр выполнен из полиэтиленовой пленки. Зеркальная



оптическая система по крайней мере содержит полевую диафрагму, фокусирующую зеркальную линзу и главное сферическое зеркало. Полевая диафрагма выполнена в виде тонкой германиевой пластины. Пироэлектрический кристалл выполнен в виде х-среза кристалла сульфата лития. Полупроводниковый шунт выполнен в виде высокоомного кристаллического кремния. Первая иммерсия выполнена в виде разбавленного раствора йодистого калия. Вторая иммерсия выполнена из полиэтилена. Третья иммерсия выполнена из кедрового масла.

Таким образом получено оптическое устройство тепловизионной сканирующей системы с высокой разрешающей способностью, обеспечивающее качественное отображение границ температурных полей исследуемых объектов.

Сущность новизны предлагаемого технического решения состоит в эффективном использовании оптической среды оптического устройства тепловизионной сканирующей системы и применении высокочувствительного безинерционного детектора излучения.

По сравнению с прототипом, в котором более 80% слабого инфракрасного излучения теряется на границе отражения воздух - оптический элемент, предлагаемое устройство позволит получить качественную тепловизионную систему для изучения температурных полей биологических объектов.

Оптическое устройство тепловизионной сканирующей системы представлено на фиг.1-3. Устройство (фиг.1) содержит третью иммерсию 1, спектральный фильтр 2, первую иммерсию 3, вращающуюся призму 4 с зеркальными гранями, колеблющийся эшелетт 5, зеркальную оптическую систему 6, вторую иммерсию 7, пироэлектрический кристалл 8, полупроводниковый шунт 9, экранирующую оболочку 10, объект 11. На фиг.2 кроме указанных компонентов представлены ось вращения 12 и зеркальные грани 13 вращающейся призмы 4, ось колебаний 14 колеблющегося эшелетта 5. На фиг.3 изображена примерная схема выполнения зеркальной оптической системы 6 с полевой диафрагмой 15, тонкой германиевой пластиной 16, в центре которой расположена фокусирующая зеркальная линза 17, и главным сферическим зеркалом 18. О-О' - оптическая ось зеркальной оптической системы, 19 - направление распространения теплового излучения, прошедшего через полевую диафрагму 15 и через тонкую германиевую пластину 16, 20 - направление распространения излучения, отраженного от главного сферического зеркала 18, 21 - направление распространения излучения, отраженного от фокусирующей зеркальной линзы 17. На фиг.4 представлена молекулярная и энергетическая модель разбавленного раствора KI.

Третья иммерсия 1 (фиг.1), первая иммерсия 3 и вторая иммерсия 7 служат для снижения энергетических потерь теплового излучения на границе отражающих поверхностей. Известно, что на границе оптического материала с воздухом возникают потери лучистой энергии на отражение, причем потери от первой поверхности 36%, двух - 58%, а четырех - более 80% (Л.П. Лазарев. Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1966. - С.238-241). Спектральный фильтр 2 из эластичной пленки одновременно выполняет роль апертурной диафрагмы. В первом случае она выделяет из всего спектра лучистой энергии от объекта 11 необходимый спектральный участок, а во втором ограничивает пучок лучей, выходящих из осевой точки объекта 11. Кроме того, эластичность пленки позволяет принимать форму поверхности объекта 11 для снижения пограничных энергетических потерь теплового излучения. Вращающаяся призма 4 с зеркальными гранями 13 и колеблющийся эшелетт 5 выполняют роль соответственно строчного и кадрового сканирования температурных полей объекта 11. Кроме того, эшелетт 5 устраняет дифракционные потери при преобразовании теплового излучения. Зеркальная оптическая система 6 служит для геометрического увеличения элементов объекта 11 и для передачи его энергетических параметров.

Пироэлектрический кристалл 8 предназначен для преобразования приращения



температуры от объекта 11 в электрический сигнал. О необходимости использования в качестве приемника излучения пьезоэлектрического кристалла можно привести следующее: "Если турмалиновую пластинку толщиной в миллиметр нагреть на десять градусов, на ней появится заряд примерно в  $5 \cdot 10^{-9}$  кулон/см<sup>2</sup>, т.е. создается разность потенциалов около 1,2 киловольт... Прибор с таким кристаллом может уловить и измерить изменение температуры вплоть до  $10^{-9}$  градуса. Особенно ценно то, что пьезоэлектрические приемники тепла могут регистрировать очень быстро меняющиеся тепловые потоки, вплоть до миллионов колебаний в секунду" (М.П. Шаскольская. Очерки о свойствах кристаллов. - М.: Наука, 1978. - С.108-109).

Экранирующая оболочка 10 защищает пьезоэлектрический кристалл от постороннего энергетического воздействия. Теплоизоляция необходима во избежание вторичного пьезоэлектрического эффекта (П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. Физика твердого тела. - М.: Высшая школа, 1985. - С.297-298). Учитывая "многопрофильность" пьезоэлектриков, необходима их защита от нежелательного воздействия радиоактивности, электрических и магнитных полей (Л.П. Хорошун, Б.П. Маслов, П.В. Лещенко. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. - К.: Наукова думка, 1989. - С.14-19).

