

## РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДВУХ ИПФ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ $SO_2$ В ВЫБРОСАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРОВ

Исходными данными при разработке оптической схемы являются следующие требования:

1. Оба фильтра служат для выделения характерного спектра поглощения  $SO_2$  и раздельного пропускания излучения в полосах поглощения и смежных спектральных интервалах и имеют следующие параметры:

- длины волн, соответствующие центрам полос пропускания, коррелированных с максимумами спектра поглощения:

$$\lambda_1 = 300,25 \text{ нм}; \lambda_3 = 302,25 \text{ нм}; \lambda_5 = 304,25 \text{ нм};$$

- длины волн, соответствующие центрам полос пропускания, коррелированных с минимумами спектра поглощения:

$$\lambda_2 = 301,25 \text{ нм}; \lambda_4 = 303,25 \text{ нм};$$

- полуширина полос пропускания  $\delta\lambda \leq 0,25 \text{ нм}$ .

2. Угол между плоскостями поляризации входных поляризаторов фильтров должен быть равен  $90^\circ$ , чтобы исключить зависимость показаний корреляционного спектрометра от степени и направления поляризации излучения на входе прибора.

Для обеспечения указанных требований было предложено выполнить ИПФ в виде двух групп интерференционно-поляризационных ступеней: основной и дополнительной.

Основная группа содержит три ступени Лео [1] (рис. 1.1). Толщина кристаллической пластины  $K_2$  второй ступени рассчитывается таким образом, чтобы пять интерференционных максимумов соответствовали длинам волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ . Расчёт ведётся для длин волн  $\lambda_1 \div \lambda_5$ , исходя из условия максимумов и заданного расстояния между ними  $\Delta\lambda_0 = 1 \text{ нм}$ , т. е.

$$\ell_{\lambda_i} = \frac{\lambda_i^2}{\Delta\lambda_0 \cdot \mu_{\lambda_i} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial \lambda}\right)}, \quad (1.1)$$

где  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ;

$\mu_{\lambda_i}$  - показатель двойного лучепреломления для длины волны  $\lambda_i$ .

Усреднённое значение:

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1,2,3,4,5} \ell_{\lambda_i}}{5}$$

$$\mu_{\lambda_1} = 0,010256; \mu_{\lambda_2} = 0,010240; \mu_{\lambda_3} = 0,010224; \mu_{\lambda_4} = 0,010208;$$

$$\mu_{\lambda_5} = 0,010191 \text{ для } t = 18^\circ \text{С.}$$

Рабочая температура фильтра  $38^\circ \text{С}$ .

$$\mu_{38^\circ \text{С}} = \mu_{18^\circ \text{С}} + \frac{\partial \mu}{\partial t} \cdot 20^\circ.$$

Для кристаллического кварца  $\partial \mu / \partial t = 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ .

$$\mu_{\lambda_1} = 0,010236; \mu_{\lambda_2} = 0,010220; \mu_{\lambda_3} = 0,010204; \mu_{\lambda_4} = 0,010188;$$

$$\mu_{\lambda_5} = 0,010171 \text{ для } t = 38^\circ \text{С.}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial \lambda} = \frac{\mu_{\lambda_5} - \mu_{\lambda_1}}{\lambda_5 - \lambda_1} = \frac{0,010171 - 0,010236}{304,25 - 300,25} = -0,00001625 \text{ нм}^{-1}.$$

$$B_{\lambda_1} = \left(1 + \frac{300,25}{0,010236} \cdot 0,00001625\right)^{-1} = 0,6772.$$

Соответственно:  $B_{\lambda_2} = 0,6761$ ;  $B_{\lambda_3} = 0,6751$ ;  $B_{\lambda_4} = 0,6740$ ;  $B_{\lambda_5} = 0,6729$ .

Толщина пластины 2-ой ступени на длине волны  $\lambda_1$ :

$$(\ell_2)_{\lambda_1} = \frac{(0,30025)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6772}{0,001 \cdot 0,010236} = 5,9642 \text{ мм.}$$

Аналогично:  $(\ell_2)_{\lambda_2} = 6,0036 \text{ мм}$ ;  $(\ell_2)_{\lambda_3} = 6,044 \text{ мм}$ ;  $(\ell_2)_{\lambda_4} = 6,084 \text{ мм}$ ;  $(\ell_2)_{\lambda_5} = 6,124 \text{ мм}$ ;  
 $(\ell_2)_{\text{ср}} = 6,044 \text{ мм}$ .

