

УДК 621.384.3

## Фильтрующее устройство на основе оптических элементов с положительной и отрицательной производными зависимостями углов полного внутреннего отражения от длины волны

А. М. Филачев, Л. Д. Сагинов, А. С. Кононов, А. Н. Свиридов, В. Л. Бакуменко  
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Предложены новый тип фильтрующих устройств (ФУ) на основе оптических элементов с положительной и отрицательной производными зависимостями углов полного внутреннего отражения от длины волны, а также новый тип отображающих спектрометров (ОС) на основе этих устройств и матричных тепловизоров. Приведены расчеты параметров такого фильтрующего устройства и отображающего спектрометра. Ожидается, что подобные отображающие спектрометры могут быть пригодны для получения спектральных изображений быстротекающих процессов.*

В последние годы возрастает внимание к устройствам, обеспечивающим получение изображений объектов в заданных узких спектральных диапазонах — spectral imaging (SI — термин, обозначающий быстроразвивающееся направление бесконтактного исследования объектов, использующее методы оптического спектрального анализа и распознавания образов). С помощью этих устройств удается наблюдать в изображениях различные фрагменты, отличающиеся (в выбранном узком спектральном диапазоне) различной спектральной яркостью, обусловленной различными коэффициентами отражения, поглощения или излучения. При наблюдении этих же объектов в широком спектральном диапазоне (например, с помощью обычного тепловизора) яркости фрагментов усредняются, и объем получаемой оптической информации значительно уменьшается. Для реализации SI могут использоваться методы как непосредственной оптической фильтрации принимаемого излучения с помощью перестраиваемых оптических фильтров различных видов (акустооптические, интерференционные, интерференционно-поляризационные и др.) [1—7], так и выделения спектральных изображений, основанные на компьютерной обработке оптических полей, регистрируемых матричным приемником (например, сигналов после Фурье-интерферометра, голограмм и др.) [8—11]. В данной статье рассматривается новый вид ФУ.

### Фильтрующее устройство с использованием явления полного внутреннего отражения и отображающий спектрометр на его основе

В рассматриваемом ФУ фильтрация осуществляется вследствие полного внутреннего отражения (ПВО) фильтруемого потока излучения от границ разделов (ГР) двух различных пар оптических

сред. Одна из этих пар образует (в спектральном диапазоне работы ФУ) границу раздела с положительной производной зависимости угла полного внутреннего отражения от длины волны ( $\text{ГР}^+$ ), а другая — с отрицательной ( $\text{ГР}^-$ ) [12, 13].

Если направить полихроматический пучок, распространяющийся в среде с показателем преломления  $n_1(\lambda)$ , на  $\text{ГР}^+$ -границу раздела со средой с показателем преломления  $n_2(\lambda)$ , под углом  $\theta_{k1}(\lambda_m + \Delta\lambda/2)$  (где  $n_1(\lambda_m + \Delta\lambda/2) > n_2(\lambda_m + \Delta\lambda/2)$ , а  $\theta_{k1}(\lambda_m + \Delta\lambda/2)$  — критический угол полного внутреннего отражения для излучения с длиной волны  $\lambda_m + \Delta\lambda/2$ ), то он разделится на два пучка, один из которых с  $\lambda \leq \lambda_m + \Delta\lambda/2$  отразится от  $\text{ГР}^+$ , а другой с  $\lambda > \lambda_m + \Delta\lambda/2$  пройдет через  $\text{ГР}^+$  в другую среду с показателем преломления  $n_2(\lambda)$ .

Таким образом, при ПВО полихроматического пучка от  $\text{ГР}^+$  происходит отрезание спектральных компонентов с длинами волн, большими  $\lambda_m + \Delta\lambda/2$ .

При ПВО полихроматического пучка, падающего на  $\text{ГР}^-$  под углом  $\theta_{k2}(\lambda_m - \Delta\lambda/2)$  — критическим углом полного внутреннего отражения для излучения с длиной волны  $\lambda_m - \Delta\lambda/2$ , происходит отрезание спектральных компонентов с длинами волн, меньшими  $\lambda_m - \Delta\lambda/2$ .

Итак, при ПВО от  $\text{ГР}^+$  под углом  $\theta_{k1}(\lambda_m + \Delta\lambda/2)$  и последующем ПВО от  $\text{ГР}^-$  под углом  $\theta_{k2}(\lambda_m - \Delta\lambda/2)$  из полихроматического пучка будут выделены спектральные компоненты, находящиеся в полосе шириной  $\Delta\lambda$  с центральной длиной волны  $\lambda_c = \lambda_m$ .