Полевая диафрагма 15 ограничивает линейное и угловое поле зеркальной оптической системы 6. Тонкая германиевая пластина 16, в центре которой размещена фокусирующая зеркальная линза 17, служит ее держателем при изменении фокусного расстояния. Существующие держатели фокусирующих элементов частично затеняют своим присутствием оптический поток. Фокусирующая зеркальная линза 17 служит для поиска фокальной плоскости объекта 11. Главное сферическое зеркало 18 вместе с фокусирующей зеркальной линзой 17 служат для геометрического увеличения элементов объекта 11 и для передачи его энергетических параметров.

Конструктивное выполнение эшелетта 5 с возможностью изменения положения в плоскости, отличной от оси его колебания, необходимо для нахождения главных максимумов и в качестве диспергирующего элемента. Форма штрихов эшелетта не влияет ни на положение главных максимумов, ни на дисперсию эшелетта, ни на резкость интерференционной картины, так как резкость определяется полным числом штрихов (Бутиков Е.И. Оптика: Учеб. пособие для вузов /Под ред. Н.И. Калитеевского. - М.: Высш. шк., 1986. - С.308-309).

Так как для устранения дифракционных потерь при преобразовании теплового потока используется эшелетт и при нормальном падении потока излучения на штрих эшелетта фазы вторичных источников одинаковы, то исходящая под углом  $\theta$  волна из элемента с координатой  $x$  опережает по фазе волну того же направления из середины штриха на  $kx \sin \theta$ . В точке приемника излучения  $P$  амплитуда результирующего колебания, вызванного вторичными волнами от всего штриха эшелетта шириной  $a$ , пропорциональна выражению

$$E_p \sim K(\theta) \int_{-a/2}^{a/2} e^{-ikx \sin \theta} dx = K(\theta) a \frac{\sin u}{u}, \quad (1)$$

$$\text{где } u = (ka/2) \sin \theta = (\pi a / \lambda) \sin \theta.$$

При малых углах дифракции  $\theta$  коэффициент наклона  $K(\theta)$  в (1) практически не зависит от  $\theta$  и его можно заменить значением при  $\theta = 0$ . Исходя из этого, зависимость интенсивности дифрагировавшего потока от  $\theta$  определяется формулой

$$I(\theta) = I_0 (\sin u / u)^2, \quad (2)$$

где  $I_0$  - интенсивность при  $\theta = 0$  по направлению падающей волны.



В направлении вдоль штрихов размер волновой поверхности ограничен размерами полевой диафрагмы и зеркальной оптической системы, поэтому волны дифрагируют в перпендикулярных штрихам направлениях. В точке приемника излучения Р будет происходить многолучевая интерференция от каждого штриха эшелетта. Если напряженность поля от первого штриха в пучке излучения обозначить  $E_1(\theta)$ , то напряженность  $E_2$  от второго штриха, запаздывая по фазе, будет отличаться от  $E_1$  множителем  $\exp(i\delta)$ . Напряженность от третьего штриха будет  $E_3 = E_1 \exp(2i\delta)$ . Полная напряженность от всех N штрихов

$$E_p = E_1(\theta) [1 + e^{i\delta} + e^{i2\delta} + \dots + e^{i(N-1)\delta}] = E_1(\theta) \frac{1 - e^{iN\delta}}{1 - e^{i\delta}} \quad (3)$$

эшелетта будет суммой геометрической прогрессии.

Умножив первую часть на комплексно-сопряженное выражение, получаем интенсивность в точке приемника излучения Р

$$I(\theta) = I_1(\theta) \frac{\sin^2(N\delta / 2)}{\sin^2(\delta / 2)}, \quad (4)$$

где  $I_1(\theta)$  - интенсивность в точке Р от одного штриха.

Между соседними интерферирующими пучками, приходящими в точку Р, разность фаз  $\delta$  зависит от направления  $\theta$  и шага эшелетта d. Если монохроматическая волна нормально падает на плоскость эшелетта, то разность хода соседних пучков  $\Delta = d(\sin \theta)$ , следовательно

$$\delta = k\Delta = 2\pi\Delta / \lambda = (2\pi d / \lambda) \sin \theta. \quad (5)$$

При наклонном падении плоской волны под углом  $\theta'$ , разность хода соседних пучков будет

$$\Delta = d(\sin \theta - \sin \theta'), \quad (6)$$

а положение главных максимумов

$$d(\sin \theta_m - \sin \theta') = m\lambda. \quad (7)$$

Углы падения  $\theta'$  и дифракции  $\theta$  отсчитываются в противоположных направлениях от нормали (для отражательной решетки - эшелетт).

