

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.214.4

ШИРОКОУГОЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ФИЛЬТР ВИДЕОСПЕКТРОРАДИОМЕТРА-ГАЗОВИЗОРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДИОКСИДА АЗОТА

© 2004 г. А. В. Афонин, канд. техн. наук; Н. М. Дричко, канд. техн. наук; И. Н. Сивяков

ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

Рассмотрен широкоугольный интерференционно-поляризационный фильтр, входящий в систему спектральной фильтрации, основанную на совместном использовании интерференционно-поляризационных и узкополосных интерференционных фильтров, видеоспектрорадиометра нового типа, предназначенного для контроля пространственной картины распределения антропогенного газа NO_2 в приземной атмосфере.

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 15.04.2004.

В статье [1] была рассмотрена система спектральной фильтрации для видеоспектрорадиометра (ВСР)-газовизора, в которой для повышения чувствительности к обнаруживаемому газу и уменьшения влияния мешающих факторов использовались фильтры, имеющие высокую корреляцию со структурой полос поглощения газов. Эта система включает широкоугольный интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) с периодической структурой полос пропускания, узкополосный интерференционный фильтр (УИФ) для выделения области спектра, совпадающей с полосой поглощения регистрируемого газа, и подавления фонового излучения в остальной области чувствительности ПЗС-матрицы. Для подавления фонового излучения в системе спектральной фильтрации ВСР использовалась дополнительная спектральная фильтрация излучения с помощью цветных стекол [2].

Измерение газа проводится с помощью регистрации изображения пространства в двух спектральных системах фильтрации, одна из которых (канал № 1) настроена на области сильного поглощения газа, а другая (канал № 2) – на области слабого поглощения одной и той же полосы поглощения газа. Далее по зарегистрированным изображениям определяется относительный контраст, величина которого связана с концентрацией в столбе газа на линии визирования прибора.

Необходимо отметить, что смещение полосы пропускания ИПФ вызывается изменением показателя двулучепреломления и длины хода лучей в кри-

сталлических элементах, поэтому возможно провести оценку величины смещения полосы в зависимости от угла падения лучей, но изменения контраста в зависимости от угла падения обусловлены суммарным действием погрешностей изготовления элементов ступени и их взаимной ориентации, которые зависят от конкретной реализации фильтра. Поскольку сохранение полосы пропускания и передачи контраста ИПФ в пределах широкого поля зрения важно для использования его в газовизоре, в данной статье приведены результаты экспериментального контроля угловой зависимости спектрального пропускания широкоугольного ИПФ, теоретическое рассмотрение которого было приведено в [1].

Каждый из каналов представляет собой широкоугольную ступень Лيو [3] с перемещаемой полосой пропускания. Схема канала ИПФ приведена на рис. 1, а вся оптическая схема ВСР приведена в [1].

Каждая ступень содержит входной и выходной поляризаторы P_1 и P_2 , две кристаллические кварцевые пластины K_1 и K_2 равной толщины (1,6 мм) и фазовые пластины $\lambda/2$ и $\lambda/4$. Фазовые пластины выполнены из слюды, заклеенной между пластинами из стекла К8. Взаимная ориентация направлений пропускания поляризаторов и кристаллографических осей двулучепреломляющих элементов показана на рис. 2. Направления пропускания входных поляризаторов обоих каналов находятся в вертикальной плоскости, что исключает влияние поляризации падающего излучения на результаты измерений. Все поверхности элементов просветлены на

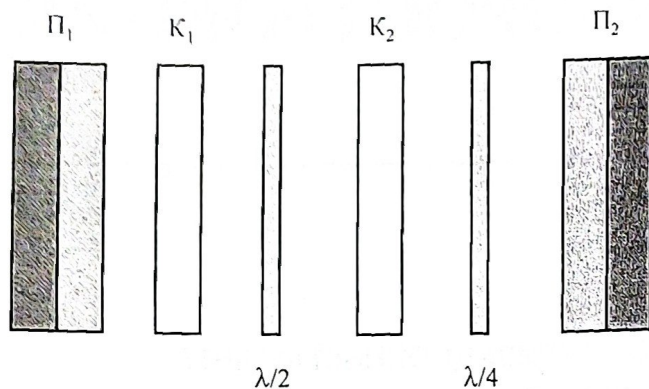


Рис. 1. Схема канала ИПФ. Π_1 и Π_2 – входной и выходной полярзаторы, K_1 и K_2 – кристаллические кварцевые пластины, $\lambda/2$ и $\lambda/4$ – фазовые пластины.

