

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДВУХ ИПФ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ.

Исходными данными при разработке оптической схемы корреляционного спектрометра являются следующие требования:

1. Первый канал включает ИПФ со следующими параметрами:

- длины волн, соответствующие центрам полос пропускания $\lambda_1 = 296,5$ нм и $\lambda_2 = 298,60$ нм;

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

2. Второй канал включает ИПФ со следующими параметрами:

- длины волн, соответствующие центрам полос пропускания $\lambda_1 = 306,10$ нм и $\lambda_2 = 307,80$ нм;

- полуширина полос пропускания $\delta\lambda \leq 0,21$ нм.

3. Угол между плоскостями поляризации входных поляризаторов фильтров должен быть равен 90° , чтобы исключить зависимость показаний корреляционного спектрометра от степени и направления поляризации излучения на входе прибора.

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

Основная группа ступеней содержит четыре ступени Лео (рис.2.1). Спектральное пропускание отдельных ступеней и всего ИПФ показано на рис.2.2. Толщина кристаллической пластины K_3 третьей ступени рассчитывается таким образом, чтобы два интерференционных максимума соответствовали длинам волн λ_1 и λ_2 .

Проведём расчёт ИПФ первого канала (Озон 1). Расчёт ведётся для длин волн λ_1 и λ_2 , исходя из условия максимумов и заданного расстояния между ними $\Delta\lambda_0 = 2,05$ нм, т.е. по формуле (1.1), где $i = 1,2$.

Усреднённое значение

$$\ell_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1,2} \ell_{\lambda_i}}{2} \quad (2.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \mu_{\lambda_1} = 0,010317 \\ \mu_{\lambda_2} = 0,010283 \end{array} \right\} \text{ для } t = 18^\circ\text{C. Рабочая температура фильтра } 38^\circ\text{C.}$$

$$\left. \begin{array}{l} \mu_{\lambda_1} = 0,010297 \\ \mu_{\lambda_2} = 0,010263 \end{array} \right\} \text{ для } t = 38^\circ\text{C.}$$

$$\partial\mu/\partial\lambda = (\mu_{\lambda_2} - \mu_{\lambda_1})/(\lambda_2 - \lambda_1) = -0,00001638 \text{ нм}^{-1}.$$

$$B_{\lambda_1} = \left(1 + \frac{296,55}{0,010297} \cdot 0,00001638\right) = 0,6795. \text{ Аналогично } B_{\lambda_2} = 0,6772.$$

Толщина пластины 2-ой ступени на длине волны λ_1 :

$$(\ell_2)_{\lambda_1} = \frac{(0,29655)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6795}{0,00205 \cdot 0,010297} = 2,83087 \text{ мм.}$$

Аналогично на длине волны λ_2 :

$$(\ell_2)_{\lambda_2} = 2,86991 \text{ мм.}$$

$$(\ell_2)_{\text{cp}} = 2,85039 \text{ мм.}$$

Толщины кварцевых пластин в первой, третьей и четвёртой ступенях фильтра:

$$\ell_1 = 1,425 \text{ мм; } \ell_3 = 5,700 \text{ мм; } \ell_4 = 11,400 \text{ мм.}$$

Ступень с пластиной $\ell_2 = 2,850$ мм создаёт интерференционную картину, в которой положения максимумов соответствуют двум заданным длинам волн λ_1 и λ_2 (рис. 2.2в).

Ступень, содержащая пластину $\ell_4 = 11,400$ мм, обеспечивает заданную ширину полосы пропускания (на уровне 0,5) $\delta\lambda = 0,25$ нм (рис.2.2а).

Первоначально главные плоскости входного Π_1 и выходного Π_2 поляризаторов первой ступени параллельны и интерференционная картина имеет вид, представленный на рис.2.2г, т.е. интерференционный максимум соответствует заданной длине волны λ_1 . При повороте входного поляризатора на 90° интерференционная картина первой ступени имеет вид, представленный на рис.2.2д, т.е. теперь проходящее излучение соответствует длине волны λ_2 . На рис.2.2е, ж показано результирующее светопропускание основной группы ступеней при двух положениях входного поляризатора Π_1 .