Форма штрихов эшелетт не влияет ни на положение главных максимумов, ни на дисперсию эшелетт, ни на резкость интерференционной картины, так как резкость определяется полным числом штрихов (Бутиков Е.И. Оптика: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.И. Калитеевского. - М.: Высш. шк., 1986. - С.308-309). Так как интерференционный множитель в (4) принимает значение  $N^2$ , то интенсивность m-го главного максимума определяется выражением

$$I_m = I_0 N^2 \frac{\sin^2(m\pi a / d)}{(m\pi a / d)^2}. \quad (8)$$

Стоит считаться также с тем, что эшелетт в меридиональной плоскости обладает угловым увеличением (Оптико-механические приборы: Учебник для техникумов / С.В. Кулагин, А.С. Гоменюк, В.Н. Дикарев и др. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1984. - С.99-105)

$$\Gamma = - \frac{\cos \theta'}{\cos \theta} \quad (9)$$

Этим объясняется возможность изменения расположения эшелетт 5 в конструкции данного



устройства.

Вращающаяся призма 4 с зеркальными гранями 13 и колеблющийся эшелетт 5 в жидкой иммерсионной среде 3 будут вызывать нежелательные турбулентные течения, нарушающие изотропность оптической среды и изменяющие ее плотность. Поэтому эти компоненты заключены в капсулы (в графических материалах не представлены) из материала, пропускающего инфракрасное излучение.

Спектральный фильтр 2 выполнен из полиэтиленовой пленки. Спектральный коэффициент пропускания полиэтиленовой пленки толщиной 0,1 мм в диапазоне длин волн 9,5...10,5 мкм равен 0,8 (Л.З. Криксунов. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Сов. Радио, 1978. - С.160-170, Рис.4.43а).

Полевая диафрагма 15 выполнена в виде тонкой германиевой пластины. Спектры пропускания различных материалов представлены в (Воронков Е.М., Гречушкин Б.Н. Оптические материалы для инфракрасной техники. - М.: Наука, 1965. - 380 с.).

Пироэлектрический кристалл 8 выполнен в виде х-среза кристалла сульфата лития. Предлагаемый в данной конструкции сульфат лития имеет пироэлектрический коэффициент 50, тогда как турмалин - 1,2. Сульфат лития, как и другие пироэлектрические кристаллы, непосредственно преобразует тепловую энергию в электрическую. Нет никаких дополнительных приспособлений, нет электрического поля, нет источников электрической энергии, есть только изменение  $t$  кристалла - нагревание или охлаждение, а на поверхности кристалла появляются электрические заряды.

Полупроводниковый шунт 9 выполнен в виде высокоомного кристаллического кремния для защиты пироэлектрического кристалла 8 от электрического пробоя, когда спонтанная электрическая поляризация создает угрозу самопробоя внутренней электрической емкости кристалла. Уменьшение электрического сопротивления полупроводникового шунта 9, кроме того, сужает диапазон детектирования и повышает чувствительность пироэлектрического кристалла (Л.С. Кременчугский, О.В. Ройцина. Пироэлектрические приемники излучения. - К.: Наукова думка, 1979. - С.52-59).

Первая иммерсия 3 выполнена в виде разбавленного раствора йодистого калия. Известно, что соединение KI широко распространено, доступно и имеет очень широкий спектр пропускания оптического излучения (А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. Оптико-электронные системы измерения температуры. - М.: Энергия, 1979. - С.16-20, Рис.2-1), в диапазоне которого свободно можно исследовать температурные поля биологических объектов. Так как это соединение существует в природе только в кристаллическом виде, для создания оптимальной оптической среды предложено использовать водный раствор. Спектр пропускания воды в диапазоне длин волн 9...10,5 мкм равен 0,8 (Л.З. Криксунов. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Сов. Радио, 1978. - С.172-177, Рис.4.58). Насыщенный раствор KI при понижении температуры может вызвать рост его кристаллов на оптических поверхностях. Поэтому был предложен разбавленный раствор KI. На фиг.4 представлена иллюстрация молекулярного и энергетического взаимодействия водного раствора KI. Консистенция его будет зависеть от неравенства  $E_{hv} > E_{H-OH}$ , т.е. столько требуется затратить энергии для разрыва связи H-OH. Энергия оптического кванта должна быть больше энергии указанной связи. Только при этих условиях иммерсия будет сохранять высокую оптическую прозрачность в требуемом диапазоне длин волн.

Вторая иммерсия 7 выполнена из полиэтилена. Спектральный коэффициент пропускания полиэтиленовой пленки толщиной 0,1 мм в диапазоне длин волн 9,5...10,5 мкм равен 0,8 (Л.З. Криксунов. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Сов. Радио, 1978. - С.160-170, Рис.4.43а).

Третья иммерсия 1 выполнена из кедрового масла, используемого в длинноволновой



области спектра.

Точные значения показателей преломления различных материалов содержатся в специальных справочниках (Л.З. Криксунов. Системы информации с оптическими квантовыми генераторами. - К.: Техника, 1970).

Для пояснения особенностей работы ИК-системы выведем основные уравнения, определяющие работу сканирующих систем. Начнем с простого случая, когда все наблюдаемые приемной системой объекты протяженные, т.е. когда угловые размеры объекта много больше мгновенного поля зрения системы.