Вследствие значительной дисперсии показателя двулучепреломления в УФ области спектра расстояние между полосами пропускания в диапазоне длин волн  $\lambda_1$ -  $\lambda_5$  меняется:

$$\Delta\lambda_1 = \frac{(300,25)^2 \cdot 0,6772}{6,044 \cdot 10^6 \cdot 0,010236} = 0,9868 \text{ нм.}$$

Аналогично:  $\Delta\lambda_2 = 0,9933 \text{ нм}$ ;  $\Delta\lambda_3 = 1,0000 \text{ нм}$ ;  $\Delta\lambda_4 = 1,0065 \text{ нм}$ ;  $\Delta\lambda_5 = 1,0132 \text{ нм}$ .

Толщины кварцевых пластин в первой и третьей ступенях фильтра равны:  $\ell_1 = 3,022 \text{ мм}$ ;  
 $\ell_3 = 12,088 \text{ мм}$ .

Ступень с пластиной  $\ell_2 = 6,044 \text{ мм}$  создаёт интерференционную картину, в которой положения максимумов соответствуют всем пяти заданным длинам волн (рис. 1.2б). Ступень, содержащая пластину  $\ell_3 = 12,088 \text{ мм}$ , обеспечивает заданную ширину полосы пропускания (на уровне 0,5)  $\delta\lambda = 0,25 \text{ нм}$  (рис. 1.2а). В начальном положении главные плоскости входного  $P_1$  и выходного  $P_2$  поляризаторов первой ступени параллельны и интерференционная картина имеет вид, представленный на рис. 1.2в, т.е. три интерференционных максимума соответствуют заданным длинам волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_3$  и  $\lambda_5$ . При повороте входного поляризатора на  $90^\circ$  максимумы и минимумы интерференционной картины меняются местами (рис. 1.2г), т.е. теперь проходящее излучение соответствует длинам волн  $\lambda_2$  и  $\lambda_4$ . На рис. 1.2д, е показано результирующее светопропускание основной группы ступеней при двух положениях входного поляризатора  $P_1$ .

Нерабочие главные максимумы ИПФ подавляются системой предварительной монохроматизации, состоящей из ступеней ИПФ, образующих дополнительную группу.

Для обеспечения равенства суммарных энергетических потоков в полосах пропускания  $\lambda_1$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_5$  и в полосах  $\lambda_2$  и  $\lambda_4$  (см. рис. 1.2) центр одного из максимумов пропускания дополнительных ступеней должен соответствовать середине рабочего спектрального интервала  $(\lambda_5 - \lambda_1)/2$ , причём толщина самой толстой К-ой пластины дополнительной группы вычисляется по формуле:

$$\ell_K = \frac{\lambda_{max}^2}{\delta\lambda_K \cdot \mu \left(1 - \frac{\lambda_{max}}{\mu} \cdot \frac{\partial\mu}{\partial\lambda}\right)}, \quad (1.2)$$

где  $\delta\lambda_K = \left(\lambda_5 + \frac{\Delta\lambda_0}{2}\right) - \left(\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_0}{2}\right)$ .

Так как  $\delta\lambda_K = 5 \text{ нм}$ , следовательно

$$\ell_K = \frac{(0,30225)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6751}{0,005 \cdot 0,01204} = 1,20834 \text{ мм.}$$

Толщина каждой следующей пластины в два раза меньше предыдущей. В качестве отрезающего фильтра использовано стекло марки УФС-2 толщиной 4 мм. Так как коротковолновая граница спектральной кривой коэффициента пропускания стекла УФС-2  $\sim 260 \text{ нм}$ , а длинноволновая граница  $\sim 385 \text{ нм}$ , то область свободной дисперсии фильтра Лию предварительной монохроматизации должна быть  $\Delta\lambda_d \geq 80 \text{ нм}$ . Отсюда количество ступеней  $N$  фильтра предварительной монохроматизации, определяемое из соотношения

$\Delta\lambda_d / \delta\lambda_l = 2^N$  должно быть равным пяти (т.к.  $\delta\lambda_N = 2,5$  нм). Толщины кристаллических пластин равны:

$\ell_1 = 0,07552$  мм;  $\ell_2 = 0,15104$  мм;  $\ell_3 = 0,30208$  мм;  $\ell_4 = 0,60417$  мм;  $\ell_5 = 1,20834$  мм.