Для обеспечения равенства суммарных энергетических потоков в полосах пропускания λ_1 и λ_2 центр одного из максимумов пропускания дополнительных ступеней должен соответствовать середине рабочего спектрального интервала $(\lambda_2 - \lambda_1)/2$, причём толщина самой толстой К-ой пластины дополнительной группы вычисляется по формуле (1.2), где

$$\delta\lambda_k = \left(\lambda_2 + \frac{\Delta\lambda_0}{2}\right) - \left(\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_0}{2}\right).$$

Так как $\delta\lambda_k = 4,1$ нм, следовательно:

$$\ell_k = \frac{(0,297575)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6783}{0,0041 \cdot 0,010280} = 1,42507 \text{ мм.}$$

В качестве обрезającego фильтра использовано стекло марки УФС-2 толщиной 4 мм (спектральная граница пропускания 260-385 нм). Область свободной дисперсии фильтра Лио предварительной монохроматизации должна быть ≥ 80 нм. Таким образом, количество ступеней n , определяемое из выражения $80/0,205 = 2^n$, должно быть равным пяти. Толщины кристаллических пластин дополнительного фильтра Лио равны: $\ell_1 = 0,08906$ мм; $\ell_2 = 0,17813$ мм; $\ell_3 = 0,35626$ мм; $\ell_4 = 0,71253$ мм; $\ell_5 = 1,42507$ мм.

Итак, общее количество ступеней в фильтре равно девяти. Таким образом, общее пропускание поляризаторов в фильтре на длине волны $\lambda = 300$ нм будет иметь величину:

$$T_n = 0,22 \cdot (0,44)^9 = 0,00013, \text{ т.е. } 0,013\%.$$

Для увеличения пропускания фильтра рассмотрим использование ступеней Шольца. Во-первых, вместо трёх ступеней Лио (вторая, третья и четвёртая на рис.2.1) основной группы ступеней фильтра используем эквивалентную им ступень Шольца. Полуширина полосы пропускания ступени Шольца на уровне нулевой интенсивности определяется по формуле 1.3. Кристаллические пластины ориентируются по закону “треугольник”. Число кристаллических пластин ступени Шольца:

$$m = \frac{1,45 \cdot (0,297575)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6783}{0,00025625 \cdot 0,010280 \cdot 2,850} = 11,60.$$

Пусть $m=12$, тогда

$$\delta\lambda_\phi = \frac{1,45 \cdot (0,297575)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6783}{12 \cdot 2850 \cdot 0,010280} = 0,2477 \text{ нм.}$$

Углы ω_n между главными сечениями кристаллических пластин и плоскостью поляризации входного и выходного поляризаторов ступени определяется по формулам (1.5). Значения углов ω_n для ступени Шольца основной группы ступеней фильтра дана в таблице 2.1.

Таблица 2.1

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ω_n	1°50'	5°30'	11°1'	18°22'	27°33'	38°34'	51°26'	62°27'	71°38'	78°59'	84°30'	88°10'

Во-вторых, вместо пяти ступеней Лию дополнительной группы ступеней можно использовать одну ступень Шольца. Тогда количество пластин m эквивалентной ступени Шольца при ориентации кристаллических пластин по закону “треугольник” равно:

$$m = \frac{1,45 \cdot (0,297575)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6783}{0,00205 \cdot 0,010280 \cdot 0,08906} = 46,40.$$

Пусть $m = 46$, тогда $\ell = 0,0898$ мм.