Предположим, что на расстоянии  $L$  от оптической системы с эффективной площадью входного зрачка  $A_0$  и фокусным расстоянием  $F$  находится протяженный источник излучения ("излучатель"), представляющий собой абсолютно черное тело с температурой  $T_{и}$ . Излучатель наблюдается на фоне, излучение которого представляет собой также излучение абсолютно черного тела, находящегося при температуре  $T_{ф}$ . Слой оптической среды между излучателем и приемной системой, по предположению, не изменяет принимаемое системой излучение источника и фона. Это предположение позволит несколько упростить получаемые выражения, не уклоняясь от поставленной задачи. Влияние атмосферы и коэффициента черноты объекта на наблюдаемую тепловую картину известны (см., например, Ллойд Дж. Системы тепловидения. - М.: Мир, 1978. - 414 с.).

Спектральный поток излучения, собираемый оптической системой и попадающий на приемник излучения представлен в виде

$$P_{(\lambda)} = \frac{R(\lambda, T_{и})}{\pi} \cdot \frac{A_0}{L^2} \omega L^2 = \frac{R(\lambda, T_{и}) A_0 \omega}{\pi}, \quad (10)$$

а сигнал, снимаемый с приемника

$$U_s = S(\lambda) \frac{R(\lambda, T_{и}) A_0 \omega}{\pi}, \quad (11)$$

где  $S(\lambda)$  - абсолютная вольтова чувствительность приемника, В/Вт;  $R(\lambda, T_{и})$  - спектральная плотность потока излучения абсолютно черного тела, находящегося при температуре  $T_{и}$ , Вт/см<sup>2</sup>·мкм;  $\omega$  - угол мгновенного поля зрения приемной системы.

Отношение сигнал-шум для монохроматического излучения можно представить в виде

$$\frac{U_s}{U_{ш}} = \frac{A_0 \omega}{\pi U_{ш}} \int_0^{\infty} S(\lambda) R(\lambda, T_{и}) d\lambda \quad (12)$$

Часто вместо абсолютной вольтовой чувствительности  $S(\lambda)$  используют приведенную обнаружительную способность

$$D^*(\lambda) = \frac{\sqrt{a^2} \cdot \sqrt{\Delta f}}{U_{ш}} \cdot s(\lambda), \quad (13)$$

где  $a^2$  - площадь чувствительного элемента фотоприемника, для простоты предполагаем его квадратным со стороной  $a$ ,  $\Delta f$  - ширина полосы пропускания электронного тракта усиления сигнала и шума.

В этом случае выражение для отношения сигнал-шум принимает вид

$$\frac{U_s}{U_{ш}} = \frac{A_0 \omega}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2} \cdot \sqrt{\Delta f}} \int_0^{\infty} D^*(\lambda) R(\lambda, T_{и}) d\lambda \quad (14)$$

Известны методы определения оптимальной ширины полосы пропускания электронного тракта оптико-электронных приборов (см., например, Якушенок Ю.Г. Теория и расчет оптико-



электронных приборов. - М.: Советское радио, 1980, - 390 с.). Оптимальная величина  $\Delta f$  зависит от назначения приемной системы, а также спектральных характеристик сигнала и шума. Для прямоугольного сигнального импульса амплитуда импульса после прохождения фильтра достигает наибольшего значения при соотношении  $\Delta f t_{и} \approx 0,5$  и при дальнейшем увеличении произведения  $\Delta f t_{и}$  остается практически постоянной ( $t_{и}$  - длительность сигнального импульса). При увеличении произведения  $\Delta f t_{и}$  изменяется лишь форма прошедшего через фильтр сигнала, форма импульса становится все более близкой к прямоугольной. Для упрощения принимаем, что ширина полосы  $\Delta f$  связана с временем, приходящимся на один элемент разложения наблюдаемой тепловой картины  $\tau_{э}$ , соотношением

$$\Delta f \tau_{э} = C \quad (15)$$

где  $C$  - некоторая постоянная (порядка единицы).

Учитывая, что угол мгновенного поля зрения равен угловому размеру чувствительного элемента приемника излучения

$$\omega = a^2 / F^2, \quad (16)$$

получаем, что разностный сигнал, определяющий контраст теплового изображения излучателя с температурой  $T_{и}$  на фоне с температурой  $T_{ф}$ , выглядит в виде

$$\frac{\Delta U}{U_{ш}} = \frac{A_0 a \tau_{э}^{1/2}}{\pi F^2 C^{1/2}} \int_0^{\infty} D^*(\lambda) \cdot [R(\lambda, T_{и}) - R(\lambda, T_{ф})] d\lambda \quad (17)$$

В зависимости от соотношения между температурами  $T_{и}$  и  $T_{ф}$  контрастный сигнал  $\Delta U$  может быть положительным или отрицательным. При малых температурных