Итак, общее количество ступеней в фильтре должно быть равно восьми. Число поляризаторов при этом будет равно девяти. В качестве поляризаторов используются поляроиды с поляризационной поливиниловой плёнкой для УФ области спектра. Общее пропускание поляризаторов на длине волны 300 нм будет равно:

$$T_{\Pi} = 0,22 \cdot (0,44)^8 = 0,00031, \text{ т.е. } 0,03\%.$$

С целью увеличения пропускания фильтра рассмотрим использование ступеней Шольца [2]. Во-первых, вместо двух ступеней Лио (вторая и третья на рис.1.1) основной группы ступеней фильтра используем эквивалентную им ступень Шольца. Полуширина полосы пропускания ступени Шольца на уровне нулевой интенсивности (расстояние между максимумом и ближайшим минимумом) определяется по формуле:

$$\delta\lambda = 0,87 \cdot C \cdot \frac{\lambda^2 \cdot B_{\lambda}}{\mu \cdot m \cdot \ell}, \quad (1.3)$$

где  $m$  – число кристаллических пластин.

Для ориентации кристаллических пластин по закону “треугольник”  $C=1,67$  (определено экспериментально). Из формулы (1.3) определяем  $m$ :

$$m = \frac{1,45 \cdot \lambda^2 \cdot B_{\lambda}}{\delta\lambda \cdot \mu \cdot \ell} = \frac{1,45 \cdot (0,30225)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6751}{0,00025 \cdot 0,010204 \cdot 6,044} = 5,810.$$

Возьмём  $m=6$ . Тогда  $\delta\lambda_{\text{cp}} = 0,242$  нм.

Углы взаимной ориентации пластин и поляризаторов будут такими (см. рис.1.3):

$$\alpha_1, 2\alpha_1, 3\alpha_1, \dots, n\alpha_1, \dots, 3\alpha_1, 2\alpha_1, \alpha_1, \text{ где } \alpha_1 = 2\pi / (m + 2)^2. \quad (1.4)$$

Углы  $\omega_n$  между главными сечениями пластин и плоскостью поляризации входного и выходного поляризаторов ступени определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \omega_{n-1} + \alpha_1 \cdot n && \text{при } n \leq \frac{m}{2} + 1 \\ \omega_n &= \omega_{n-1} + \alpha_1 \cdot (m - n + 2) && \text{при } n > \frac{m}{2} + 1, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где  $n$  – порядковый номер пластины.

Значения углов  $\alpha$  и  $\omega$  для ступени Шольца основной группы ступеней фильтра даны в таблице 1.1.

Таблица 1.1

n	1	2	3	4	5	6
$\alpha$	$5^{\circ}37,5'$	$11^{\circ}15'$	$16^{\circ}52,5'$	$22^{\circ}30'$	$16^{\circ}52,5'$	$11^{\circ}15'$
$\omega$	$5^{\circ}37,5'$	$16^{\circ}52,5'$	$33^{\circ}45'$	$56^{\circ}15'$	$73^{\circ}7,5'$	$84^{\circ}22,5'$

Во-вторых, вместо пяти ступеней Лио дополнительной группы ступеней (фильтр предварительной монохроматизации) можно использовать одну ступень Шольца (ориентация пластин по закону “треугольник”). Количество пластин  $m$  эквивалентной ступени Шольца равно:

$$m = \frac{1,45 \cdot (0,30225)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6751}{0,0025 \cdot 0,010204 \cdot 0,07552} = 46,42.$$

Берём  $m = 46$ . Тогда  $\ell = 0,0762$  мм.

Возможен другой вариант построения фильтра предварительной монохроматизации в виде двух ступеней Шольца. Толщина  $\ell_1$  пластин первой ступени Шольца определяется по формуле:

$$\ell_1 = \frac{\lambda_0^2 \cdot B_{\lambda_0}}{\Delta\lambda_1 \cdot \mu_0}, \quad (1.6)$$

где  $\lambda_0$  - средняя длина волны рабочей спектральной области, равная в нашем случае  $\lambda_0 = \lambda_3$ ,  $\mu_0$  - показатель двойного лучепреломления материала пластин на длине волны  $\lambda_0$ ;  $\Delta\lambda_1$  - заданная величина дисперсии первой ступени (см. рис.1.4).

Положим  $\Delta\lambda_1 = 100$  нм, т.к. все главные максимумы пропускания первой ступени, кроме рабочего максимума на длине волны  $\lambda_0 = 302,26$  нм подавит полосовой светофильтр, изготовленный из стекла УФС-2 толщиной 4 мм.

$$\ell_1 = \frac{(0,30225)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6751}{0,1 \cdot 0,010204} = 0,060 \text{ мм.}$$

Ввиду малой величины  $\ell_1$  каждая из пластин первой ступени состоит из двух пластин кристаллического кварца толщиной  $\ell'_1 = 1,060$  мм и  $\ell''_1 = 1,000$  мм, ориентированных между собой на вычитание оптических разностей хода, т.е. кристаллооптические оси Z в них взаимноперпендикулярны.