Рассмотрим второй вариант построения фильтра предварительной монохроматизации в виде двух ступеней Шольца. Толщина ℓ_1 пластин первой ступени Шольца определяется по формуле (1.6). Итак

$$\ell_1 = \frac{(0,297575)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6783}{0,1 \cdot 0,010280} = 0,0584 \text{ мм.}$$

Ввиду малой толщины ℓ_1 каждая из пластин первой ступени состоит из двух пластин кристаллического кварца толщиной $\ell_1' = 1,0584$ мм и $\ell_1'' = 1,000$ мм, ориентированных между собой на вычитание оптических разностей хода. Толщина пластин ℓ_1 и количество пластин m_1 первой ступени связаны соотношением (1.7). Положим $m_1 = 10$, тогда полуширина полосы пропускания первой ступени будет равна:

$$\delta\lambda_1 = \frac{1,45 \cdot (0,297575)^2 \cdot 10^3 \cdot 0,6783}{10 \cdot 58,4 \cdot 0,010280} = 14,507 \text{ нм.}$$

Согласно рис.1.4 величина дисперсии второй ступени $\Delta\lambda_2$ должна удовлетворять условию $\Delta\lambda_2 \geq \delta\lambda_1 + \delta\lambda_2$, где $\delta\lambda_2$ – полуширина полосы пропускания второй ступени и в свою очередь $\delta\lambda_2 = 2,05$ нм, находим величину области свободной дисперсии $\Delta\lambda_2 = 14,507 + 2,05 = 16,557$ нм.

В то же время, согласно (1.8), находим толщину кристаллических пластин второй ступени:

$$\ell_2 = \frac{(0,297575)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6783}{0,016557 \cdot 0,010280} = 0,3529 \text{ мм,}$$

а количество пластин m_2 :

$$m_2 = \frac{1,45 \cdot (0,297575)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6783}{0,00205 \cdot 0,010280 \cdot 0,3529} = 11,71.$$

Пусть $m_2 = 12$, тогда $\ell_2 = 0,344$ мм.

Ввиду трудности изготовления толщины $\ell_2 = 0,3444$ мм, каждая из пластин второй ступени состоит из двух пластин кристаллического кварца толщиной $\ell_2' = 1,3444$ мм и $\ell_2'' = 1,000$ мм, ориентированных между собой на вычитание оптических разностей хода.

Оптическая схема ИПФ (шифр ИПФ-19-01), предназначенного для измерения концентрации озона в атмосфере (первый канал), показана на рис.2.3. В таблице 2.2 приведены данные о деталях.

Направление плоскости поляризации поляроидов 6 и кристаллооптической оси Z кристаллических пластин 7-11, а также призм 12 и 13 относительно базовой плоскости Б показано на рис.2.3. Значения угла α для ИПФ 19-01 приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.2

Номер позиции детали	Обозначение детали	Наименование детали	Материал	Толщина, мм	Количество, штук
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 технологическая	Стекло КУ-1	4	1
6	1-01-006	Пластина	Стекло КУ-1	2	8
7	1-01-007	Пластина	Кристаллический кварц	1,000	22
8	2-01-001	Пластина	Кристаллический кварц	1,058	10
9	2-01-002	Пластина	Кристаллический кварц	1,345	12
10	2-01-003	Пластина	Кристаллический кварц	2,850	12
11	2-01-004	Пластина	Кристаллический кварц	1.425	1
12	1-01-012	Призма	Исландский шпат	15	1
13	1-01-013	Призма	Исландский шпат	15	1

Оптическая схема (рис.2.3) состоит из 4-х ступеней:

I – ступень Шольца с ориентацией пластин по закону “треугольник” формирует рабочую полосу пропускания с полушириной (на уровне нулевого пропускания) $\delta\lambda_I = 14,507$ нм с центром на длине волны $\lambda_0 = 297,575$ нм. Область свободной 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 $\delta\lambda_{II} = 2,05$ нм с центром на длине волны $\lambda_0 = 297,575$ нм. Область свободной дисперсии ступени $\Delta\lambda_{II} = 16,557$ нм. Все нерабочие полосы пропускания срезает ступень I совместно со светофильтром УФС-2.

III – ступень Шольца с ориентацией пластин по закону “треугольник” формирует рабочие полосы пропускания ИПФ с полушириной на нулевом уровне $\delta\lambda_{III} = \delta\lambda_{\Phi} = 0,248$ нм с центрами на длинах волн $\lambda_1 = 296,525$ нм и $\lambda_2 = 298,60$ нм. Все нерабочие полосы пропускания срезают ступени I и II совместно со светофильтром УФС-2.