длину волны 440 нм. Диаметр всех элементов равен 28 мм за исключением Π_2 , диаметр которого равен 20 мм.

Спектральная зависимость пропускания ступени выражается соотношением

$$\tau(\lambda) \cong \cos^2(2\pi l/\lambda), \quad (1)$$

где l – толщина кристаллической пластины, μ – коэффициент двулучепреломления, являющийся функцией длины волны λ и температуры. Канавчатый спектр, описываемый выражением (1), смещается в шкале длин волн при повороте полярзатора Π_2 . Взаимная ориентация главных направлений полярзаторов и двулучепреломляющих пластин такова, что в обоих каналах поворот полярзатора Π_2 по часовой стрелке при наблюдении со стороны приемника излучения сдвигает спектр в коротковолновую область. Поворот полярзатора Π_2 на 90° смещает кривую пропускания на половину периода.

В первом канале ИПФ один из максимумов пропускания настроен на длину волны 439,5 нм. В другом канале на эту длину волны установлен минимум пропускания. Настройка выполнена при рабочей температуре блока ИПФ, равной $\sim 37^\circ\text{C}$, для удобства реализации термостата с целью использования прибора в полевых условиях. Повышение температуры на 1 К сдвигает полосу пропускания ИПФ в области 440 нм на $\sim 0,04$ нм в коротковолновую область спектра.

Регистрация спектральной функции пропускания (1) осуществлялась на установке с двойным монохроматором. Блок ИПФ располагался в пучке лучей диаметром 10 мм с расходимостью $\sim 2^\circ$.

Поскольку газоанализатор работает в широком угловом поле $\pm 15^\circ$, регистрация проводилась как при нормальном падении, так и в наклонных пучках при углах падения до 15° . Измерения проводились в четырех плоскостях углов падения: вертикальной, горизонтальной и под углом 45° к ним. На рис. 3 показаны следы плоскостей падения и

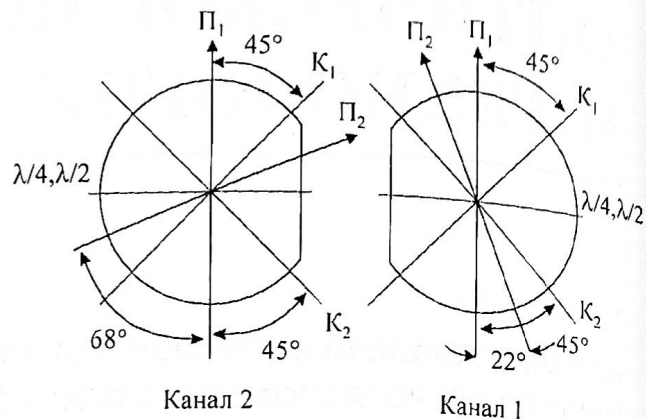


Рис. 2. Взаимная ориентация направлений пропускания полярзаторов и кристаллических осей двулучепреломляющих элементов.

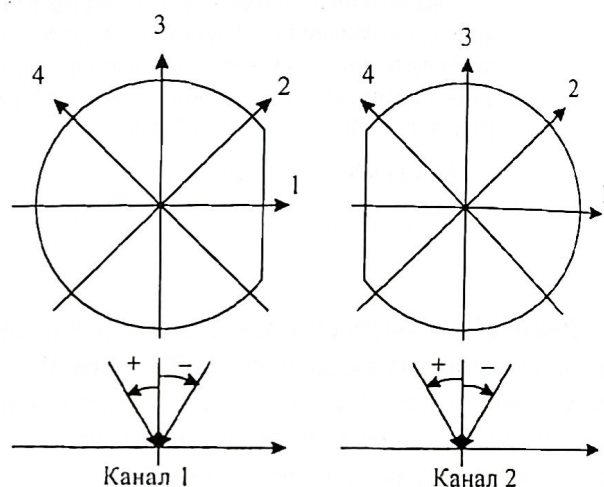


Рис. 3. Следы плоскостей и знаки углов падения лучей на ИПФ.

