

Рис. 4. Функциональная схема установки:

1 — СВЧ-генератор; 2 — резонансный волномер; 3 — вентиль; 4 — измерительный резонатор; 5 — детектор; 6 — осциллограф; 7 — генератор пилообразного напряжения

Изменение измерительного зазора (паза) от 1 до 3 мм не изменяет чувствительности резонансного преобразователя. Эта чувствительность определяется по формуле

$$k = \frac{\Delta f}{f_0 \Delta d},$$

где Δd — толщина слоя диэлектрика.

Повышение рабочих частот приводит к увеличению чувствительности, так как длина резонатора l может быть значительно уменьшена. На рис. 5 приведена зависимость собственной частоты резонатора f от заполнения измерительного зазора Δd^* и зависимость Δf от Δd^* для зазора (паза) $\Delta l = 2$ мм.

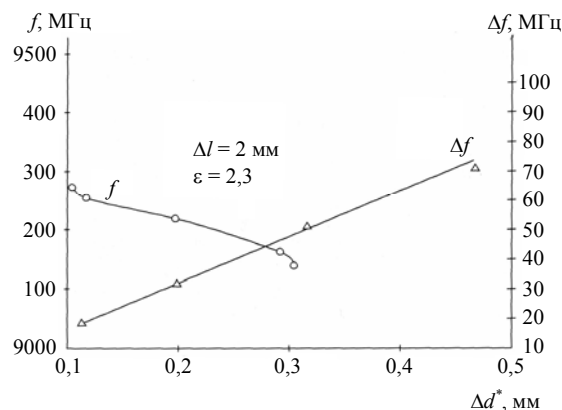


Рис. 5. Зависимости собственной частоты резонатора f от толщины диэлектрика Δd^* и изменения частоты Δf резонатора от Δd^* при $\Delta l = 2$ мм (пленка полиэтилена — $\varepsilon = 2,3$)

Статья поступила в редакцию 12 июня 2004 г.

Transformation of microwave oscillations in electrodynamic systems with dielectric

I. N. Antonov, A. V. Pivovarov

Saratov State Technical University, Saratov, Russia

G. A. Ovchinnikova

Moscow Aircraft Institute (Technical University), Moscow, Russia

The computational methods for microwave resonators, filled by dielectric, have been surveyed in the paper.

УДК 621.384.3

Использование явления полного внутреннего отражения для спектральной фильтрации изображений

А. М. Филачев, Л. Д. Сагинов, А. С. Кононов, А. Н. Свиридов, В. Л. Бакуменко

ФГУП «Научно-производственное объединение «ОРИОН»» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Обсуждаются перспективы построения и достижимые параметры спектральных фильтров с использованием явления полного внутреннего отражения от двух различных границ раздела оптических сред: границы раздела с положительной и границы раздела с отрицательной производными зависимостей угла полного внутреннего отражения (ПВО) от длины волны. Подобные фильтры могут представлять интерес для построения устройств, обеспечивающих получение изображений объектов в заданных узких спектральных диапазонах — spectral imaging (SI).

В последние годы возрастает внимание к устройствам, обеспечивающим получение изображений объектов в заданных узких спектральных диапазонах. 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 излу-

чения. 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 как методы непосредственной оптической фильтрации принимаемого излучения с помощью перестраиваемых оптических фильтров различных видов

(акустооптические, интерференционные, интерференционно-поляризационные и др.) [1—7], так и методы выделения спектральных изображений, основанные на компьютерной обработке оптических полей, регистрируемых матричным приемником (например, сигналов после Фурье — интерферометра, голограмм и др.) [8—13].

В настоящей работе обсуждаются перспективы построения и достижимые параметры спектральных фильтров с использованием явления полного внутреннего отражения от двух различных границ раздела оптических сред: границы раздела с положительной и границы раздела с отрицательной производными зависимостей угла полного внутреннего отражения (ПВО) от длины волны. В литературе имеются сведения о фильтрах на основе явления полного внутреннего отражения с использованием сред, образующих границы раздела с положительной зависимостью производной угла полного внутреннего отражения от длины волны [14, 15]. В работе [15] дано краткое описание отсекающего фильтра — фильтра Брумберга. Фильтр состоит из кварцевых призм, разделенных тонким слоем парафинового масла, и его длинноволновая граница определяется пропусканием этого материала.

Метод фильтрации

Пусть световой пучок с длиной волны λ , распространяющийся в среде с показателем преломления n_1 , падает на границу раздела сред под углом θ_1 , причем вторая среда имеет меньший показатель преломления n_2 , чем первая, и распространяется во второй среде под углом θ_2 . В случае, если величина угла падения θ_1 будет больше θ_k (θ_k — критический угол, зависящий от показателей преломления сред и длины волны), световой пучок полностью отразится от границы раздела сред (явление

полного внутреннего отражения) и вернется в среду с показателем преломления n_1 .