IV – ступень Лио формирует рабочие полосы пропускания с полушириной на нулевом уровне $\delta\lambda_{IV} = 2,05$ нм с центрами полос $\lambda_1 = 296,525$ нм в первом выходном луче и $\lambda_2 = 298,60$ нм во втором выходном луче. Все нерабочие полосы пропускания срезают ступени I и II совместно со светофильтром УФС-2.

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°C . Детали между опорными пластинами поз.4(1) и 4(2) находятся на иммерсионном контакте.

Таблица 2.3

Номер позиции детали	Величина угла α	Номер позиции детали	Величина угла α	Номер позиции детали	Величина угла α	Номер позиции детали	Величина угла α
6(1)	0°	7(13)	$-78^{\circ}59'$	8(7)	65°	10(1)	$1^{\circ}50'$
6(2)	0°	7(14)	$-71^{\circ}38'$	8(8)	75°	10(2)	$5^{\circ}30'$
6(3)	0°	7(15)	$-62^{\circ}27'$	8(9)	$82,5'$	10(3)	$11^{\circ}1'$
6(4)	0°	7(16)	$-51^{\circ}26'$	8(10)	$87,5^{\circ}$	10(4)	$18^{\circ}22'$
7(1)	$-87,5^{\circ}$	7(17)	$-38^{\circ}34'$	9(1)	$1^{\circ}50'$	10(5)	$27^{\circ}33'$
7(2)	$-82,5^{\circ}$	7(18)	$-27^{\circ}33'$	9(2)	$5^{\circ}30'$	10(6)	$38^{\circ}34'$
7(3)	-75°	7(19)	$-18^{\circ}22'$	9(3)	$11^{\circ}1'$	10(7)	$51^{\circ}26'$
7(4)	-65°	7(20)	$-11^{\circ}1'$	9(4)	$18^{\circ}22'$	10(8)	$62^{\circ}27'$
7(5)	$-52,5^{\circ}$	7(21)	$-5^{\circ}30'$	9(5)	$27^{\circ}33'$	10(9)	$71^{\circ}38'$
7(6)	$-37,5^{\circ}$	7(22)	$-1^{\circ}50'$	9(6)	$38^{\circ}34'$	10(10)	$78^{\circ}59'$
7(7)	-25°	8(1)	$2,5^{\circ}$	9(7)	$51^{\circ}26'$	10(11)	$84^{\circ}30'$
7(8)	-15°	8(2)	$7,5^{\circ}$	9(8)	$62^{\circ}27'$	10(12)	$88^{\circ}10'$
7(9)	$-7,5^{\circ}$	8(3)	15°	9(9)	$71^{\circ}38'$	11	$+(-)45^{\circ}$
7(10)	$-2,5^{\circ}$	8(4)	25°	9(10)	$78^{\circ}59'$	12	0°
7(11)	$-88^{\circ}10'$	8(5)	$37,5^{\circ}$	9(11)	$84^{\circ}30'$	13	$+(-)90^{\circ}$
7(12)	$-84^{\circ}30'$	8(6)	$52,5'$	9(12)	$88^{\circ}10'$		

Результаты расчётов спектрального коэффициента пропускания ступеней Шольца ИПФ19-01 приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Номер ступени	Длина волны главного максимума, нм		Максимальное пропускание вторичного максимума, %	Ширина полосы пропускания на уровне 0,5, нм		Ширина полосы пропускания на нулевом уровне, нм	
I	297,575		0,76	11,300		30,200	
II	297,575	316,55	0,68	1,480	1,750	3,940	4,700
III	296,555	298,605	0,68	0,17	0,46	0,17	0,55
IV	296,555	298,605	0	1,98	4,00	2,10	4,10

Толщины кристаллических пластин фильтра ИПФ19-01, определённые в результате расчёта спектрального пропускания ступеней, приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Обозначение кристаллической пластины по схеме рис.2.3	Толщина кристаллической пластины, мм
2-01-001	1,0580
2-01-002	1,3757
2-01-003	3,1934
2-01-004	1,5967