контрастах  $\Delta T = T_{и} - T_{ф} \ll T_{и}, T_{ф}$ ,  $R(\lambda, T_{и}) - R(\lambda, T_{ф})$  разность в подынтегральном выражении может быть заменена дифференциальной разностью

$$\frac{dR(\lambda, T)}{dT} \cdot \Delta T, \quad (18)$$

и выражение (17) примет вид

$$\frac{\Delta U}{U_{ш}} = \Delta T \cdot \frac{A_0 a \tau_{э}^{1/2} D_{\max}^*}{\pi F^2 C^{1/2}} \int_0^{\infty} s(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{dT} d\lambda \quad (19)$$

где  $D^*(\lambda) = D_{\max}^*(\lambda) s(\lambda)$ ;  $s(\lambda)$  - относительная спектральная характеристика приемника излучения.

Время  $\tau_{э}$ , приходящееся на один элемент разложения, определяется длительностью кадра  $t_k$  и соотношением между величинами углов мгновенного поля зрения  $\omega$  и полного поля обзора  $\Omega$ :

$$\tau_{э} = \frac{M\omega}{\Omega} t_k \epsilon_r \quad (20)$$

где  $M$  - число рядов в многоэлементной матрице приемника излучения, включенных параллельно (в общем случае число  $M$  должно быть заменено полным числом элементов в многоэлементной матрице  $n$ , где  $n = M \cdot N$ , где  $N$  - число столбцов в матрице);  $\epsilon_r$  - коэффициент





использования развертки.

Таким образом, контрастный сигнал

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{ш}}} = \Delta T \cdot \frac{D_{\text{max}}^* A_0 \omega}{\pi F} \cdot \left( \frac{M t_{\text{к}} \varepsilon}{C \Omega} \right)^{1/2} \int_0^{\infty} s(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{dT} \cdot d\lambda \quad (21)$$

При разработке приемной системы исходя из ее назначения обычно задаются значениями длительности кадра  $t_{\text{к}}$ , полного поля обзора  $\Omega$  и мгновенного угла зрения  $\omega$ , а также контрастной температуры объекта  $\Delta T$  по отношению к температуре фона  $T_{\text{ф}}$ . Для обеспечения заданного отношения сигнал-шум можно варьировать только величинами  $A_0$ ,  $F$ ,  $\varepsilon$ ,  $D^*(\lambda)$  и  $M$ .

Увеличение размеров входного отверстия оптической системы  $A_0$  приводит к резкому увеличению массы и габаритов приемного устройства. Уменьшение фокусного расстояния при неизменном диаметре входного отверстия приводит к росту aberrаций в оптической системе, уменьшению пропускания, введению дополнительных оптических элементов. Поэтому относительное входное отверстие  $A_0/F$  оптической системы приемного устройства фактически является заранее заданной величиной. Коэффициент использования развертки (эпсилон) в уже существующих системах достигает  $\sim 0,8$ , и существенного увеличения

отношения сигнал-шум путем увеличения (эпсилон) до максимального значения  $\varepsilon = 1$  получить нельзя. В правильно сконструированных приемных системах значение приведенной обнаружительной способности  $D^*(\lambda)$  приемника излучения близко или равно максимально возможному, определяемому флуктуациями излучения фона (фоновое ограничение):

$$D^*_{\text{ф}}(\lambda) = \frac{\lambda}{2hC_0} \left( \frac{\eta_0}{Q_{\text{ф}}} \right)^{1/2}, \quad (22)$$

где  $h$  - постоянная Планка;  $C_0$  - скорость света;  $\eta_0$  - квантовая эффективность преобразования излучения, т.е. отношение числа фотоносителей, созданных в фоточувствительном элементе, к числу фотонов, упавших на него;  $Q_{\text{ф}}$  - интенсивность фонового излучения, падающего на чувствительный элемент.

Одним из основных условий, которое должно выполняться в правильно сконструированной приемной системе, является преобладание шумов приемного элемента над шумами последующей электронной системы считывания и усиления сигнала. При выводе уравнения (21) предполагалось, что это условие выполняется.

Ширина полосы  $\Delta f$ , в которой происходит накопление шумов, определяется длительностью сигнального импульса. Поэтому при заданных исходных данных в виде времени кадра  $t_{\text{к}}$  и уровня шума предварительного усилителя максимально допустимое число элементов  $n$  в условной матрице устанавливается автоматически (Приемные устройства ИК-систем /П.А. Богомоллов, В.И. Сидоров, И.Ф. Усольцев; Под ред. В.И. Сидорова. - М.: Радио и связь, 1987. - С.22-25).

Так как пироэлектрический кристалл 8, применяемый в данном устройстве, реагирует лишь на изменение температуры, это повышает энергетические и частотные характеристики приемной системы. В связи с этим применим особый подход к анализу использования пироэлектрического кристалла в качестве приемника излучения. Схемы подключения пироэлектрических кристаллов к электронному тракту представлены в (Л.С. Кременчугский, О.В. Ройцина. Пироэлектрические приемники излучения. - К.: Наукова думка, 1979. - С.88-90). При постоянной температуре  $T_0$ , когда мощность прерываемого потока излучения  $W(t)=0$ ,



система кристалл-электроды в целом электронейтральны, т.е. ток в цепи будет отсутствовать.