знаки углов падения, для которых проводились измерения.

В табл. 1 приведены длины волн экстремумов функции (1) в рабочей области спектра. Нечетные значения i соответствуют максимумам пропускания в первом канале и минимумам во втором, а четные значения – наоборот.

Оценки контраста канавчатого спектра, так же как и в интерферометрии, были получены по формуле

$$K_{i,i+1} = \frac{I_i - I_{i+1}}{I_i + I_{i+1}}, \quad (2)$$

где i – номер экстремума с длиной волны λ_i , и приведены в табл. 2. Символами I с индексами в (2) обозначены значения сигнала для длин волн экстремумов ИПФ, нормированные делением на сигнал

Таблица 1. Длины волн экстремумов пропускания спектральных каналов

i	1	2	3	4	5
λ , нм	445,2	442,3	439,5	436,6	434,0

Таблица 2. Контрасты канавчатого спектра

Номер канала, номер сечения, угол наклона	$K_{1,2}$	$K_{2,3}$	$K_{3,4}$	$K_{4,5}$	Сдвиг полосы, нм
1,1,N	0,93	0,9	0,91	—	
1,2,N	0,92	0,92	0,91	0,91	
1,3,N	0,91	0,91	0,91	0,91	
1,4,N	0,92	0,92	—	—	
2,1,N	0,9	0,87	0,86	0,85	
2,2,N	0,86	0,86	0,86	0,85	
2,3,N	0,87	0,85	0,85	0,89	
2,4,N	0,87	0,87	0,86	0,84	
1,1,+	0,64	0,62	0,84	0,84	+(0,2-0,3)
1,1,-	0,63	0,59	0,85	0,84	~0,0
2,1,+	0,82	0,77	0,77	0,77	+(0,1-0,2)
2,1,-	0,66	0,65	0,87	0,87	+0,4
1,2,+	0,9	0,9	0,88	0,87	-0,5
1,2,-	0,91	0,9	0,88	0,87	~0,0
2,2,+	0,78	0,81	0,8	0,76	+(0,1-0,2)
2,2,-	0,84	0,85	0,86	0,84	-(0,2-0,3)
1,3,+	0,79	0,78	0,83	0,82	-(0,1-0,2)
1,3,-	0,78	0,76	0,83	0,84	+(0,3-0,4)
2,3,+	0,85	0,81	0,82	0,84	+(0,1-0,2)
2,3,-	0,83	0,67	0,69	0,82	-(0,1-0,4)
1,4,+	0,82	0,82	0,9	0,88	+0,1
1,4,-	0,83	0,83	0,9	0,89	+0,2
2,4,+	0,74	0,81	0,81	0,71	+(0,3-0,4)
2,4,-	0,73	0,84	0,82	0,71	+(0,3-0,4)

при отсутствии в пучке света блока ИПФ и введении ослабителя потока, не изменяющего спектрального распределения в области регистрации. В табл. 2 в первой колонке приведены индексы, первая цифра которых обозначает номер канала, вторая цифра – номер сечения, указанный на рис. 3, знак указывает знак угла падения. Буква N обозначает измерения при нормальном падении. Сдвиг полосы приведен для углов падения 15° .

Анализ данных позволил отметить, что расстояние между соседними полосами пропускания составляет 5,7 нм при смещении в длинноволновую сторону от полосы пропускания 440 нм и 5,5 нм – в коротковолновую, что соответствует расчетным дан-

ным. Ширина полосы пропускания на уровне 0,5 равна 2,8 нм. Контраст для случая нормального падения во втором канале на 4,5% ниже, чем в первом канале, что связано с более высоким коэффициентом пропускания и более низким коэффициентом экстинкции поляризаторов второго канала.