Толщина пластины  $\ell_1$  и количество пластин  $m_1$  первой ступени связаны соотношением (ориентация пластин по закону “треугольник”):

$$m_1 \ell_1 = \frac{1,45 \cdot \lambda_0^2 \cdot B_{\lambda_0}}{\delta\lambda_1 \cdot \mu_0}, \quad (1.7)$$

где  $\delta\lambda_1$  - полуширина полосы пропускания первой ступени (см. рис.1.4).

Положим  $m_1 = 10$ , тогда

$$\delta\lambda_1 = \frac{1,45 \cdot (0,30225)^2 \cdot 10^3 \cdot 0,6751}{10 \cdot 60 \cdot 0,010204} = 14,634 \text{ нм.}$$

Так как величина дисперсии второй ступени  $\Delta\lambda_2$  должна быть равна  $\Delta\lambda_2 \geq \delta\lambda_1 + \delta\lambda_2$  (см. рис.1.4), где  $\delta\lambda_2$  - полуширина полосы пропускания второй ступени и в свою очередь

$\delta\lambda_2 = 10\delta\lambda$  (см. рис.1.1а), где  $\delta\lambda$  - полуширина полосы пропускания фильтра, а  $\delta\lambda = 0,25$  нм, то находим величину дисперсии  $\Delta\lambda_2$  второй ступени:

$$\Delta\lambda_2 = 14,634 + 2,5 = 17,134 \text{ нм.}$$

В то же время

$$\Delta\lambda_2 = \frac{\lambda_0^2 \cdot B_{\lambda_0}}{\ell_2 \cdot \mu_0}, \quad (1.8)$$

где  $\ell_2$  - толщина пластин второй ступени:

$$\ell_2 = \frac{(0,30225)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6751}{0,017134 \cdot 0,010204} = 0,3527 \text{ мм.}$$

Толщина пластин  $\ell_2$  и количество пластин  $m_2$  второй ступени связаны соотношением (ориентация пластин по закону “треугольник”):

$$m_2 \cdot \ell_2 = \frac{1,45 \cdot \lambda_0^2 \cdot B_{\lambda_0}}{\delta \lambda_2 \cdot \mu_0},$$

Следовательно

$$m_2 = \frac{1,45 \cdot (0,30225)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6751}{0,0025 \cdot 0,010204 \cdot 0,3527} = 9,94.$$

Положим  $m_2 = 10$ , тогда  $\ell_2 = 0,351$  мм.

Ввиду малой величины  $\ell_2$ , каждая из пластин второй ступени состоит из двух пластин кристаллического кварца толщиной  $\ell_2' = 1,351$  мм и  $\ell_2'' = 1,000$  мм, ориентированных между собой на вычитание оптических разностей хода.

Значения углов  $\omega_n$  и  $\omega_n'$  между главными сечениями пластин  $\ell_1'(\ell_2')$  и  $\ell_1''(\ell_2'')$  и плоскостью поляризации для первой и второй ступеней даны в таблице 1.2.

Таблица 1.2

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\omega_n$	2,5	7,5	15,0	25,0	37,5	52,5	65,0	75,0	82,5	87,5
$\omega_n'$	-87,5	-82,5	-75,0	-65,0	-52,5	-37,5	-25,0	-15,0	-7,5	-2,5

Итак, каждый из двух вариантов построения фильтра предварительной монохроматизации имеет преимущества и недостатки. Первый вариант (с использованием одной ступени Шольца) по сравнению со вторым вариантом (с использованием двух ступеней Шольца) имеет преимущество, если сравнивать пропускания фильтров, так как число поляризаторов на единицу меньше. В то же время фильтр на одной ступени Шольца, как показали расчёты, содержит 46 кристаллических пластин, а эквивалентный ему фильтр на двух ступенях Шольца – всего лишь 20 кристаллических пластин, т.е. имеем большой экономический эффект.

Таким образом, выбираем второй вариант построения фильтра предварительной монохроматизации – с использованием двух ступеней Шольца.

Итак, количество ступеней ИПФ – 4, соответственно число поляризаторов – 5. Общее пропускание поляризаторов на длине волны  $\lambda = 300$  нм будет иметь величину:

$$T_{\Pi} = 0,22 \cdot (0,44)^4 = 0,008, \text{ т.е. } 0,8\%.$$

На рис.1.5 представлена оптическая схема ИПФ (первоначальный вариант), предназначенного для выделения характерного спектра поглощения  $SO_2$ .