Крутизна левой и правой границ отфильтрованной полосы ( $\lambda_m - \Delta\lambda$ ) ... ( $\lambda_m + \Delta\lambda$ ) определяется  $N_1$  и  $N_2$  — числами отражений пучка, соответственно, от  $\text{ГР}^+$  и  $\text{ГР}^-$ . Изменяя углы падения фильтруемого излучения на  $\text{ГР}^+$  и  $\text{ГР}^-$ , можно изменять  $\lambda_c$  и  $\Delta\lambda$ . Устройства, в которых для фильтрации используется ПВО, могут быть как однокоординатными,

настраиваемыми в процессе фильтрации на каждую фильтруемую длину волны, так и двухкоординатными, не требующими настройки для фильтрации каждой длины волны в заданном диапазоне [12, 13].

Рассмотрим возможную оптическую схему ОС, содержащего двухкоординатное ФУ и матричный тепловизор. Основные элементы ФУ и прибора для регистрации фильтруемых лучей — тепловизора, содержащего объектив и матричный приемник излучения, показаны на рис. 1. Предлагаемая конструкция двухкоординатного ФУ не требует перестройки углов падения фильтруемого излучения для фильтрации любой длины волны в заданном диапазоне и содержит одну пару оптических сред с  $GR^+$ , а другую — с  $GR^-$ . Основными элементами устройства являются три плоскопараллельные пластины 4 из KCl длиной  $L_1$  с поперечным сечением  $a_1 \times b_1$ , разделенные воздушными промежутками толщиной 0,5—1 мм ( $a_1$  — расстояние между гранями, отражающими излучение), и три плоскопараллельные пластины 5 из Ge длиной  $L_2$  с поперечным сечением  $a_2 \times b_2$  ( $a_2$  — расстояние между гранями, отражающими излучение).

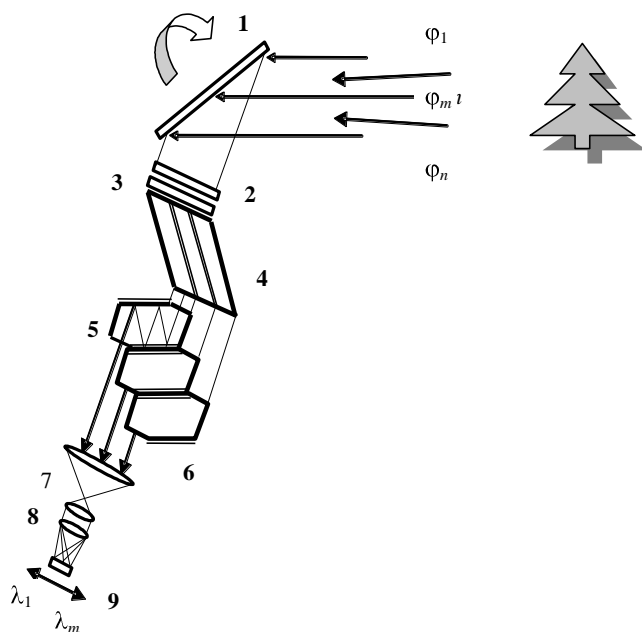


Рис. 1. Оптическая схема ОС:

1 — первое настроечное поворотное зеркало; 2 — поляризатор, пропускающий компоненты входящего излучения с плоскостью поляризации, параллельной плоскости чертежа; 3 — пластина из InAs, поглощающая излучение с  $\lambda < 4$  мкм; 4 — три пластины из KCl, разделенные воздушными промежутками; 5 — три пластины из Ge; 6 — покрытия (пластинки) из  $BaF_2$ ; 7 — телескоп; 8 — объектив тепловизора; 9 — матричный приемник тепловизора

Полированные грани пластин из Ge оптически контактируют с пленками (или тонкими пластинками) 6 из  $BaF_2$ . Торцевые грани пластин 4 и 5 скошены так, чтобы их поверхности были расположены под углами, близкими к  $\pi/2$  к входящим и

выходящим лучам. На выходе устройства расположены согласующий телескоп 7 и объектив 8 с изменяемым фокусным расстоянием, в фокальной плоскости которого находится матричный приемник 9 тепловизора, причем плоскость, в которой находятся фоточувствительные элементы матричного приемника, перпендикулярна плоскости чертежа.

Изображение, формируемое объективом 9 в плоскости матричного приемника, можно перемещать по поверхности последнего в направлении, перпендикулярном его строкам, с помощью его перемещения. (Направления перемещения под углами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_m$  и  $\varphi_n$  показаны стрелками). Кроме того, матричный приемник можно также прецизионно перемещать вдоль оси Z, совпадающей с оптической осью пучка, для того чтобы поместить приемник в плоскость изображения в случае изменения фокусного расстояния объектива. Зеркало 1 может поворачиваться вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа, и предназначено для сканирования сцены.