Проведём расчёт ИПФ второго канала (Озон II). Здесь $\Delta\lambda_0 = 1,70$ нм.

$$\left. \begin{array}{l} \mu_{\lambda_1} = 0,01022 \\ \mu_{\lambda_2} = 0,01020 \end{array} \right\} \text{ для } t = 18^\circ\text{C.} \quad \left. \begin{array}{l} \mu_{\lambda_1} = 0,01020 \\ \mu_{\lambda_2} = 0,01018 \end{array} \right\} \text{ для } t = 38^\circ\text{C.}$$

$$\partial\mu/\partial\lambda = -0,00001176 \text{ нм}^{-1}. \quad V_{\lambda_1} = 0,7391; \quad V_{\lambda_2} = 0,7377.$$

$(\ell_2)_{\lambda_1} = 3,9937 \text{ мм}; (\ell_2)_{\lambda_2} = 4,03058 \text{ мм}; (\ell_2)_{\text{ср}} = 4,012 \text{ мм}$ – толщина кварцевой пластины 2-ой ступени Лيو основной группы ступеней.

Соответственно, толщины кварцевых пластин в первой, третьей и четвёртой ступенях фильтра: $\ell_1 = 2,006 \text{ мм}; \ell_3 = 8,024 \text{ мм}; \ell_4 = 16,048 \text{ мм}$.

Ступень с пластиной $\ell_2 = 4,012 \text{ мм}$ создаёт интерференционную картину, в которой положения максимумов соответствуют двум заданным длинам волн λ_1 и λ_2 (рис.2.2в). Ступень, содержащая пластину $\ell_4 = 16,048 \text{ мм}$, обеспечивает заданную ширину полосы пропускания (на уровне 0,5) $\delta\lambda = 0,2125 \text{ нм}$ (рис. 2.2а).

Теперь относительно дополнительной группы ступеней. Так как $\delta\lambda_K = 3,4 \text{ нм}$, то толщина самой толстой К-ой пластины дополнительной группы ступеней равна:

$$\ell_K = \frac{(0,30695)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7384}{0,0034 \cdot 0,01019} = 2,008 \text{ мм.}$$

Область свободной дисперсии фильтра Лيو предварительной монохроматизации примем равной $\geq 80 \text{ нм}$. Тогда количество ступеней n должно быть равным шести. Толщины кристаллических пластин дополнительного фильтра Лيو равны: $\ell_1 = 0,06275 \text{ мм}; \ell_2 = 0,1255 \text{ мм}; \ell_3 = 0,251 \text{ мм}; \ell_4 = 0,502 \text{ мм}; \ell_5 = 1,004 \text{ мм}; \ell_6 = 2,008 \text{ мм}$.

Для увеличения пропускания фильтра используем ступени Шольца. Вместо трёх ступеней Лيو (вторая, третья и четвёртая на рис.2.1) основной группы ступеней фильтра используем эквивалентную им ступень Шольца. Кристаллические пластины ориентируются по закону “треугольник”. Число кристаллических пластин ступени Шольца равно:

$$m = \frac{1,45 \cdot (0,30695)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7384}{0,0002125 \cdot 0,01019 \cdot 4,012} = 11,63.$$

Возьмём $m = 12$, тогда

$$\delta\lambda_\Phi = \frac{1,45 \cdot (0,30695)^2 \cdot 10^3 \cdot 0,7384}{12 \cdot 4012 \cdot 0,01019} = 0,206 \text{ нм.}$$

Значения углов ω_n между главными сечениями кристаллических пластин и плоскостью поляризации входного и выходного поляризаторов ступени смотри в таблице 2.1.

Вместо шести ступеней Лيو дополнительной группы ступеней можно использовать две ступени Шольца.