Длины волн, соответствующие центрам полос пропускания:  $\lambda_1 = 300,25$  нм;  $\lambda_3 = 302,25$  нм и  $\lambda_5 = 304,25$  нм при ориентации выходного поляризатора ( $P_5$ ) -  $90^\circ$  и  $\lambda_2 = 301,25$  нм,  $\lambda_4 = 303,25$  нм при ориентации выходного поляризатора -  $0^\circ$ .

Ширина полос пропускания (на уровне 0,5):  $\delta \lambda = 0,25$  нм.

Оптическая стопа состоит из 4-х ступеней:

I – ступень Шольца с ориентацией пластин по закону “треугольник” формирует рабочую полосу пропускания с полушириной на нулевом уровне  $\delta \lambda_I = 14,634$  нм с центром  $\lambda_0 = 302,25$  нм. Область дисперсии ступени  $\Delta \lambda_I = 100$  нм. Все нерабочие полосы пропускания срезает светофильтр УФС-2.

II – ступень Шольца с ориентацией пластин по закону “треугольник” формирует рабочую полосу пропускания с полушириной на нулевом уровне  $\delta \lambda_{II} = 2,5$  нм с центром  $\lambda_0 = 302,25$  нм. Область дисперсии ступени  $\Delta \lambda_{II} = 17,134$  нм. Все нерабочие полосы пропускания срезает ступень I совместно со светофильтром УФС-2.

III – ступень Шольца с ориентацией пластин по закону “треугольник” формирует полосы пропускания ИПФ  $\delta\lambda_{III} = \delta\lambda = 0,25$  нм с центрами  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  и  $\lambda_5$ . Все нерабочие полосы пропускания срезают ступени I и II совместно со светофильтром УФС-2.

IV- ступень Лео формирует полосы пропускания шириной  $\delta\lambda_{IV} = 1$  нм с центрами полос  $\lambda_1, \lambda_3$  и  $\lambda_5$  при параллельной ориентации поляризаторов и с центрами полос  $\lambda_2$  и  $\lambda_4$  при скрещенном положении поляризаторов. Все нерабочие полосы пропускания срезают ступени I и II совместно со светофильтром УФС-2.

Механическое переключение выходного поляризатора может обеспечить только последовательный дифференциальный метод определения концентрации  $SO_2$  в атмосфере, который приводит к ряду ошибок при проведении измерений. В связи с этим был предложен параллельный метод измерений путём использования призмы Волластона вместо выходного поляроида.

Расчёт призмы Волластона (рис.1.6).

Нормально падающий пучок во входной части призмы не отклоняется. Обыкновенный луч (o) колеблющийся перпендикулярно оптической оси, имеет показатель преломления  $n_o$ , в то время как необыкновенный луч (e), колеблющийся параллельно оптической оси, имеет свой минимальный (или главный) показатель преломления  $n_e$ .  
 $\lambda = 302,25$  нм;  $n_o = 1,72080$ ;  $n_e = 1,51410$ .

$$n_e \cdot \sin \alpha = n_o \cdot \sin \gamma_o; \quad \sin \gamma_o = \frac{n_e}{n_o} \cdot \sin \alpha.$$

$$n_o \cdot \sin \alpha = n_e \cdot \sin \gamma_e; \quad \sin \gamma_e = \frac{n_o}{n_e} \cdot \sin \alpha.$$

Пусть  $\alpha = 45^\circ$ .

$$\sin \gamma_o = \frac{1,51410}{1,72080} \cdot 0,7071 = 0,6222; \quad \gamma_o = 38^\circ 29'.$$

$$\sin \gamma_e = \frac{1,72080}{1,51410} \cdot 0,7071 = 0,8036; \quad \gamma_e = 53^\circ 28'.$$

$$\beta_o = [180^\circ - (45^\circ + 38^\circ 29')] - 90^\circ = 6^\circ 31'.$$

$$\beta_e = [90^\circ - 180^\circ - (45^\circ + 53^\circ 28')] = 8^\circ 28'.$$

$$\sin \varepsilon_e = 1,51410 \cdot \sin 8^\circ 28' = 1,51410 \cdot 0,1472 = 0,2229; \quad \varepsilon_e = 12^\circ 53'.$$

$$\sin \varepsilon_o = 1,72080 \cdot \sin 6^\circ 31' = 1,72080 \cdot 0,1135 = 0,1953; \quad \varepsilon_o = 11^\circ 16'.$$

$$\varepsilon = 12^\circ 53' + 11^\circ 16' = 24^\circ 9'.$$

Был проведён эксперимент, включающий исследование интерференционно-поляризационной ступени (ИПС) с призмой Волластона на выходе и сопоставление её с обычной ИПС с плёночными поляроидами. Схема экспериментальной установки показана на рис.1.7.