Настройку ФУ осуществляют следующим образом. По соотношениям (1)—(4), приведенным ниже, определяют длину волны, для которой выполняется равенство  $|d\theta_{k1}/d\lambda| \approx |d\theta_{k2}/d\lambda| \approx 0,2$  град/мкм. Это равенство выполняется, например, при  $\lambda_m \approx 10$  мкм. Рассчитывают  $\theta_{k1}(\lambda_{m1})$  и  $\theta_{k2}(\lambda_{m2})$  и настраивают зеркало 1 и пластины 4 и 5 (см. рис. 1) таким образом, чтобы обеспечить углы падения оси фильтруемого пучка на каждую из границ раздела сред равными:  $\theta_{k1}(\lambda_{m1})$  и  $\theta_{k2}(\lambda_{m2})$ , где  $\lambda_{m1} = \lambda_m + 0,05$  мкм;  $\lambda_{m2} = \lambda_m - 0,05$  мкм (рис. 2). Выбирают коротковолновую  $\lambda_1$  и длинноволновую  $\lambda_n$  границы спектрального диапазона, в котором находятся фильтруемые длины волн, так чтобы выполнялось соотношение  $|\theta_{k1}(\lambda_n) - \theta_{k1}(\lambda_1)| \approx |\theta_{k2}(\lambda_n) - \theta_{k2}(\lambda_1)|$ .

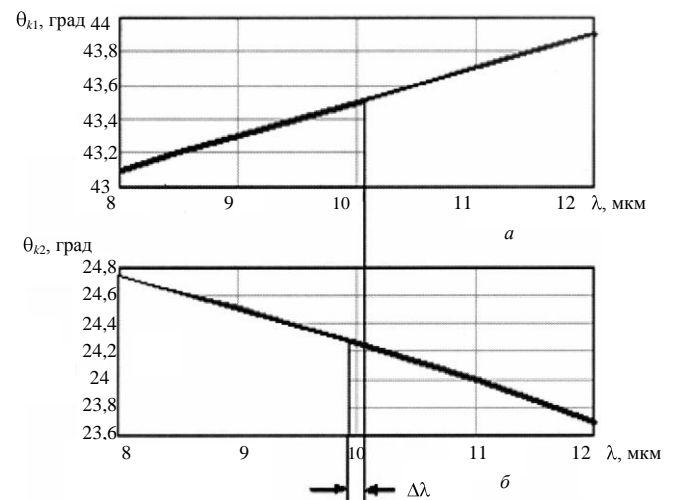


Рис. 2. Расчет углов падения оси фильтруемого пучка на каждую из границ раздела сред:  $a - \theta_{k1}(\lambda)$ ;  $b - \theta_{k2}(\lambda)$

Вычисляют:  $\theta_{k1}(\lambda_n)$ ,  $\theta_{k1}(\lambda_1)$ ,  $\theta_{k2}(\lambda_n)$ ,  $\theta_{k2}(\lambda_1)$  и  $2 \cdot \varphi_{\max} \approx |\theta_{k1}(\lambda_n) - \theta_{k1}(\lambda_1)| \approx |\theta_{k2}(\lambda_n) - \theta_{k2}(\lambda_1)|$ , где  $\theta_{k1}(\lambda_n)$ ,  $\theta_{k1}(\lambda_1)$ ,  $\theta_{k2}(\lambda_n)$ ,  $\theta_{k2}(\lambda_1)$  — критические углы полного внутреннего отражения, соответственно, для первой и второй пар оптических сред;  $2 \cdot \varphi_{\max}$  — расчетный угол поля зрения ФУ.

Далее для регистрации отфильтрованного изображения устанавливают фокусное расстояние объектива 9 так, чтобы  $\lambda_1$  и  $\lambda_n$  попадали на крайние строки матрицы. На рис. 2, поясняющем, как происходит фильтрация, показаны (на спектральном участке 8—12 мкм) зависимости  $\theta_{k1}(\lambda)$  и  $\theta_{k2}(\lambda)$ , рассчитанные, соответственно, для пары КС1—воздух, образующей ГР<sup>+</sup>, и пары Ge—BaF<sub>2</sub>, образующей ГР<sup>-</sup>. (При расчетах использовались зависимости показателей преломления от длины волны для КС1, Ge, BaF<sub>2</sub>, приведенные в [14]). Выражения, по которым проводят расчеты, имеют следующий вид:

- для расчета  $\theta_{k1}(\lambda)$  — зависимости критических углов ПВО от длины волны для пары сред КС1—воздух:

$$\theta_{k1}(\lambda) = \text{asin} \left( \frac{1}{A_1 / B_1} \right) \cdot \frac{180}{\pi}; \quad (1)$$