При углах падения вблизи 15° происходит смещение полосы, не превышающее 0,5 нм. При углах падения менее 10° смещение находится в пределах погрешности определения положения экстремума, составляющей 0,1 нм.

На краях поля зрения наблюдается снижение контраста. Наименьшее снижение контраста в обоих каналах происходит во втором сечении. В первом ка-

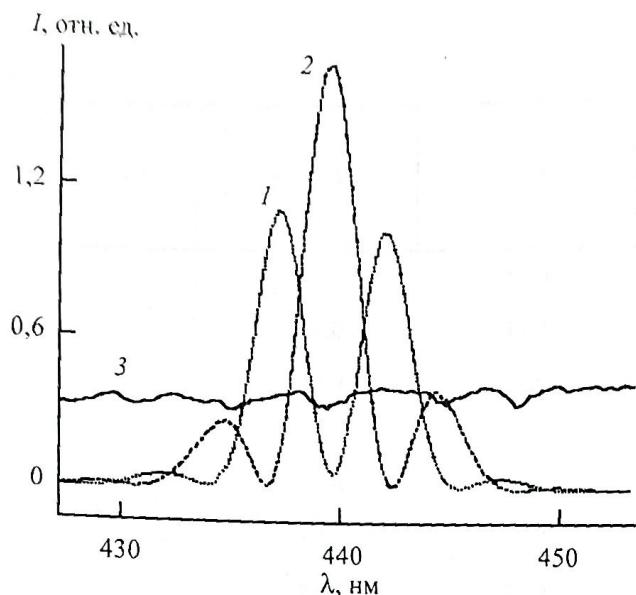


Рис. 4. Экспериментальные спектры пропускания каналов видеоспектрорадиометра-газовизора. 1 – канал 1, 2 – канал 2, 3 – спектр пропускания кюветы с диоксидом азота.

нале оно составляет всего 3% и наблюдается только в полосе 436,6 нм. Во втором канале оно составляет 5–7% в полосе 439,5 нм и до 10% – на краях рассматриваемого диапазона. В сечении 4 снижение контраста происходит только в длинноволновой области менее чем на 10%. Наибольшее снижение контраста происходит в сечении 1. В длинноволновой относительно 440 нм области контраст падает до 65% в первом канале при обоих знаках углов падения, а во втором канале – только при отрицательных углах падения. При положительных углах падения во втором канале контраст в этом сечении сохраняется во всей рассматриваемой области в пределах 77–82%.

Следует отметить, что вблизи углов падения 15° в зонах падения контраста наблюдается высокая чувствительность этого параметра к значению углов

падения. Как видно из табл. 2, уменьшение угла падения всего на 1% повышает контраст на ~5%. Уменьшение угла падения до 10° практически полностью восстанавливает контраст канавчатого спектра. Для неполяризованного света пропускание ИПФ в максимуме полосы пропускания составляет ~25%.

На рис. 4 приведены экспериментальные спектры пропускания каналов ВСП-газовизора, включающие ИПФ и УИФ, полученные при нормальном падении пучка лучей. Эти спектры пропускания хорошо совпадают со спектром пропускания кюветы с диоксидом азота, также приведенном на этом рисунке, а также с расчетными спектрами пропускания оптимальных фильтров, приведенными в [1].

В заключение можно отметить, что полученный фильтр отвечает, в основном, требованиям формирования спектральной функции чувствительности ВСП-газовизора в широком угле зрения $\pm 15^\circ$, что позволит получать изображения крупномасштабных газовых облаков диоксида азота.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра по проекту № 2274.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афонин А.В., Давыдов В.С., Виноградова Т.А., Казанский В.В. Система спектральной фильтрации в видеоспектрорадиометрах-газовизорах для регистрации NO_2 и SO_2 // Оптический журнал. 2001. № 12. С. 50–55.
2. Афонин А.В., Казанский В.В. Подавление фонового излучения в системах спектральной фильтрации в видеоспектрорадиометрах-газовизорах для регистрации NO_2 и SO_2 // Оптический журнал. 2001. № 12. С. 56–59.
3. Evans J.W. The birefringent filter // JOSA. 1949. V. 39. № 3. P. 229–242.