Согласно закону Снеллиуса имеем

$$\frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} = \frac{n_1}{n_2} = n \text{ (при } \theta_1 = \theta_k, \theta_2 = \pi/2\text{)}. \quad (1)$$

С учетом зависимостей показателей преломления от длины волны

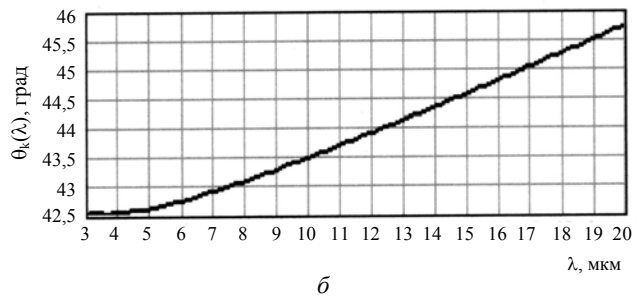
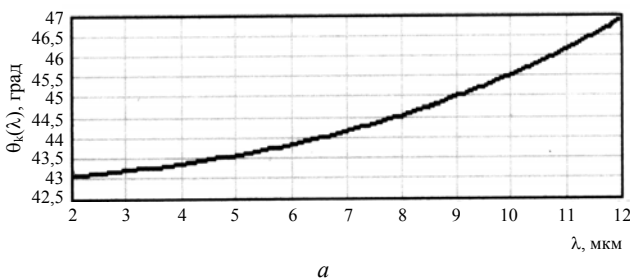
$$\theta_k(\lambda) = \arcsin(1/n(\lambda)), \text{ где } n(\lambda) = n_1(\lambda)/n_2(\lambda). \quad (2)$$

Следует отметить, что у оптических материалов абсолютные показатели преломления и показатели преломления относительно воздуха уменьшаются при увеличении длины волны [16]. Поэтому в соответствии с выражением (2) зависимости величин критических углов полного внутреннего отражения (ПВО) от длины волны для границ раздела материал—воздух будут возрастать.

Таким образом, все используемые в ИК-оптике материалы образуют с воздухом или вакуумом границы раздела с положительной производной угла ПВО, т. е. для них $d\theta_k/d\lambda > 0$. В качестве примера на рис. 1, а—в показаны зависимости $\theta_k(\lambda)$, рассчитанные для границ раздела различных пар сред, одной из которых является воздух: BaF₂—воздух, KCl—воздух, CaF₂—воздух.

На основе этих пар сред с положительной производной угла ПВО (в более плотной среде) можно делать отсекающие фильтры (аналогичные по принципу действия фильтру Брумберга), но работающие в средней и дальней ИК-областях спектра.

В результате проведенного анализа комбинаций различных сред были предложены пары, образующие границы раздела с отрицательной производной угла ПВО в интересующей нас ИК-области спектра. Для примера на рис. 1, г—е приведены зависимости $\theta_k(\lambda)$, рассчитанные для границ раздела следующих материалов: Ge—BaF₂, BaF₂—CaF₂, Si—BaF₂.