- для расчета  $d\theta_{k1}/d\lambda$  — зависимости производной критических углов ПВО от длины волны для (ГР<sup>+</sup>)-пары сред КС1 — воздух:

$$\frac{d\theta_{k1}}{d\lambda} = \frac{180}{\pi} \times \left\{ \frac{-26,057}{A_1^2} \cdot 1 + 17,055 \cdot \lambda + 7,814 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda^2 + \frac{1}{A_1} \cdot 17,055 + 0,156 \cdot \lambda \right\} / \left( 1 - \frac{1}{A_1^2} \cdot B_1^2 \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где  $A_1 = 3,676 \cdot 10^{-6} + 26,057 \cdot \lambda$ ;  $B_1 = 1 + 17,055 \cdot \lambda + 0,0781 \cdot \lambda^2$ ;

- для расчета  $\theta_{k2}(\lambda)$  — зависимости критических углов ПВО от длины волны для пары сред Ge—BaF<sub>2</sub>:

$$\theta_{k2}(\lambda) = \text{asin} \left( \frac{1}{A_2 / B_2} \right) \cdot \frac{180}{\pi}; \quad (3)$$

- для расчета  $d\theta_{k2}/d\lambda$  — зависимости производной критических углов ПВО от длины волны для (ГР<sup>-</sup>) — пары сред Ge—BaF<sub>2</sub>:

$$\frac{d\theta_{k2}}{d\lambda} = \frac{180}{\pi} \cdot \left\{ \frac{-B_2}{A_2^2} \cdot \left( \frac{-0,783414}{C_2^2} \cdot \lambda - \frac{0,653968}{C_2^3} - D_2 \right) + \frac{1}{A_2} \cdot \left( -5,734 \cdot \frac{10^{-3}}{C_2^2} \cdot \lambda - 2,56 \cdot \frac{10^{-4}}{C_2^3} \cdot \lambda - D_2 \right) \right\} / \left( 1 - \frac{B_2^2}{A_2^2} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

где  $A_2 = 3,99931 + \frac{0,391707}{C_2} + \frac{0,163492}{C_2^2} - E_2$ ;

$$B_2 = 1,46620 + 2,867 \cdot \frac{10^{-3}}{C_2} + 6,4 \cdot \frac{10^{-5}}{C_2^2} - E_2;$$

$$C_2 = \lambda^2 - 2,8 \cdot 10^{-2};$$

$$D_2 = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda + 2,12 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^3;$$

$$E_2 = 6,0 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^2 + 5,3 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^4.$$

Рассмотрим работу устройства на следующем примере. Пусть требуется выделить из исходного полихроматического пучка монохроматические лучи с длинами волн, попадающими в спектральный диапазон от  $\lambda_1 = 7,8$  мкм до  $\lambda_n = 13,3$  мкм, при этом примем, что направление распространения монохроматического луча с длиной волны  $\lambda_m = 10,9$  мкм совпадает с оптической осью исходного полихроматического пучка (т. е.  $\varphi \approx 0$ ). Для выбранного спектрального диапазона (по соотношениям (1)—(4)) определим:

$$\begin{aligned} \theta_{k1}(\lambda_n) &= 44,3^\circ; \theta_{k1}(\lambda_1) = 43,1^\circ; \theta_{k1}(\lambda_{m1}) = 43,7^\circ; \\ \theta_{k2}(\lambda_n) &= 19,7^\circ; \theta_{k2}(\lambda_1) = 20,9^\circ; \theta_{k2}(\lambda_{m2}) = 20,3^\circ \text{ и} \\ 2 \cdot \varphi_{\max} &\approx |\theta_{k1}(\lambda_n) - \theta_{k1}(\lambda_1)| \approx |\theta_{k2}(\lambda_n) - \theta_{k2}(\lambda_1)| \approx 1,2^\circ, \end{aligned}$$

Все элементы спектрального фильтра изображений (зеркало 1, пластины 4 и 5, (см. рис. 1) юстируют таким образом, чтобы пучок регистрируемого полихроматического излучения, распространяющийся в пределах угла  $2 \cdot \varphi_{\max}$ , падал на внутренние грани пластины 4 так, чтобы угол между оптической осью пучка и нормалью к первой границе раздела, образуемой гранью пластины 4 и воздухом, был равен критическому углу  $\theta_{k1}(\lambda_{m1}) = 43,7^\circ$  для излучения с длиной волны  $\lambda_{m1}$  и после прохождения пластины 4 падал на внутренние грани пластины 5 так, чтобы угол между оптической осью пучка и нормалью к второй границе раздела, образуемой гранью пластины 5 и пластиной 6, был равен критическому углу  $\theta_{k2}(\lambda_{m2}) = 20,3^\circ$  для излучения с длиной волны  $\lambda_{m2}$ . Телескоп 7, объектив 8 и матричный приемник 9 (см. рис. 1) устанавливают так, чтобы луч, совпадающий с осью пучка (луч  $\varphi_m \approx 0$ ), фокусировался в центре матричного приемника. При выполнении этих условий строка, расположенная в центре матричного приемника, будет принимать излучение от оптически сопряженных с ней точек наблюдаемого объекта на длине волны  $\lambda_m \approx 10,9$  мкм. На рис. 3 показаны зависимости контуров пропускания ФУ с ПВО, рассчитанные для лучей, распространяющихся под различными углами  $\varphi$  к оси исходного полихроматического пучка. (Исходные данные, при которых проводилась расчеты, приведены ниже). Излучение, падающее на отражающие грани пластины 4 (см. рис. 1) под углом  $43,1^\circ$  и