Толщина ℓ_1 пластин первой ступени Шольца определяется таким образом:

$$\ell_1 = \frac{(0,30695)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7384}{0,1 \cdot 0,01019} = 0,068 \text{ мм.}$$

Возьмём $m_1 = 12$, тогда полоса пропускания первой ступени будет равна:

$$\delta\lambda_1 = \frac{1,45 \cdot (0,30695)^2 \cdot 10^3 \cdot 0,7384}{12 \cdot 68 \cdot 0,01019} = 12,156 \text{ нм.}$$

Величина области свободной дисперсии $\Delta\lambda_2$ второй ступени Шольца:

$$\Delta\lambda_2 = 12,156 + 1,7 = 13,856 \text{ нм.}$$

Толщина кристаллических пластин второй ступени равна:

$$\ell_2 = \frac{(0,30695)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7384}{0,013856 \cdot 0,01019} = 0,4927 \text{ мм.}$$

Количество пластин m_2 второй ступени Шольца:

$$m_2 = \frac{1,45 \cdot (0,30695)^2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7384}{0,0017 \cdot 0,01019 \cdot 0,4927} = 11,8.$$

Положим $m_2 = 12$, тогда $\ell_2 = 0,486$ мм ($\ell_2' = 1,486$ мм; $\ell_2'' = 1,000$ мм).

Оптическая схема ИПФ (ИПФ19-02), предназначенного для измерения концентрации озона в атмосфере (второй канал), показана на рис.2.8. В таблице 2.6 приведены данные о деталях.

Таблица 2.6

Номер позиции детали	Обозначение детали	Наименование детали	Материал	Толщина, мм	Количество, шт
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 технологическая	Стекло КУ-1	4	1
6	1-01-006	Пластина	Стекло КУ-1	2	8
7	1-01-007	Пластина	Кристаллический кварц	1,000	24
8	2-02-001	Пластина	Кристаллический кварц	1,068	12
9	2-02-002	Пластина	Кристаллический кварц	1,486	12
10	2-02-003	Пластина	Кристаллический кварц	4,012	12
11	2-02-004	Пластина	Кристаллический кварц	2,006	1
12	1-01-012	Призма	Исландский шпат	15	1
13	1-01-013	Призма	Исландский шпат	15	1

Направление плоскости поляризации поляроидов 6 и кристаллооптической оси Z кристаллических пластин 7-11, а также призм 12 и 13 относительно базовой плоскости Б, показано на рис.2.8.

Значения угла α для ИПФ19-02 приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Номер позиции детали	Величина угла α	Номер позиции детали	Величина угла α	Номер позиции детали	Величина угла α	Номер позиции детали	Величина угла α
6(1)	$\pm 90^\circ$	7(14)	$-5^\circ 30'$	8(7)	$38^\circ 34'$	9(12)	$1^\circ 50'$
6(2)	$\pm 90^\circ$	7(15)	$-11^\circ 1'$	8(8)	$27^\circ 33'$	10(1)	$88^\circ 10'$
6(3)	$\pm 90^\circ$	7(16)	$-18^\circ 22'$	8(9)	$18^\circ 22'$	10(2)	$84^\circ 30'$
6(4)	$\pm 90^\circ$	7(17)	$-27^\circ 33'$	8(10)	$11^\circ 1'$	10(3)	$78^\circ 59'$
7(1)	$-1^\circ 50'$	7(18)	$-38^\circ 34'$	8(11)	$5^\circ 30'$	10(4)	$71^\circ 38'$
7(2)	$-5^\circ 30'$	7(19)	$-51^\circ 26'$	8(12)	$1^\circ 50'$	10(5)	$62^\circ 27'$
7(3)	$-11^\circ 1'$	7(20)	$-62^\circ 27'$	9(1)	$88^\circ 10'$	10(6)	$51^\circ 26'$
7(4)	$-18^\circ 22'$	7(21)	$-71^\circ 38'$	9(2)	$84^\circ 30'$	10(7)	$38^\circ 34'$
7(5)	$-27^\circ 33'$	7(22)	$-78^\circ 59'$	9(3)	$78^\circ 59'$	10(8)	$27^\circ 33'$
7(6)	$-38^\circ 34'$	7(23)	$-84^\circ 30'$	9(4)	$71^\circ 38'$	10(9)	$18^\circ 22'$
7(7)	$-51^\circ 26'$	7(24)	$-88^\circ 10'$	9(5)	$62^\circ 27'$	10(10)	$11^\circ 1'$
7(8)	$-62^\circ 27'$	8(1)	$88^\circ 10'$	9(6)	$51^\circ 26'$	10(11)	$5^\circ 30'$
7(9)	$-71^\circ 38'$	8(2)	$84^\circ 30'$	9(7)	$38^\circ 34'$	10(12)	$1^\circ 50'$
7(10)	$-78^\circ 59'$	8(3)	$78^\circ 59'$	9(8)	$27^\circ 33'$	11	$+(-)45^\circ$
7(11)	$-84^\circ 30'$	8(4)	$71^\circ 38'$	9(9)	$18^\circ 22'$	12	0°
7(12)	$-88^\circ 10'$	8(5)	$62^\circ 27'$	9(10)	$11^\circ 1'$	13	$\pm 90^\circ$
7(13)	$-1^\circ 50'$	8(6)	$51^\circ 26'$	9(11)	$5^\circ 30'$		