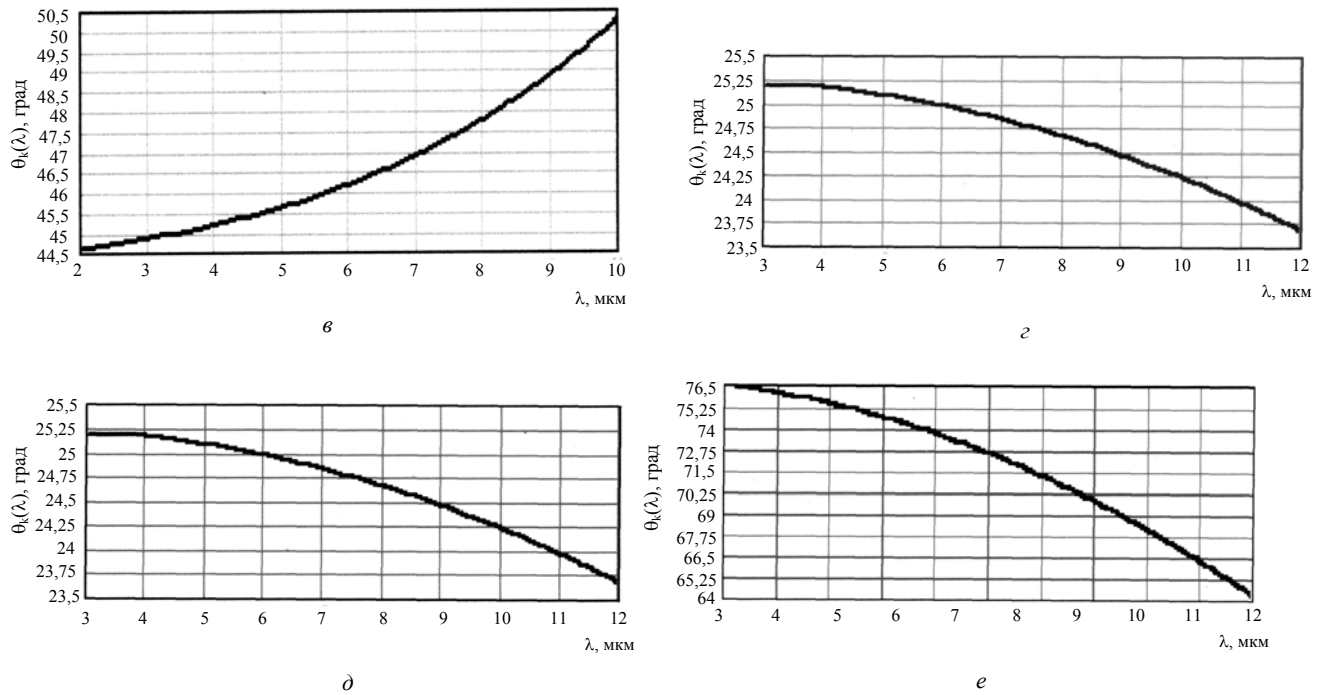


Рис. 1. Зависимости критических углов полного внутреннего отражения $\theta_k(\lambda)$ для границ раздела сред: а — BaF₂—воздух; б — KCl—воздух; в — CaF₂—воздух; г — Si—BaF₂; д — Ge—BaF₂; е — BaF₂—CaF₂

Для построения полосовых фильтров с резкими границами представляется целесообразным использовать пары сред, образующих границы раздела не только с положительной, но и с отрицательной (с $d\theta_k/d\lambda < 0$) производной угла ПВО в более плотной среде.

Зависимости коэффициентов отражения от границ разделов сред описываются следующими выражениями [16]:

$$R_{\perp}(\lambda) = \frac{\sin^2(\arcsin(n(\lambda)\sin(\theta_1(\lambda))) - \theta_1(\lambda))}{\sin^2(\arcsin(n(\lambda)\sin(\theta_1(\lambda))) + \theta_1(\lambda))};$$

$$R_{\parallel}(\lambda) = \frac{\text{tg}^2(\theta_1(\lambda) - \arcsin(n(\lambda)\sin(\theta_1(\lambda))))}{\text{tg}^2(\theta_1(\lambda) + \arcsin(n(\lambda)\sin(\theta_1(\lambda))))};$$

$$R(\lambda) = \frac{R_{\parallel}(\lambda) + R_{\perp}(\lambda)}{2},$$

где R_{\perp} , R_{\parallel} — коэффициенты отражения от границы раздела двух сред для лучей, у которых вектор поляризации перпендикулярен и параллелен, соответственно, плоскости падения;

R — коэффициент отражения для неполяризованных лучей.

Наиболее резкая зависимость коэффициента отражения от угла падения имеет место для $R_{\parallel}(\theta)$ (p — компоненты поляризации). Поэтому для увеличения разрешающей способности в устройствах, реализующих метод фильтрации, целесообразно устанавливать на входе поляризатор, выделяющий из исследуемого излучения p -компоненту поляризации.

Если направить полихроматический пучок света, распространяющийся в среде с показателем преломления n_1 к границе раздела сред, у которой $d\theta_{k_1}/d\lambda > 0$, под углом, равным критическому $\theta_{k_1}(\lambda_{k_1})$ для одной из длин волн (λ_{k_1}), то лучи с $\lambda < \lambda_{k_1}$ будут отражаться от границы раздела сред, а лучи с $\lambda > \lambda_{k_1}$ будут проходить через границу раздела сред.

Если же направить полихроматический пучок света, распространяющийся в среде с показателем преломления n_1 , к границе раздела сред, у которой $d\theta_{k_2}/d\lambda < 0$, под углом, равным критическому $\theta_{k_2}(\lambda_{k_2})$ для одной из длин волн (λ_{k_2}), то лучи с $\lambda > \lambda_{k_2}$ будут отражаться от границы раздела сред, а лучи с $\lambda < \lambda_{k_2}$ будут проходить через границу раздела сред.

Если полихроматическое излучение последовательно отражается от границы раздела сред с положительной производной угла ПВО и от границы раздела сред с отрицательной производной угла ПВО под углами равными, соответственно, $\theta_{k_1}(\lambda_{k_1})$ и $\theta_{k_2}(\lambda_{k_2})$ при $\lambda_{k_2} < \lambda_{k_1}$, то модифицирование спектра светового потока после двух отражений будет таким, как после прохождения через полосовой фильтр с $\Delta\lambda \approx \lambda_{k_1} - \lambda_{k_2}$.