далее на отражающие грани пластины 6 под углом  $20,9^\circ$  (лучи  $\varphi_1$ , рис.1) будет иметь (после прохождения пластин 4 и 5) длину волны  $\lambda_1 \cong 7,8$  мкм и облучать крайнюю левую строку матричного приемника. На рис. 3 показана расчетная зависимость  $R1$  относительной интенсивности этого излучения от длины волны. Излучение, падающее на отражающие грани пластин 4 под углом  $43,3^\circ$  и далее на отражающие грани пластины 5 под углом  $19,7^\circ$  (лучи  $\varphi_n$ ), будет иметь (после прохождения пластин 4 и 5) длину волны  $\lambda_n \cong 13,3$  мкм и облучать крайнюю правую строку матричного приемника. В этом случае на рис. 3 показана расчетная зависимость  $R7$  относительной интенсивности этого излучения от длины волны).

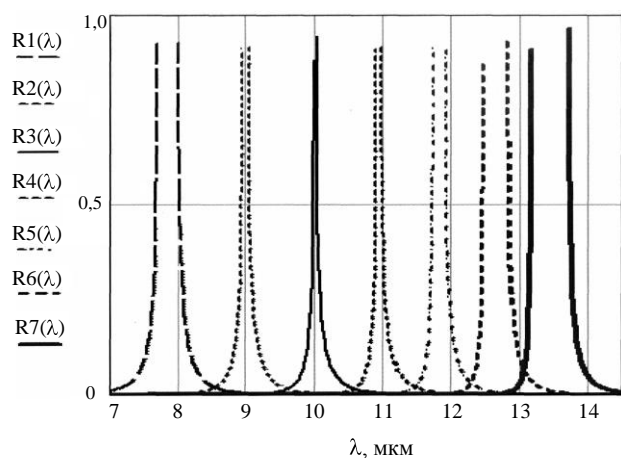


Рис. 3. Зависимости контуров пропускания ФУ с ПВО, рассчитанные для лучей, распространяющихся под различными углами  $\varphi$  к оси исходного полихроматического пучка:

$R1$  —  $\varphi = -0,6^\circ$ ;  $R2$  —  $\varphi = -0,4^\circ$ ;  $R3$  —  $\varphi = -0,2^\circ$ ;  $R4$  —  $\varphi = 0^\circ$ ;  
 $R5$  —  $\varphi = 0,2^\circ$ ;  $R6$  —  $\varphi = 0,4^\circ$ ;  $R7$  —  $\varphi = 0,6^\circ$

Таким образом, любые полихроматические лучи исходного пучка, распространяющиеся под углами  $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_n$  к оси исходного луча в плоскости (см. рис. 1) будут отфильтрованы, станут монохроматическими лучами с длинами волн, определяемыми их угловой координатой в этой плоскости — углом  $\varphi$  наклона луча к оптической оси фильтруемого пучка. При этом каждый отфильтрованный монохроматический луч будет сфокусирован в точку, находящуюся на строке матричного приемника, соответствующей этой длине волны. Очевидно, что в результате такой оптической фильтрации на матрице формируется изображение наблюдаемого объекта, где на каждую строку поступает излучение от оптически сопряженных с ней точек объекта на длине волны, соответствующей порядковому номеру (угловой координате  $\varphi$ ) этой строки. При расчетах интенсивностей излучений, прошедших через пластины 3 и 6 для каждой пары оптических сред, использовалось выражение

$$R_{\perp}(\lambda) = \frac{\sin^2[\arcsin n(\lambda) \cdot \sin(\theta(\lambda))] - \theta(\lambda)}{\sin^2[\arcsin n(\lambda) \cdot \sin(\theta(\lambda))] + \theta(\lambda)},$$

где  $n(\lambda) = n_1(\lambda)/n_2(\lambda)$ ;

$R_{\perp}(\lambda)$  — коэффициент отражения для пучка с поляризацией, перпендикулярной плоскости падения.