Оптическая стопа (рис.2.8) состоит из 4-х ступеней:

I – ступень Шольца с ориентацией кристаллических пластин по закону “треугольник” формирует рабочую полосу пропускания с полушириной (на уровне нулевого пропускания) $\delta\lambda_I = 12,156$ нм с центром на длине волны $\lambda_0 = 306,95$ нм. Область свободной 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 уровне нулевого пропускания) $\delta\lambda_{II} = 1,7$ нм с центром на длине волны $\lambda_0 = 306,95$ нм. Область свободной дисперсии ступени $\Delta\lambda_{II} = 13,856$ нм. Все нерабочие полосы пропускания срезает ступень I совместно со светофильтром УФС-2.

III – ступень Шольца с ориентацией пластин по закону “треугольник” формирует рабочие полосы пропускания ИПФ с полушириной на нулевом уровне $\delta\lambda_{III} = \delta\lambda_{\Phi} = 0,206$ нм с центрами на длинах волн $\lambda_1 = 306,10$ нм и $\lambda_2 = 307,80$ нм. Все нерабочие полосы пропускания срезают ступени I и II совместно со светофильтром УФС-2.

IV – ступень Лио формирует рабочие полосы пропускания с полушириной на нулевом уровне $\delta\lambda_{IV} = 1,7$ нм с центрами полос $\lambda_1 = 306,10$ нм в 1-м выходном луче и $\lambda_2 = 307,80$ нм во втором выходном луче. Все нерабочие полосы пропускания срезают ступени I и II совместно со светофильтром УФС-2.

Целесообразность использования светофильтра ЖС-20 определяется в процессе испытаний ИПФ. 1-й и 2-й выходные лучи лежат в горизонтальной плоскости. Углы между входным лучом и 1-м и 2-м выходными лучами равны соответственно $12^\circ 46'$ и $11^\circ 11'$. Рабочая температура оптической стопы 38°C . Детали между опорными пластинами находятся на иммерсионном контакте.

Результаты расчётов на ЭВМ спектрального коэффициента пропускания ступеней Шольца и Лио ИПФ19-02 приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Номер ступени	Длина волны главного максимума, нм		Максимальное пропускание вторичных максимумов, %	Ширина полосы пропускания (на уровне 0,5), нм		Ширина полосы пропускания (на нулевом уровне), нм	
I	306,90		0,68	10,10		27,00	
II	306,950	322,800	0,68	1,250	1,425	3,400	3,850
III	306,100	307,810	0,68	0,14	0,38	0,15	0,40
IV	306,100	307,800	0	1,700	1,750	3,400	4,450

Толщины кристаллических пластин фильтра ИПФ19-02, определённые в результате расчёта спектрального пропускания ступеней, приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9

Обозначение кристаллической пластины по схеме рис.2.8	Толщина кристаллической пластины, мм
2-02-001	1,06019
2-02-002	1,4815
2-02-003	4,1682
2-02-004	2,0841