Сначала призма Волластона располагалась так, что разложение o и e-лучей происходит в вертикальной плоскости. Главное сечение поляроида лежит в вертикальной плоскости. Спектральное пропускание ступени в e-луче соответствует спектральному пропусканию ступени с параллельными поляроидами. Если o и e-лучи необходимо развести в горизонтальной плоскости, то, чтобы в e-луче получить такую же спектральную картину, как в обычной ступени с параллельными поляроидами, нужно входной поляроид ступени с призмой Волластона развернуть на  $90^\circ$ , т.е. направление его пропускания лежит в горизонтальной плоскости. При повороте поляроида на  $90^\circ$  спектральная картина смещается на полпериода.

Оптическая схема ИПФ (ИПФ-18-01,-02), предназначенных для выделения спектра  $SO_2$ , показана на рис.1.8. В таблице 1.3 приведены данные о деталях.

Таблица 1.3

Номер позиции детали	Обозначение детали	Наименование детали	Материал	Толщина, мм	Количество, мм
1	1-01-001	пластина защитная	стекло КУ-1	4	2
2	1-01-002	светофильтр	стекло ЖС-20	4	1
3	1-01-003	светофильтр	стекло УФС-2	4	1
4	1-01-004	пластина опорная	стекло КУ-1	4	2
5	1-01-005	пластина технологичная	стекло КУ-1	4	1
6	1-01-006	пластина	стекло КУ-1	2	8
7	1-01-007	пластина	кристаллический кварц	1,000	20
8	1-01-008	пластина	кристаллический кварц	1,060	10
9	1-01-009	пластина	кристаллический кварц	1,351	10
10	1-01-010	пластина	кристаллический кварц	6,044	6
11	1-01-011	пластина	кристаллический кварц	3,022	1
12	1-01-012	призма	исландский кварц	15	1
13	1-01-013	призма	исландский кварц	15	1

Направление плоскости поляризации поляроидов 6 и кристаллооптической оси  $Z$  кристаллических пластин 7-11, а также призм 12 и 13 относительно базовой плоскости  $B$ , показано на рис.1.8.

Значения угла  $\alpha$  для ИПФ для ИПФ1-01 приведены в таблице 1.4.

Для фильтра ИПФ1-01 длины волн, соответствующие центрам полос пропускания  $\lambda_1 = 300,25$  нм,  $\lambda_3 = 302,25$  нм и  $\lambda_5 = 304,25$  нм в 1-м выходном луче и  $\lambda_2 = 301,25$  нм,  $\lambda_4 = 303,25$  нм во втором выходном луче. Для фильтра ИПФ1-02 – наоборот.

Целесообразность использования светофильтра ЖС-20 определяется в процессе испытаний ИПФ. 1-ый и 2-ой выходные лучи лежат в горизонтальной плоскости. Углы между входным лучом и 1-м и 2-м выходными лучами равны соответственно  $12^\circ 53'$  и  $11^\circ 16'$ . Рабочая температура оптической стопы  $38^\circ\text{C}$ . Детали между опорными пластинами поз.4(1) и 4(2) находятся на иммерсионном контакте.

Значения угла  $\alpha$  для ИПФ1-02 приведены в таблице 1.5.

Для вычисления спектрального коэффициента пропускания ступеней Шольца был выбран матричный метод Джонса [3]. В этом методе расчёта входящий пучок света описывается двумерным вектором, а оптическое устройство  $2 \times 2$  матрицей. Результат взаимодействия получается умножением вектора на матрицу.

Вектор Джонса представляет собой столбец из двух элементов, который описывает форму поляризации пучка и амплитуду компонент в некоторой точке луча. Если свет распространяется вдоль оси  $z$ , то вектор имеет форму:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad \begin{bmatrix} A_x \cdot \exp[i(\varepsilon_x + 2\pi Nt)] \\ A_y \cdot \exp[i(\varepsilon_y + 2\pi Nt)] \end{bmatrix}, \quad (1.9)$$