При $\lambda_{k_2} = \lambda_{k_1} = \lambda_k$ получается фильтр с шириной пропускания, определяемой дисперсией углов $\theta_{k_1}(\lambda)$ и $\theta_{k_2}(\lambda)$ и числом отражений от границ разделов сред.

Таким образом, можно осуществлять спектральную фильтрацию оптического пучка. Настройку на заданную длину волны производится путем настройки углов падения в соответствии с выражениями (1) и (2) и графиками, приведенными на рис. 1.

Предлагаемый метод фильтрации может быть реализован с помощью различных оптических устройств [17]:

- однокоординатных, требующих в процессе фильтрации настройки на каждую фильтруемую длину волны;

- двухкоординатных, не требующих настройки для фильтрации каждой длины волны в заданном диапазоне.

Рассмотрим возможную оптическую схему двухкоординатного спектрального фильтра изображения (СФИ). Основные элементы фильтра и устройства для регистрации фильтруемых лучей — тепловизора, содержащего объектив и матричный приемник излучения, показаны на рис. 2.

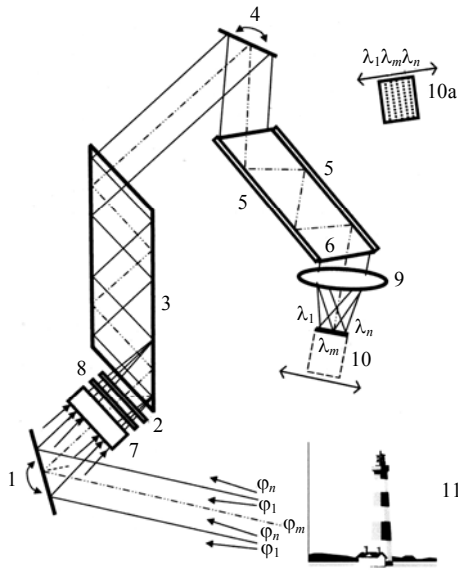


Рис. 2. Оптическая схема спектрального фильтра изображения:

- 1 — первое настроечное поворотное зеркало; 2 — поляризатор, пропускающий компоненты входящего излучения с плоскостью поляризации, параллельной плоскости чертежа; 3 — пластина из KCl; 4 — второе настроечное поворотное зеркало; 5 — пластины из BaF₂; 6 — пластина из Ge;
- 7 — блок прямоугольных диафрагм, ограничивающих плоский угол до величины 2φ_{max}; 8 — пластина из InAs, поглощающая излучение с λ < 3—8 мкм; 9 — объектив тепловизора; 10 — матричный приемник тепловизора; 11 — наблюдаемый объект

Предлагаемая конструкция двухкоординатного фильтра (фильтра изображения) не требует перестройки углов падения фильтруемого излучения для фильтрации любой длины волны в заданном диапазоне и содержит две пары оптических сред, для одной из которых производная зависимости угла полного внутреннего отражения (ПВО) от длины волны положительная, а для другой пары — отрицательная.

Основными элементами устройства являются плоскопараллельные пластины 3 (см. рис. 2) из KCl длиной L₁ с поперечным сечением a₁ × b₁ (a₁ — расстояние между гранями, отражающими излучение) и 6 — из Ge длиной L₂ с поперечным сечением a₂ × b₂ (a₂ — расстояние между гранями, отражающими излучение). К обеим полированным граням пластины из Ge прикреплены (например, на оптическом контакте) пластины 5 из BaF₂. Торцевые грани пластин 3 и 6 скошены так, чтобы их поверхности были расположены под углами, близкими π/2 к входящим и выходящим лучам.

На выходе устройства расположен объектив 9 с изменяемым фокусным расстоянием, в фокальной плоскости которого находится матричный приемник 10 тепловизора, причем плоскость, в которой находятся фоточувствительные элементы матричного приемника, перпендикулярна плоскости чертежа. На позиции 10a (см. рис. 2) эта плоскость показана повернутой на 90°, так чтобы она совпадала с плоскостью чертежа. Изображение, формируемое объективом 9 в плоскости матричного приемника, можно перемещать по поверхности приемника в направлении, перпендикулярном его строкам, с помощью перемещения матричного приемника. (На позициях 10 и 10a направления перемещения показаны стрелкой). Кроме того, матричный приемник можно также прецизионно перемещать вдоль оси Z, совпадающей с оптической осью пучка, чтобы помещать приемник в плоскость изображения в случае изменения фокусного расстояния объектива. Зеркало 1 имеет возможность прецизионно поворачиваться вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа, и предназначено для сканирования сцены 11.

Фильтрацию длин волн с помощью этого устройства осуществляют следующим образом. Определяют (по соотношениям (3)—(6), приведенным ниже) длину волны λ_m ≈ 10 мкм, для которой выполняется равенство dθ_{k1}/dλ ≈ |dθ_{k2}/dλ| ≈ 0,2 град/мкм.