Полагалось, что для каждой длины волны интенсивности излучений, прошедших через пластины 3 и 6, пропорциональны  $R_{\perp}$ , причем для достижения необходимого разрешения использовались восемь отражений от поверхностей раздела КС1—воздух ( $N_1 = 8$ ) и четыре отражения от поверхностей раздела Ge—BaF<sub>2</sub> ( $N_2 = 4$ ). Приведенные зависимости позволяют сделать оценки  $\Delta\lambda$  — ширины полосы пропускания этого варианта ФУ. Ширина полосы пропускания различна для разных длин волн. Так, например, ширина полосы пропускания  $\Delta\lambda$  (по уровню 0,5) зависимости  $R1(\lambda)$  равна  $\cong 0,35$  мкм, для  $R2(\lambda) \cong 0,15$  мкм, для  $R3(\lambda) \cong 0,1$  мкм и  $R4(\lambda) \cong 0,2$  мкм, для  $R5(\lambda) \cong 0,3$  мкм, для  $R6(\lambda) \cong 0,4$  мкм, для  $R7(\lambda) \cong 0,6$  мкм. Видно, что в диапазоне между 9 и 11 мкм ширина полосы пропускания спектральной фильтрации изображений (СФИ) имеет минимальные значения, а при движении в сторону более коротких и более длинных длин волн ширина полосы быстро увеличивается. Положительной стороной подобной зависимости  $\Delta\lambda$  от  $\lambda$  является то обстоятельство, что в диапазоне 9—11 мкм находятся максимумы излучения объектов, температуры которых мало отличаются от температуры окружающей среды на поверхности Земли, и в этом же диапазоне длин волн имеют максимальную обнаружительную способность фотоприемники на основе соединений кадмий—ртуть—теллур (КРТ).

Определим размеры пластин и максимальное число мод  $M$  [15], которое можно пропустить через ФУ на длине волны  $\lambda$ . Пусть  $s_1$  и  $s_2$  — площади поперечного сечения, соответственно, первой (из КС1) и второй (из Ge) пластин и  $s_1 = a_1 \cdot b_1$ ,  $s_2 = a_2 \cdot b_2$ , где  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , — соответственно, толщина и ширина каждой пластины. Пусть  $\alpha$  и  $\beta$  — углы падения излучения на входные грани (соответственно, первой и второй пластин) равны  $90^\circ$ ; пусть плоскость  $YZ$  параллельна плоскости на рис. 1. Углы  $\varphi_{1a1}$  и  $\varphi_{1b1}$  (соответственно, в плоскостях  $YZ$  и  $XZ$ ), в пределах которых может распространяться фильтруемое излучение через первую пластинку, определяются с помощью соотношений

$$\varphi_{1a1} \leq d\theta_{k1}/d\lambda \cdot \Delta\lambda = (d\theta_{k1}/d\lambda) \cdot \lambda/A;$$

$$\varphi_{1b1} \leq \text{atan}(b_1/(N_1 \cdot a_1 \cdot \tan\theta_{k1})),$$

при этом  $a_1$  — толщина пластинки должна быть такой, чтобы  $\varphi_{d1}$  — дифракционный угол расходи-

мости излучения в плоскости  $YZ$  на апертуре пластинки был бы меньше, чем  $\varphi_{1a1}$ , т. е.

$$\varphi_{d1} = \frac{1,22 \cdot \lambda}{a_1} \cdot \sin \theta_{k1} \leq \varphi_{1a1}$$

$$\text{и } a_1 \geq 1,22 \cdot \lambda \cdot \sin \theta_{k1} / \varphi_{1a1}.$$

Такой же вид будут иметь выражения для углов, в пределах которых может распространяться фильтруемое излучение через вторую пластинку.

Пусть  $Z_1, Z_2$  — число пластин в блоках из КСl и Ge, соответственно;  $N_1, N_2$  — число отражений в пластинах из КСl и Ge, соответственно. Длины пластин из КСl и Ge:

$$L_1 = a_1 \cdot \tan(\theta_{k1}) \cdot (N_1 + 1);$$

$$L_2 = a_2 \cdot \tan(\theta_{k2}) \cdot (N_2 + 1).$$

Длины оптических путей излучения в пластинках из КСl и Ge, соответственно, равны

$$L_{o1} = \frac{a_1}{\cos(\theta_{k1})} \cdot (N_1 + 1);$$

$$L_{o2} = \frac{a_2}{\cos(\theta_{k2})} \cdot (N_2 + 1).$$

Площади торцевых граней блоков пластин из КСl и Ge (граней, через которые фильтруемое излучение входит и выходит из пластин) равны

$$S_{e1} = H_1 \cdot b_1; \quad S_{e2} = H_2 \cdot b_2,$$

$$\text{где } H_1 = \frac{a_1}{\cos(\theta_{k1})} \cdot Z_1;$$

$$H_2 = \frac{a_2}{\cos(\theta_{k2})} \cos \times \left( \frac{\pi}{2} - \theta_{k2} \right) \cdot Z_2.$$