Таблица 1.4

Номер позиции детали	Величина угла $\alpha$						
6(1)	$\pm 90^\circ$	7(11)	$-2,5^\circ$	8(5)	$52,5^\circ$	9(9)	$7,5^\circ$
6(2)	$\pm 90^\circ$	7(12)	$-7,5^\circ$	8(6)	$37,5^\circ$	9(10)	$2,5^\circ$
6(3)	$\pm 90^\circ$	7(13)	$-15^\circ$	8(7)	$25^\circ$	10(1)	$84^\circ 22,5'$
6(4)	$\pm 90^\circ$	7(14)	$-25^\circ$	8(8)	$15^\circ$	10(2)	$73^\circ 7,5'$
7(1)	$-2,5^\circ$	7(15)	$-37,5^\circ$	8(9)	$7,5^\circ$	10(3)	$56^\circ 15'$
7(2)	$-7,5^\circ$	7(16)	$-52,5^\circ$	8(10)	$2,5^\circ$	10(4)	$33^\circ 45'$
7(3)	$-15^\circ$	7(17)	$-65^\circ$	9(1)	$87,5^\circ$	10(5)	$16^\circ 52,5'$
7(4)	$-25^\circ$	7(18)	$-75^\circ$	9(2)	$82,5^\circ$	10(6)	$5^\circ 37,5'$
7(5)	$-37,5^\circ$	7(19)	$-82,5^\circ$	9(3)	$75^\circ$	11	$+(-)45^\circ$
7(6)	$-52,5^\circ$	7(20)	$-87,5^\circ$	9(4)	$65^\circ$	12	$0^\circ$
7(7)	$-65^\circ$	8(1)	$87,5^\circ$	9(5)	$52,5^\circ$	13	$\pm 90^\circ$
7(8)	$-75^\circ$	8(2)	$82,5^\circ$	9(6)	$37,5^\circ$		
7(9)	$-82,5^\circ$	8(3)	$75^\circ$	9(7)	$25^\circ$		
7(10)	$-87,5^\circ$	8(4)	$65^\circ$	9(8)	$15^\circ$		

Таблица 1.5

Номер позиции детали	Величина угла $\alpha$						
6(1)	$0^\circ$	7(11)	$-87,5^\circ$	8(5)	$37,5^\circ$	9(9)	$82,5^\circ$
6(2)	$0^\circ$	7(12)	$-82,5^\circ$	8(6)	$52,5^\circ$	9(10)	$87,5^\circ$
6(3)	$0^\circ$	7(13)	$-75^\circ$	8(7)	$65^\circ$	10(1)	$5^\circ 37,5'$
6(4)	$0^\circ$	7(14)	$-65^\circ$	8(8)	$75^\circ$	10(2)	$16^\circ 52,5'$
7(1)	$-87,5^\circ$	7(15)	$-52,5^\circ$	8(9)	$82,5^\circ$	10(3)	$33^\circ 45'$
7(2)	$-82,5^\circ$	7(16)	$-37,5^\circ$	8(10)	$87,5^\circ$	10(4)	$56^\circ 15'$
7(3)	$-75^\circ$	7(17)	$-25^\circ$	9(1)	$2,5^\circ$	10(5)	$73^\circ 7,5'$
7(4)	$-65^\circ$	7(18)	$-15^\circ$	9(2)	$7,5^\circ$	10(6)	$84^\circ 22,5'$
7(5)	$-52,5^\circ$	7(19)	$-7,5^\circ$	9(3)	$15^\circ$	11	$+(-)45^\circ$
7(6)	$-37,5^\circ$	7(20)	$-2,5^\circ$	9(4)	$25^\circ$	12	$0^\circ$
7(7)	$-25^\circ$	8(1)	$2,5^\circ$	9(5)	$37,5^\circ$	13	$\pm 90^\circ$
7(8)	$-15^\circ$	8(2)	$7,5^\circ$	9(6)	$52,5^\circ$		
7(9)	$-7,5^\circ$	8(3)	$15^\circ$	9(7)	$65^\circ$		
7(10)	$-2,5^\circ$	8(4)	$25^\circ$	9(8)	$75^\circ$		

где  $E_x$  и  $E_y$  – скалярные компоненты электрического вектора вдоль осей  $x$  и  $y$ ;  $A_x$  и  $A_y$  – максимальные величины  $E_x$  и  $E_y$ ;  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  – фазы компонент  $E_x$  и  $E_y$ ;  $N = \mu\epsilon/\lambda$  – волновая разность хода;  $t$  – время.