Рассчитывают θ_{k1}(λ_m = 10 мкм) и θ_{k2}(λ_m = 10 мкм) и настраивают зеркала 1, 6 и пластины 3 и 5 таким образом, чтобы обеспечить углы падения оси фильтруемого пучка на каждую из границ раздела сред, соответственно, равными: θ_{k1}(λ_m = 10 мкм) и θ_{k2}(λ_m = 10 мкм).

Выбирают коротковолновую λ_l и длинноволновую λ_n границы спектрального диапазона, в котором находятся фильтруемые длины волн λ_l и λ_n, так чтобы выполнялось соотношение:

$$|\theta_{k1}(\lambda_n) - \theta_{k1}(\lambda_l)| \approx |\theta_{k2}(\lambda_n) - \theta_{k2}(\lambda_l)|$$

Вычисляют: θ_{k1}(λ_n), θ_{k1}(λ_l), θ_{k2}(λ_n), θ_{k2}(λ_l) и 2·φ_{max} ≈ |θ_{k1}(λ_n) - θ_{k1}(λ_l)| ≈ |θ_{k2}(λ_n) - θ_{k2}(λ_l)|, где θ_{k1}(λ_n), θ_{k1}(λ_l), θ_{k2}(λ_n), θ_{k2}(λ_l) — критические углы полного внутреннего отражения, соответственно, для первой и второй пар оптических сред. Устанавливают такие диафрагмы, чтобы обеспечить расчетное значение 2·φ_{max}.

Чтобы зафиксировать отфильтрованное изображение, устанавливают фокусное расстояние объектива 9 так, чтобы λ_l и λ_n попадали на крайние строки матрицы.

Выражения, по которым проводят расчеты, имеют следующий вид:

- выражение для расчета θ_{k1}(λ) — зависимости критических углов ПВО от длины волны для пары сред KCl—воздух

$$\theta_{k1}(\lambda) = a \sin \left(\frac{1}{\frac{A_1}{B_1}} \right) \frac{180}{\pi}; \quad (3)$$

• выражение для расчета $d\theta_{k_1}/d\lambda$ — зависимости производной критических углов ПВО от длины волны для пары сред KCl—воздух

$$\frac{d\theta_{k_1}}{d\lambda} = \frac{180}{\pi} \times \frac{-26,057}{A_1^2} \left(1 + 17,05\lambda + 7,814 \cdot 10^{-2} \lambda^2 \right) + \frac{1}{A_1} (17,055 + 0,156\lambda) \times \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{A_1^2} B_1^2 \right)^{0,5}}, \quad (4)$$

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

• выражение для расчета $\theta_{k_2}(\lambda)$ — зависимости критических углов ПВО от длины волны для пары сред Ge—BaF₂

$$\theta_{k_2}(\lambda) = a \sin \left(\frac{1}{\frac{A_2}{B_2}} \right) \frac{180}{\pi}; \quad (5)$$

• выражение для расчета $d\theta_{k_2}/d\lambda$ — зависимости производной критических углов ПВО от длины волны для пары сред Ge—BaF₂

$$\frac{d\theta_2}{d\lambda} = \frac{180}{\pi} \times \frac{-B_2}{A_2^2} \left(\frac{-0,783414}{C_2^2} \lambda - \frac{0,653968}{C_2^3} - D_2 \right) + \frac{1}{A_2} \left(-5,734 \frac{10^{-3}}{C_2^2} \lambda - 2,56 \frac{10^{-4}}{C_2^3} \lambda - D_2 \right) \times \frac{1}{\left(1 - \frac{B_2^2}{A_2^2} \right)^{0,5}}, \quad (6)$$

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

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

$$C_2 = \lambda^2 - 2,8 \cdot 10^{-2}; \quad D_2 = 1,2 \cdot 10^{-5} \lambda + 2,12 \cdot 10^{-7} \lambda^3;$$

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

Рассмотрим работу устройства на следующем примере.

Пусть требуется выделить из исходного полихроматического пучка монохроматические лучи с длинами волн, попадающими в спектральный диапазон от $\lambda_l = 5,5$ мкм до $\lambda_n = 15,3$ мкм, причем пусть направление распространения монохроматического луча с длиной волны $\lambda_m = 10$ мкм должно совпадать с оптической осью исходного полихроматического пучка, т. е. $\varphi \approx 0$.

Для выбранного спектрального диапазона по соотношениям (3)—(6) определим: $\theta_{k_1}(\lambda_n) = 44,79^\circ$; $\theta_{k_1}(\lambda_l) = 42,79^\circ$; $\theta_{k_1}(\lambda_m) = 43,498^\circ$; $\theta_{k_2}(\lambda_n) = 19,2^\circ$; $\theta_{k_2}(\lambda_l) = 21,2^\circ$; $\theta_{k_2}(\lambda_m) = 20,495^\circ$ и $\varphi_{\max} \approx |\theta_{k_1}(\lambda_n) - \theta_{k_1}(\lambda_l)| \approx |\theta_{k_2}(\lambda_n) - \theta_{k_2}(\lambda_l)| \approx 2^\circ$.