Если на чувствительный элемент падает поток излучения  $W(t)$ , то под его действием он нагревается и его спонтанная поляризация уменьшается. При этом на электродах пироэлектрического кристалла освобождаются заряды и через сопротивление шунта  $R_n$  начнет течь ток  $I$ . Если длительность облучения значительно больше, чем время установления средней температуры пироэлектрического кристалла и постоянной заряда  $C_{кр}R_n$  ( $C_{кр}$  - емкость пироэлектрического кристалла), то в какой-то момент времени  $t_2$  ток  $I$  станет близким нулю:

$$I = A_0 \frac{dP}{dt} = A_0 \gamma \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (23)$$

где  $A_0$  - величина приемной площадки;

$$\gamma = \frac{dP_t}{dT} - \text{пироэлектрический коэффициент.}$$

Если тепловой поток, падающий на пироэлектрический кристалл, прекратится, то на его электродах в процессе остывания так же, как и при нагревании, освобождаются заряды и через шунт  $R_n$  опять протекает ток  $I$ . При достижении исходной температуры ток  $I$  снова станет близким к нулю.

Когда падающий на пироэлектрический кристалл поток излучения изменяется по закону

$$W = W_0 A_0 (1 + e^{i\omega \cdot t}), \quad (24)$$

где  $W_0$  - амплитуда плотности потока излучения;  $\omega$  - угловая частота;  $i = \sqrt{-1}$ ;  $t$  - время, тогда уравнение теплового баланса примет вид

$$c \frac{dT}{dt} + G \cdot \Theta = \epsilon_1 \cdot W_0 \cdot A_0 (1 + e^{i\omega \cdot t}), \quad (25)$$

где  $c$  - теплоемкость пироэлектрического кристалла;  $G$  - суммарный коэффициент теплопотерь;  $\Theta$  - средний прирост температуры пироэлектрического кристалла;  $\epsilon_1$  - поглотительная способность приемной площадки пироэлектрического кристалла.

Решение уравнения запишем в виде:

$$\Theta = \frac{\epsilon_1 \cdot A_0 \cdot W_0 \cdot e^{i\omega \cdot t}}{G + i \cdot \omega \cdot c}, \quad (26)$$

подставляя (26) в (23), получим:

$$I = \frac{\epsilon_1 \cdot A_0 \cdot \gamma \cdot W_0 \cdot i \cdot \omega \cdot e^{i\omega \cdot t}}{G + i \cdot \omega \cdot c}, \quad (27)$$

При использовании в качестве приемника излучения пироэлектрического кристалла - плоскопараллельной пластинки с площадью  $A_0$  и толщиной  $d$ , можно получить плотность тока в кристалле в направлении, совпадающем с вектором поляризации для однородного и монокристалла, направленным вдоль оси  $X$ , совпадающей с одной из главных осей тензора электропроводности и диэлектрической восприимчивости

$$j = j_x + \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial D_x}{\partial t}, \quad (28)$$

где  $j_x = \sigma_x^3 \cdot E_x$  - плотность тока проводимости;  $\sigma_x^3$  - электропроводимость.

Проинтегрировав выражение (27) по объему кристалла

$$A_0 \sigma_x^3 \int_0^d E_x \cdot dx + \frac{\partial}{\partial t} \cdot \left( \frac{A_0 \cdot \epsilon_1}{4\pi} \int_0^d E_x \cdot dx + A_0 \int_0^d P C_x \cdot dx \right) = 0, \quad (29)$$



где  $P_c$  - среднее значение спонтанной поляризации кристалла, в результате получим:

$$I = - \frac{d}{dt} \cdot (A_0 \cdot P_c) = -A_0 \cdot \frac{dP_c}{dt} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (30)$$

Напряжение в пьезоэлектрическом кристалле получим из формулы (27):

$$U = \frac{i \cdot \omega \cdot \varepsilon_1 \cdot \gamma \cdot A_0^2 \cdot W_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot R_0}{(G + i \cdot \omega \cdot C) (1 + i \cdot \omega \cdot C_0 \cdot R_0)} \quad (31)$$

где  $C_0 = C_{кр} + C_{вх}$ ;  $C_{вх}$  - входная емкость схемы;  $R_0^{-1} = R_{н}^{-1} + R_{кр}^{-1} + R_{вх}^{-1}$ ;  $R_{вх}$  - входное сопротивление схемы.

Пьезоэлектрические приемники являются термочувствительными генераторами тока в отличие от термопар и болометров. Пьезоэлектрические приемники излучения особенно отличаются быстродействием и их нечувствительностью к постоянным тепловым воздействиям.

Температурное воздействие на пьезоэлектрический кристалл осуществляется за счет падающего на него теплового излучения  $W(t)$ .