При  $Z_1 = Z_2$  и  $S_{e1} = S_{e2} = S_e$  максимальное число мод (с длиной волны  $\lambda$ ), распространяющихся в пределах угла  $\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_1$  и попадающих на матричный приемник, рассчитывается по следующему выражению:

$$M = \frac{\pi}{2} \Delta\varphi^2 \frac{S_e}{\lambda^2}.$$

Пусть требуется разработать устройство для спектральной фильтрации с разрешающей способностью  $A = \lambda/\Delta\lambda = 100$  на  $\lambda = 10$  мкм с числом мод, пропускаемых фильтром  $M \geq 10^4$ . Расчеты по приведенным выше соотношениям показывают возможность построения ФУ со спектральными характеристиками, показанными на рис. 3, при числе отражений  $N_1 = 8$  от ГР КСl—воздух и при числе отражений  $N_2 = 4$  от ГР Ge—BaF<sub>2</sub> и при следующих размерах пластин:  $a_1 = 7,8$  мм;  $b_1 = 90$  мм;  $a_2 = 30$  мм;  $b_2 = 90$  мм;  $L_1 = 70$  мм;  $L_2 = 54$  мм и  $L_{o1} = 100$  мм,  $L_{o2} = 160$  мм,  $Z_1 = Z_2 = 5$ . При этом число мод (на  $\lambda = 10$  мкм), пропускаемых фильтром, будет равно  $1,7 \cdot 10^4$ .

Пропускание ФУ будет в основном определяться поглощением проходящего излучения в пласти-

нах из Ge. При длине оптического пути в Ge  $L_{o2} = 160$  мм и показателе поглощения излучения с  $\lambda \approx 10$  мкм, равном  $0,025 \text{ см}^{-1}$ , поглощение в пластинках из Ge равно 33 %.

Для реализации режима SI необходимо провести сканирование (с помощью прецизионного вращения зеркала 1 (см. рис. 1)) изображения объекта по матрице так, чтобы изображение объекта перемещалось в направлении, перпендикулярном строкам матрицы. При этом из излучения, исходящего от каждого фрагмента наблюдаемого объекта, отфильтровывается составляющая с длиной волны, соответствующей номеру той строки, и на один из чувствительных элементов которой в данный момент фокусируется это излучение. Сканирование можно производить дискретными шагами или непрерывно.

При шаговом сканировании за каждый шаг изображение каждой точки объекта перемещается на соседнюю строку. За время между двумя последовательными шагами производятся регистрация и запись в памяти компьютера сигналов от всех элементов матрицы — запись кадра.

В случае непрерывного сканирования запись кадра проводится за время перемещения изображения каждой точки на чувствительный элемент соседней строки.

Таким образом, для записи "многоспектрального" изображения объекта требуется записать число кадров, равное удвоенному числу строк матрицы. Далее из полученного трехмерного (две пространственные и спектральная координаты) массива информации на монитор можно выводить моноспектральное изображение — изображение объекта в выбранном узком спектральном диапазоне.

Поскольку фильтрация излучения происходит только вследствие ПВО выбранных спектральных компонентов от ГР- сред (материалов), прозрачных в рабочем спектральном диапазоне, ФУ не требует охлаждения при работе с охлаждаемыми приемниками.

Следует отметить, что фильтр, отсекающий излучение с  $\lambda < 4$  мкм (показанный на рис. 1, поз. 8), не является обязательным атрибутом ФУ с ПВО. Чтобы отпала необходимость в этом фильтре, достаточно увеличить коротковолновую границу фильтруемого диапазона с 4 до 6 мкм, т. е. в рассматриваемом варианте ФУ с ПВО этот фильтр не нужен. Однако подобный фильтр необходим в варианте ФУ с ПВО, работающем в спектральном диапазоне 4,5—16 мкм [12].

## Заключение

Отметим достоинства и недостатки, присущие предложенному ФУ и ОС на его основе.

Достоинством ФУ с ПВО является то, что это устройство может быть сделано из материалов, прозрачных в области спектральной чувствительности приемника излучения, и, следовательно, оно не требует охлаждения. Надо также отметить, что подобный ОС в процессе работы не требует юстировки зеркал и пластин.

К недостаткам этого варианта ФУ и ОС можно отнести малый угол поля зрения и существенную зависимость аппаратной функции от длины волны.