Все элементы спектрального фильтра изображений — зеркало 1, пластина 3, зеркало 4 и пластина 6 (см.

рис. 2) — юстируют таким образом, чтобы пучок, принимаемого полихроматического излучения, распространяющийся в пределах угла, ограниченного в плоскости чертежа блоком диафрагм 7, падал на внутренние грани пластины 3 так, чтобы угол между оптической осью пучка и первой границей раздела, образуемой гранью пластины 3 и воздухом, был равен критическому углу $\theta_{k_1}(\lambda_m) = 43,498^\circ$ для излучения с длиной волны $\lambda_m \cong 10$ мкм и после прохождения пластины 3 падал на внутренние грани пластины 6 так, чтобы угол между оптической осью пучка и второй границей раздела, образуемой гранью пластины 6 и пластиной 5, был равен критическому углу $\theta_{k_2}(\lambda_m) = 20,495^\circ$ для излучения с длиной волны $\lambda_m \cong 10$ мкм.

Объектив 9 и матричный приемник 10 (показанные для того, чтобы пояснить возможность использования этого СФИ для фильтрации излучений, принимаемых тепловизором) устанавливают таким образом, 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 (на позиции 10а эта строка показана более толстой пунктирной линией), будет принимать излучение от оптически сопряженных с ней точек наблюдаемого объекта на длине волны $\lambda_m \cong 10$ мкм.

На рис. 3 показаны зависимости относительной интенсивности излучений монохроматических лучей от длины волны на выходе спектрального фильтра изображений, рассчитанные для лучей, распространяющихся под различными углами φ к оси исходного полихроматического пучка. (Условия, при которых проводилась расчеты, приведены ниже.)

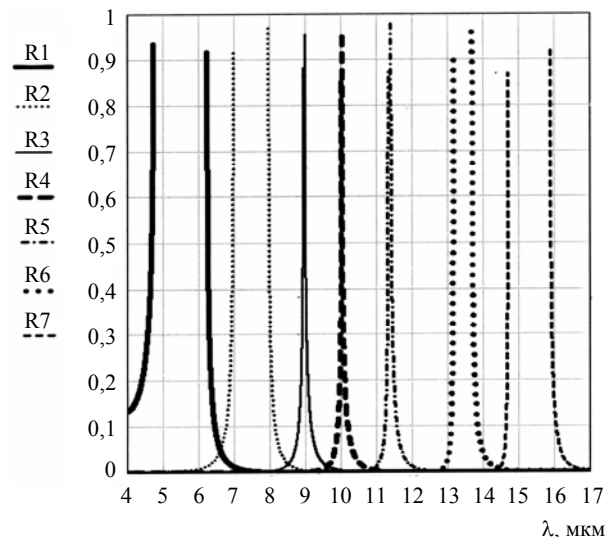


Рис. 3. Зависимости относительной интенсивности излучений монохроматических лучей от длины волны на выходе спектрального фильтра изображений, рассчитанные для лучей, распространяющихся под различными углами φ к оси исходного полихроматического пучка:

R1 — для $\varphi = -0,708^\circ$; R2 — для $\varphi = -0,508^\circ$; R3 — для $\varphi = -0,208^\circ$; R4 — для $\varphi = 0^\circ$; R5 — для $\varphi = 0,292^\circ$; R6 — для $\varphi = 0,792^\circ$; R7 — для $\varphi = 1,292^\circ$

Излучение, падающее на отражающие грани пластины 3 под углом $42,79^\circ$ и далее на отражающие грани пласти-

ны 6 под углом $21,2^\circ$ (лучи φ_l), будет иметь (после прохождения пластин 3 и 6) длину волны $\lambda_l \cong 5,5$ мкм и облучать крайнюю левую строку матричного приемника (см. рис. 2, позиция 10а). На рис. 3 показана расчетная зависимость $R1$ относительной интенсивности этого излучения от длины волны. Излучение, падающее на отражающие грани пластины 3 под углом $44,79^\circ$ и далее на отражающие грани пластины 6 под углом $19,2^\circ$ (лучи φ_n), будет иметь (после прохождения пластин 3 и 6) длину волны $\lambda_n \cong 15,3$ мкм и облучать крайнюю правую строку матричного приемника (позиция 10а). На рис. 3 дана также расчетная зависимость $R7$ относительной интенсивности этого излучения от длины волны.

Таким образом, любые полихроматические лучи исходного пучка, распространяющиеся под углами $\varphi_l \leq \varphi \leq \varphi_n$ к оси исходного луча в плоскости ZY , будут отфильтрованы, станут монохроматическими лучами с длинами волн, определяемыми их угловой координатой в этой плоскости — углом φ — углом 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 φ) этой строки.