Сульфат лития, как и другие пьезоэлектрические кристаллы, непосредственно преобразует тепловую энергию в электрическую. Нет никаких дополнительных приспособлений, нет электрического поля, нет источников электрической энергии, есть только изменение  $t$

кристалла - нагревание или охлаждение, а на поверхности кристалла появляются электрические заряды.

Устройство работает следующим образом.

Поток излучения от объекта 11 (фиг.1) через третью иммерсию 1, спектральный фильтр 2, первую иммерсию 3 поступает на зеркальные грани вращающейся призмы 4. Отраженный поток излучения, проходя снова через первую иммерсию 3, поступает на колеблющийся эшелетт 5 и, отражаясь и проходя снова через первую иммерсию 3, поступает на зеркальную оптическую систему 6, заполненную первой иммерсией 3. Далее поток излучения через вторую иммерсию 7 поступает на пьезоэлектрический кристалл 8, параллельно электрически соединенный с полупроводниковым шунтом 9. Тепловое излучение от объекта 11, преобразованное пьезоэлектрическим кристаллом 8 в электрический сигнал, снимается с электродов полупроводникового шунта 9.

На фиг.2 кроме указанных компонентов представлены ось вращения 12 и зеркальные грани 13 вращающейся призмы 4, ось колебаний 14 колеблющегося эшелетта 5. Фиг.3 на примерной схеме выполнения зеркальной оптической системы 6 иллюстрирует направление распространения теплового излучения 19, прошедшего через полевую диафрагму 15 и тонкую германиевую пластину 16, а также направление распространения излучения 20, отраженного от главного сферического зеркала 18, и направление распространения излучения 21, отраженного от фокусирующей зеркальной линзы 17.

По сравнению с прототипом, в котором более 80% слабого инфракрасного излучения теряется на границе отражения воздух-оптический элемент, предлагаемое устройство позволит получить качественную тепловизионную систему для изучения температурных полей биологических объектов.

Представленное устройство оптической системы может быть использовано для контроля гипертермии новообразований.

Полученное оптическое устройство тепловизионной сканирующей системы позволит с высокой разрешающей способностью обеспечить качественное отображение границ температурных полей исследуемых объектов.



## Формула изобретения

1. Оптическое устройство тепловизионной сканирующей системы, содержащее апертурную диафрагму, вращающуюся призму с зеркальными гранями и приводом, колеблющееся зеркало с приводом, зеркальную оптическую систему, приемник излучения, отличающееся тем, что дополнительно содержит по крайней мере первую иммерсию, заполняющую пространство оптического пути оптического устройства и зеркальной оптической системы, вторую иммерсию, оптически связывающую приемник излучения с зеркальной оптической системой, третью иммерсию с возможностью оптической связи апертурной диафрагмы с объектом, апертурная диафрагма выполнена в виде спектрального фильтра из эластичной пленки, колеблющееся зеркало выполнено в виде эшелетта с возможностью изменения положения в плоскости, отличной от оси его колебания, вращающаяся призма с зеркальными гранями и колеблющийся эшелетт заключены в капсулы из материала, пропускающего инфракрасное излучение, зеркальная оптическая система выполнена с возможностью изменения фокусного расстояния ее, фокусирующая зеркальная линза расположена в центральной части тонкой германиевой пластины, приемник излучения выполнен в виде заключенных в по крайней мере одну экранирующую оболочку и электрически связанных между собой по крайней мере одного пирозлектрического кристалла и полупроводникового шунта, входом устройства является третья иммерсия, оптически связанная через спектральный фильтр из эластичной пленки, через оптическое устройство, через зеркальную оптическую систему, через вторую иммерсию с пирозлектрическим кристаллом, выходом устройства являются электрические электроды полупроводникового шунта.

2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что экранирующая оболочка выполнена с радиационно-, тепло-, влаго-, магнитоизоляцией и с возможностью электрического заземления.

3. Устройство по п.1, отличающееся тем, что спектральный фильтр выполнен из полиэтиленовой пленки.

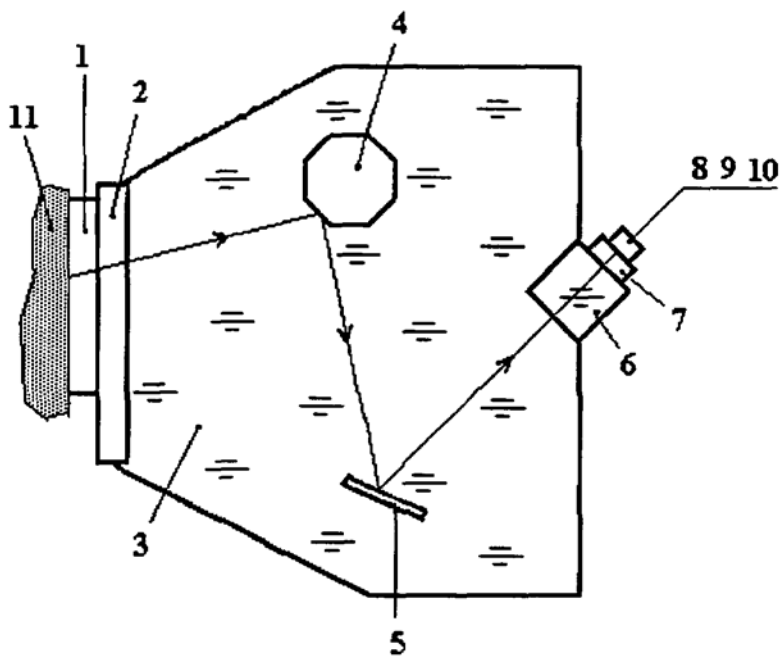
4. Устройство по п.1, отличающееся тем, что зеркальная оптическая система по крайней мере содержит полевую диафрагму, фокусирующую зеркальную линзу и главное сферическое зеркало.