Отличительной особенностью предложенного ОС является принципиальная возможность регистрировать быстропротекающие процессы путем получения мгновенного "изображения с разноцветными строками", т. е. изображения, в котором каждая строка отображает интенсивность излучения только с определенной длиной волны, соответствующей номеру этой строки от оптически сопряженной с этой строкой полосы сцены. Например, верхняя строка отображает интенсивность излучения с длиной волны 7,8 мкм от оптически сопряженной с ней полосы сцены, а нижняя строка матричного приемника регистрирует излучение только с длиной волны 13,3 мкм от оптически сопряженной с ней полосы сцены. Такое изображение получается без всякого сканирования за время накопления кадра  $\sim 10^{-2}$ — $10^{-4}$  с. При наблюдении неподвижных объектов этот ОС обеспечивает накопление пространственной и спектральной информации ("куба данных") путем сканирования изображения в плоскости матричного приемника, осуществляемого с помощью качания зеркала 1 (см. рис. 1) вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа. В этом случае можно получать монохромные изображения в любой из  $N_y$ , где  $N_y$  — число строк матричного приемника узких спектральных полос рабочего диапазона ФУ.

#### Литература

1. Chang I. C.//Tunable acoustooptic filtering. An overview: Proc. SPIE, 1976. V. 90. P. 12—22.

2. Волошинов В. Б., Миронов О. В.//Спектральная акусто-оптическая фильтрация изображений в ближнем ИК-диапазоне//Письма в ЖТФ. 1988. Т.14. № 17. С. 1541—1544.

3. Волошинов В. Б., Миронов О. В., Парыгин В. Н.//Видео-фильтр на кристалле парателлуриата. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. 1989. Т. 30. № 2. С. 41—45.

4. Suhre D. R., Gottlieb M., Taylor L. H., Melamed N. T.// Spatial resolution of imaging noncollinear acousto-optic filters. Opt. Eng., 1992. V. 31. P. 2118—2121.

5. Glenar D. A., Hillman J. J., Saif B., Bergstrahl J. Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing//Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 7412—7424.

6. Gupta N., Dahmani R., Bennett K. et al. Progress in AOTF hyperspectral imagers: Proc. SPIE. 2000. V. 4054. P. 30—38.

7. Пустовойт В. И., Пожар В. Э.//ЛАЗЕР ИНФОРМ: Информ. бюллетень лазерной ассоциации. 2004. Июнь. Вып. № 11—12 (290—291).

8. Schaeppner M. E., Schlapfer D., Muller A. Performance Requirements for Air borne Imaging Spectrometers: Proc. of SPIE. 2002. V. 4480. P. 23—31; Gao Zhan, Kazuhiiko Oka, Tsuyoshi Ishigaki, and Naoshi Bada. Static Fourier — transform spectrometer based on Savart polariscope: Ibid. P. 198—203.

9. Curtis E. Volin, Jhon P. Garcia, Eustace L. Dereniak, Michael R. Descour. Midwave-Infrared Snapshot Imaging Spectrometer: Ibid. P. 355—366.

10. R. Glenn Sellar, Glenn D. Boreman, Laurel E. Kirkland. Comparison of signal collection abilities of different classes of imaging spectrometers: Ibid. V. 4816.

11. Robert Harring, Randy Pollock, Richard Cross.//Wide — field — of View Imaging Spectrometr (WFIS) Enginiring Model Laboratory tests and Field Demonstration: Ibid. 2003. V. 5152. P. 51—59.

12. Филачев А. М., Сагинов Л. Д., Кононов А. С., Свиридов А. Н., Бакуменко В. Л. Спектральная фильтрация изображений с использованием явления полного внутреннего отражения// Электронный журнал "Исследовано в России". 2005. № 159. С. 1656—1671. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/159.pdf>.

13. Anatoly M. Filachev, Leonid D. Saginov, Andrey S. Kononov, Anatoly N. Sviridov, Vladimir L. Bakumenko, Konstantin O. Boltar "Spectral filtration of images in the IR spectral region with use of phenomenon of total internal reflection and multibeam interference"//DEFENSE & SECURITY Symposium. An SPIE Event.17—21 April 2006, SPIE PAPER NO 6206-107 poster. Orlando, Florida USA.

14. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П.//Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.

15. Гальярди Р. М., Карп Ш.//Оптическая связь. — М.: Связь, 1978.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2007 г.

## Filtering device on the basis of optical detail with positive and negative by derivative of relations of angles of full internal reflection to a wavelength

A. M. Filachev, L. D. Saginov, A. S. Kononov, A. N. Sviridov, V. L. Bakumenko  
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*The new type of filtering devices is offered on the basis of optical members with positive and negative by derivative of relations of angles of full internal reflection to a wavelength and new type of imaging spectrometers on the basis of these devices and matric thermal imager. The calculations of parameters of such filtering device and imaging spectrometer are conducted. It is expected, that the similar imaging spectrometers can be suitable for obtaining the spectral maps of fast flowing past processes.*