Например, на крайнюю левую строку матрицы с угловой координатой $\varphi \cong -0,708^\circ$ попадает излучение с длиной волны $\lambda_l \cong 5,5$ мкм, одновременно на крайнюю правую строку матрицы с угловой координатой $\varphi \cong -1,292^\circ$ попадает излучение с длиной волны $\lambda_n \cong 15,3$ мкм. Остальные строки также облучаются монохроматическими излучениями с длинами волн, соответствующими их номеру (угловой координате φ). Так, на строку, находящуюся в центре матрицы и соответствующую угловой координате $\varphi = 0$, попадает излучение с длиной волны $\lambda_m \cong 10$ мкм. При расчетах интенсивностей излучений, прошедших через пластины 3 и 6 (см. рис. 2) для каждой пары оптических сред использовалось выражение (3), так как полагалось, что для каждой длины волны интенсивности излучений, прошедших через пластины 3 и 6, пропорциональны R_{\perp} , причем для достижения необходимого разрешения использовалось восемь отражений от поверхностей раздела КС1—воздух ($N = 8$) и четыре отражения — от поверхностей раздела Ge— BaF_2 ($N = 4$).

Приведенные зависимости позволяют сделать оценки $\Delta\lambda$ — ширины полосы пропускания этого варианта СФИ. Ширина полосы пропускания различна для разных длин волн. Например, ширина полосы пропускания (по уровню 0,5) зависимости $R1(\lambda)$ $\Delta\lambda \cong 1,5$ мкм, для $R2(\lambda)$ $\Delta\lambda \cong 0,5$ мкм, для $R3(\lambda)$ и $R4(\lambda)$ $\Delta\lambda \cong 0,1$ мкм, для $R5(\lambda)$ $\Delta\lambda \cong 0,2$ мкм, для $R6(\lambda)$ $\Delta\lambda \cong 0,6$ мкм, для $R7(\lambda)$ $\Delta\lambda \cong 1,25$ мкм.

Видно, что в диапазоне между 8 и 12 мкм ширина полосы пропускания СФИ имеет минимальные значения, а при движении в сторону более коротких и более

длинных длин волн она быстро увеличивается. Положительной стороной подобной зависимости $\Delta\lambda$ от λ 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 ртути—кадмий—теллур.

Определим M — максимальное число мод [18], которое можно пропустить через каждую пластинку фильтра на длине волны λ .

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 α и β — углы падения излучения на входные грани, соответственно, первой и второй пластин, близки к нормальным; пусть плоскость YZ параллельна плоскости чертежа. Наибольшие углы, соответственно, в плоскостях YZ и XZ — $\varphi_1 a_{1\max}$ и $\varphi_1 b_{1\max}$, в пределах которых может распространяться фильтруемое излучение через первую пластинку, определяются с помощью следующих соотношений:

$$\varphi_1 a_{1\max} \leq (d\theta_{k_1}/d\lambda)\Delta\lambda = (d\theta_{k_1}/d\lambda)\lambda/A;$$

$$\varphi_1 b_{1\max} \leq a_1 a_n (b_1 / (N a_1 t a_n \theta_{k_1})).$$

При этом a_1 — толщина пластинки должна быть такой, чтобы φd_1 — дифракционный угол расходимости излучения в плоскости YZ на апертуре пластинки, был меньше, чем $\varphi_1 a_{1\max}$, т. е.

$$\varphi d_1 = \frac{1,22\lambda}{a_1} \sin \theta_1 \leq \varphi_1 a_{1\max}$$

и

$$a_1 \geq 1,22 \lambda \sin \theta_1 / \varphi_1 a_{1\max}. \quad (7)$$

Тогда можно показать, что светосила L_1 и максимальное число мод M_1 , распространяющихся через первую пластинку, могут быть вычислены по следующим выражениям:

$$L_1 = \frac{a_1}{\cos(\theta_{k_1})} b_1 \frac{d\theta_{k_1}}{d\lambda} \frac{\pi}{180} \frac{\lambda}{A} a_1 a_n \left(\frac{b_1}{N \frac{a_1}{\cos(\theta_{k_1})}} \right); \quad (8)$$

$$M_1 = \frac{10^{-6} \frac{a_1}{\cos(\theta_{k_1})} b_1 d\theta_{k_1} \frac{\pi}{180} \frac{\lambda}{A} a_1 a_n \left(\frac{b_1}{N \frac{a_1}{\cos(\theta_{k_1})}} \right)}{\lambda^2}. \quad (9)$$

Таким же образом по выражениям (7)—(9) определяются a_2 , L_2 и M_2 для второй пластины (пластины из германия). Максимальное число мод СФИ с длиной

волны λ будет определяться пластинкой, пропускающей меньшее число мод.