Оптический элемент описывается произведением двух типов матриц:

$$[M_n] = [S(\omega_n)] \cdot [G] \cdot [S(-\omega_n)] \quad (1.10)$$

Здесь матрица  $[G]$  описывает оптический элемент с исходной ориентацией:

$$[G] = \begin{bmatrix} e^{\gamma n} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma n} \end{bmatrix}, \quad \gamma = \frac{\pi \mu \ell}{\lambda}. \quad (1.11)$$

$S(\omega_n)$  и  $S(-\omega_n)$  – матрицы прямого и обратного поворота, описывают ориентацию элемента:

$$[S(\omega_n)] = \begin{bmatrix} \cos \omega_n & -\sin \omega_n \\ \sin \omega_n & \cos \omega_n \end{bmatrix} \text{ и } [S(-\omega_n)] = \begin{bmatrix} \cos \omega_n & \sin \omega_n \\ -\sin \omega_n & \cos \omega_n \end{bmatrix}. \quad (1.12)$$

Пусть  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$  - векторы входящего и выходящего света, тогда соотношение между ними:

$$\varepsilon_1 = [M]\varepsilon_0. \quad (1.13)$$

Если рассмотреть систему из  $m$  оптических элементов, описываемых матрицами  $G_1, G_2, \dots, G_m$  с относительной ориентацией  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ , через которые свет проходит в порядке их нумерации, то можно получить из уравнений (1.13) и (1.10):

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= S(\omega_1) \cdot G_1 \cdot S(-\omega_1) \cdot \varepsilon_0 = M_1 \cdot \varepsilon_0, \\ \varepsilon_2 &= M_2 \cdot \varepsilon_1, \\ &\dots\dots\dots \\ \varepsilon_i &= M_i \cdot \varepsilon_{i-1}, \\ &\dots\dots\dots \\ \varepsilon_m &= M_m \cdot \varepsilon_{m-1}, \end{aligned} \quad (1.14)$$

где  $\varepsilon_i$  – вектор света, выходящего из  $i$ -го элемента.

Из уравнений (1.14) получаем соотношение между  $\varepsilon_m$  и  $\varepsilon_0$ :

$$\varepsilon_m = M_m \cdot M_{m-1} \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1 \cdot \varepsilon_0. \quad (1.15)$$

Для фильтра Шольца матричное уравнение будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon_m = [P_x] \cdot [M_m] \cdot [M_{m-1}] \cdot \dots \cdot [M_1] \cdot [P_x] \cdot \varepsilon_0. \quad (1.16)$$

Матрица  $[P_x]$  описывает поляризатор, пропускающий электрический вектор параллельно оси X:

$$[P_x] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Пропускание фильтра  $\tau$  есть квадрат отношения амплитуд входного и выходного электрических векторов  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_m$ .

Для функции изменения угла “треугольник”:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \omega_{n-1} + (-1)^{n+1} \cdot n \cdot \alpha_1 && \text{при } n \leq \frac{m}{2} + 1, \\ \omega_n &= \omega_{n-1} + (-1)^{n+1} \cdot (m - n + 2) && \text{при } n > \frac{m}{2} + 1, \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{(m+2)^2} \quad \text{при } m - \text{чётное число,}$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{(m+1) \cdot (m+3)} \quad \text{при } m - \text{нечётное число.}$$

Для расчёта спектрального коэффициента пропускания ступене Шольца была составлена

программа для ЭВМ. Результаты расчётов приведены в таблице 1.6:

Таблица 1.6

Номер ступени	Длина волны главного максимума		Макимальное пропускание во вторичном максимуме, %	Ширина полосы пропускания на уровне 0,5, нм		Ширина полосы пропускания на уровне 0, нм	
I	302,200		0,83	11,6		35,4	
II	302,240		0,76	1,920		5,160	
III	300,230		1,3	0,150		0,410	
	301,240			0,155		0,410	
	302,250			0,160		0,420	
	303,270			0,160		0,430	
	304,310			0,160		0,430	
IV	300,235	301,240	0	0,99	1,05	2,01	2,01
	302,245	303,280		1,00	1,05	2,04	2,07
	304,315			1,02		2,07	

Толщины кристаллических пластин в ступенях Шольца фильтров ИПФ1-01 и ИПФ1-02, определённые в результате расчёта спектрального пропускания ступеней приведены в таблице 1.7:

Таблица 1.7

Обозначение детали	Толщина кристаллических пластин, мм
1-01-008	1,0590
1-01-009	1,3539
1-01-010	6,6958
1-01-011	3,3479

Анализ результатов расчёта показал, что вблизи главного максимума пропускания с каждой стороны имеется по одному вторичному максимуму, интенсивность которого не превышает 1,3% от уровня пропускания в главном максимуме. В обычном фильтре Шольца эта величина достигает 12%. Для всех остальных длин волн излучения в пределах области свободной дисперсии уровень остаточного пропускания не превосходит 0,006%.

Итак, рассмотренная схема ИПФ обеспечивает следующие достоинства прибора:

- сравнительно высокое пропускание на рабочей длине волны излучения;
- сравнительно узкую полосу пропускания при широкой области свободной дисперсии;
- технологичность ( в каждой ступени пластины имеют одинаковую толщину и могут изготавливаться блоком).