5. Устройство по п.4, отличающееся тем, что полевая диафрагма выполнена в виде тонкой германиевой пластины.

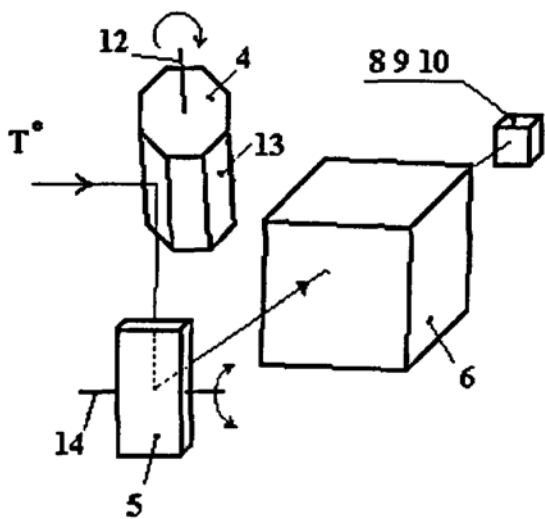
6. Устройство по п.1, отличающееся тем, что пирозлектрический кристалл выполнен в виде х-среза кристалла сульфата лития, а полупроводниковый шунт выполнен в виде высокоомного кристаллического кремния.

7. Устройство по п.1, отличающееся тем, что первая иммерсия выполнена в виде разбавленного раствора йодистого калия, вторая иммерсия выполнена из полиэтилена, а третья иммерсия выполнена из кедрового масла.



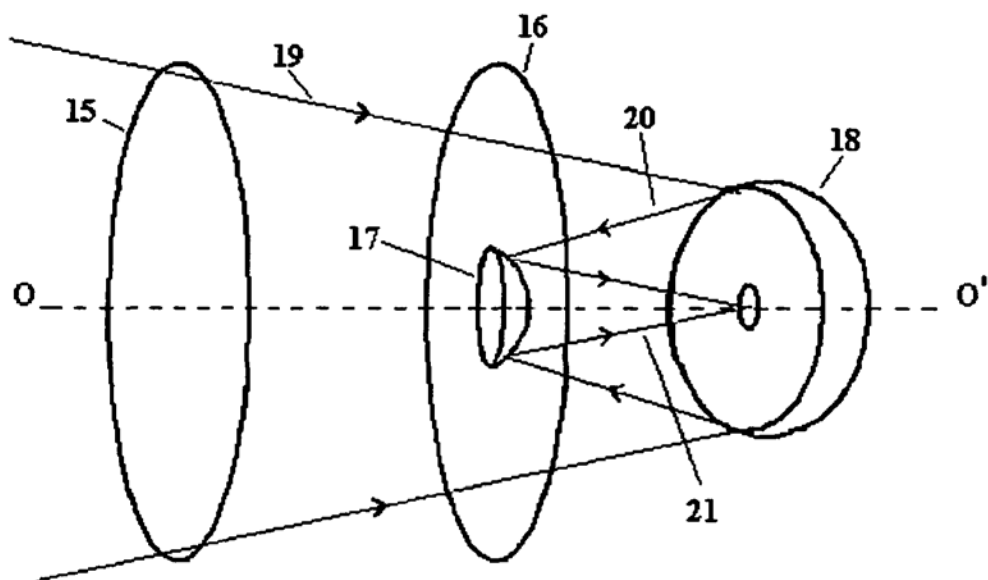


Фиг. 1

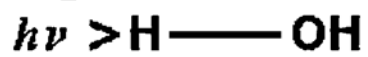
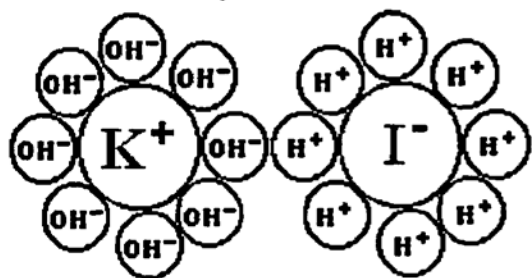


Фиг. 2





Фиг. 3



Фиг. 4