Пусть требуется разработать устройство для спектральной фильтрации с разрешающей способностью $A = \lambda/\Delta\lambda = 100$ на $\lambda = 10$ мкм с числом мод, пропускаемых фильтром и фокусируемых объективом на соответствующую строку, не менее 300. Расчеты по приведенным выше соотношениям показывают возможность построения спектрального фильтра со спектральными характеристиками, показанными на рис. 3, при числе отражений $N = 8$ от поверхностей раздела КС1—воздух и при числе отражений $N = 4$ от поверхностей раздела Ge—BaF₂ и при следующих размерах пластин:

$$a_1 = 30 \text{ мм}; b_1 = 40 \text{ мм}; a_2 = 30 \text{ мм}; b_2 = 40 \text{ мм};$$

$$Z_{01} = 285 \text{ мм}; Z_{02} = 68 \text{ мм},$$

где Z_{01} и Z_{02} — длины первой и второй пластин, соответственно. При этом число мод (на $\lambda = 10$ мкм), пропускаемых фильтром и фокусируемых объективом на соответствующую строку, будет не менее 370. Аналогичным образом рассчитываются максимальные числа точек изображения, пропускаемых спектральным фильтром на каждой длине волны. Например, максимальное число мод (точек изображения), пропускаемых спектральным фильтром на длине волны 15,3 мкм, равно 240, что вполне достаточно для получения качественного изображения.

Для получения тепловизионного изображения наблюдаемого объекта в узкой спектральной полосе (на одной из длин волн внутри диапазона $\lambda_l - \lambda_n$), т. е. для реализации режима spectral imaging (SI), необходимо провести с помощью прецизионного перемещения (управляемого компьютером) матрицы 10 (см. рис. 2) сканирование по матрице изображения объекта так, чтобы последнее перемещалось в направлении, перпендикулярном строкам матрицы. При этом из излучения, исходящего от каждого фрагмента наблюдаемого объекта, отфильтровывается излучение с длиной волны, соответствующей номеру той строки, 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 изображения на чувствительный элемент соседней строки.

Таким образом, для записи “многоспектрального” изображения объекта требуется записать число кадров, равное числу строк матрицы. Далее из полученного

трехмерного (две пространственные и одна спектральная координаты) массива информации на монитор можно выводить моноспектральное изображение — изображение объекта в выбранном узком спектральном диапазоне. Итак, предложенный метод спектральной фильтрации может быть использован для построения на его основе устройств, предназначенных для получения изображений объектов в заданных узких спектральных диапазонах.

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 акустооптическая 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. Видеофильтр на кристалле парателлурита// Вестн. Моск. ун-та. 1989. Сер. 3. Т. 30. № 2. С. 41—45.
4. Suhre D. R., Gottlieb M., Taylor L. H., Melamed N. T. Spatial resolution of imaging non collinear 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: Информационный бюллетень лазерной ассоциации. 2004. Июнь. Вып. № 11—12 (290—291).
8. Schaeppman M. E., Schlapfer D., Muller. A. Performance Requirements for Air borne Imaging Spectrometers// Proc. of SPIE. 2002. V. 4480. P. 23—31.
9. Gao Zhan, Kazuhiro Oka, Tsuyoshi Ishigaki, Naoshi Bada// Static Fourier — transform spectrometer based on Savart polariscope: Ibid. P. 198—203.
10. Curtis E. Volin, Jhon P. Garcia, Eustace L. Dereniak, Michael R. Descour Midwave-Infrared Snapshot Imaging Spectrometer: Ibid. P. 355—366.
11. Glenn R. Sellar, Glenn D. Boreman, Laurel E. Kirkland. Comparison of signal collectionabilities of different classes of imaging spectrometers: Ibid. V. 4816.
12. Robert Harring, Randy Pollock, and Richard Cros. Wide-field-of-View Imaging Spectrometry (WFIS) Engineering Model Laboratory tests and Field Demonstration: Ibid. 2003. V. 5152. P. 51—59.
13. John Carrano, Jim Brown, Philip Perconti Kenneth Barnard// Tuning in to detection. SPIE of magazine, April 2004. P. 20—22.
14. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. — М.: Мир, 1970.
15. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. — М.: Наука, 1976.
16. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.
17. 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.
18. Гальярди Р. М., Карп Ш. Оптическая связь. — М.: Изд-во “Связь”, 1978.

Статья поступила в редакцию 6 октября 2005 г.

Using full internal reflection phenomenon for a spectral filtration of the imagery

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

Considers the possibility of construction and accessible parameters of spectral filters using full internal reflection of a phenomenon from two different demarcations of optical medium: demarcations with positive and demarcation with negative derivative of relations of the angle of full internal reflection (FIR) from the wavelength. Similar filters can be of interest for the construction of devices ensuring the obtaining of the maps of objects in given narrow spectral ranges spectral imaging (SI).

* * *