

Модифицированная многокомпонентная ступень

Исходя из заданных требований к ширине полосы пропускания и фону, расчётным путём и экспериментально опробованы ступени Шольца с ориентацией кристаллических пластин по различным законам. Для вычисления пропускания ИПФ был выбран матричный метод Джонса. По Джонсу оптический элемент описывается произведением двух типов матриц:

$$M = M(\alpha) J M(-\alpha). \quad (1)$$

Здесь матрица J характеризует оптический элемент с исходной ориентацией:

$$J = \begin{vmatrix} e^{\frac{\delta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\delta}{2}} \end{vmatrix}, \text{ где } \delta = \frac{2\pi\mu l}{\lambda}. \quad (2)$$

$M(\alpha)$ и $M(-\alpha)$ - матрицы прямого и обратного поворота, учитывающие ориентацию элемента:

$$M(\alpha) = \begin{vmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix} \text{ и } M(-\alpha) = \begin{vmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Пусть S_0 и S_1 – векторы входящего и выходящего света, тогда:

$$S_1 = M S_0. \quad (4)$$

Если рассмотреть систему из m оптических элементов, описываемых матрицами J_1, J_2, \dots, J_m , с относительной ориентацией $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, через которые свет проходит в порядке их нумерации, то согласно (3) и (4):

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= M(\alpha_1) J_1 M(-\alpha_1) = M_1 S_0 \\ S_i &= M_i S_{i-1} \\ S_m &= M_m S_{m-1} \end{aligned} \right\} (5)$$

Из (5) получем соотношение между S_m и S_0 :

$$S_m = M_m M_{m-1} \dots M_2 M_1 S_0. \quad (6)$$

Для фильтра Шольца уравнение (6) принимает вид:

$$S_m = M_{\Pi} M(\alpha_m) J_m M(-\alpha_m) \dots M(\alpha_1) J_1 M(-\alpha_1) M_{\Pi} S_0. \quad (7)$$

Матрица M_{Π} описывает поляризатор, пропускающий электрический вектор параллельно оси X :

$$M_{\Pi} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Пропускание фильтра T есть квадрат отношения амплитуд входного и выходного электрических векторов S_0 и S_m .

Углы ориентации α определяются в зависимости от выбранного закона их изменения. В нашем случае для функции «треугольник» углы между пластинами будут такими:

$$\alpha_1, 2\alpha_1, \dots, i\alpha_1, (m-i+2)\alpha_1, \dots, 2\alpha_1, \alpha_1. \quad (9)$$

Из (9) находим:

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{(m+1)(m+3)} \text{ при нечётном } m \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{(m+2)^2} \text{ при чётном } m \quad (11)$$

В случае изменения углов ориентации по закону Гаусса:

$$\alpha = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-i^2/2\sigma^2} \quad (12)$$

Величина σ определяется при наложении дополнительных граничных условий:

$$\frac{\alpha_{min}}{\alpha_{max}} = 0,01 \quad (13)$$

Обычно в ИПФ вторичный максимум, ближайший к главному, обладает наибольшим пропусканием по сравнению с остальными вторичными (в дальнейшем будем обозначать его T_1). Пропускание в следующем за ним вторичном максимуме обозначим T_2 .

Подробно исследовано пропускание модифицированного фильтра Шольца с различным числом пластин, ориентированных по закону «треугольника». Расчётные и экспериментальные данные в таблице показывают, что $T_1 < T_2$. Остальные вторичные максимумы близки к нулю.

Пропускание вторичных максимумов и ширина полосы пропускания на уровне 0,5 фильтра Шольца с различным числом пластин (толщина пластин 2,00 мм, длина волны $\lambda = 532,05\text{нм}$):

Закон ориентации пластин	Число пластин m	Пропускание T_1 , %	Пропускание T_2 , %	Ширина полосы, нм
По Шольцу	6	12,75	5,05	1,7
	8	12,53	4,90	1,3
	10	12,20	4,76	1,1
	12	12,06	4,55	0,9
	16	11,88	4,33	0,7
	24	11,75	3,74	0,5
Треугольник	6	0,06	1,32 (1,8)	2,2 (2,2)
	8	0,07	0,92 (1,4)	1,85 (1,9)
	10	0,08	0,76 (1,2)	1,5 (1,6)
	12	0,087	0,68	1,2
	16	0,09	0,60	1,0
	24	0,11	0,51	0,66
Гаусс	6			4,1
	8			3,0
	10			2,3
	12			1,8
	16			1,4
	24			1,0

Примечание: В скобках приведены данные эксперимента. При ориентации пластин по закону Гаусса отсутствуют вторичные максимумы: имеет место плавное уменьшение пропускания от 1 до 0.

Пропускание во вторичных максимумах связано с числом пластин в фильтре: с увеличением числа пластин суммарное пропускание во вторичных максимумах уменьшается.

Экспериментальное исследование спектральных характеристик фильтра Шольца проводилось на ИПФ, содержащем пластины кристаллического кварца толщиной 2,00 мм. ИПФ представляет собой металлическую прямоугольную оправу, в которой устанавливаются два поляризатора и все кварцевые пластины (до 10 штук), закреплённые в собственных оправках. Конструкция оправ позволяет любым заданным способом

ориентировать главные сечения каждой пластины по отношению к главному направлению входного поляризатора с точностью 1 угловая минута. Конструкция всех оправ исключает возможность взаимных неконтролируемых разворотов пластин.

Исследование контуров полос пропускания проводилось на спектральной установке с обратной линейной дисперсией 0,2 нм/мм. Фильтр располагался в параллельном ходе лучей перед входной щелью спектрографа ДФС-13-2. Ввиду малого пропускания во вторичных максимумах T_1 и T_2 по сравнению с пропусканием в главном максимуме был использован трёхступенчатый ослабитель и подобраны две экспозиции (1 минута для регистрации главного максимума и 15 минут – вторичного), обеспечивающие соответствие главного максимума и вторичных линейному участку характеристической кривой фотоплёнки. Все спектрограммы проявлены при стандартных условиях и профотометрированы на регистрирующем микрофотометре ИФО-451.

При изготовлении и сборке ИПФ важно знать, как влияют на параметры прибора ошибки в толщине и ориентации пластин. Наиболее удобным методом для решения подобного рода задач является метод сферы Пуанкаре. Для фильтра Шольца, содержащего большое число кристаллических пластин, ориентированных по сложному закону, метод усложняется. Поэтому анализ проведём для случая $m = 1$, принимая допущение, что изменение пропускания ИПФ по спектру под влиянием ошибок изготовления и сборки, прямо пропорционально числу кристаллических пластин в фильтре Шольца.

Пусть пластина имеет ошибку ориентации $d\alpha$. Для фильтра Шольца, содержащего m кристаллических пластин, изменение интенсивности по спектру имеет вид:

$$\Delta I = 4\tau_0 m (d\alpha)^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (14)$$

где τ_0 – коэффициент пропускания выходного поляризатора в направлении наибольшего пропускания.

В минимумах пропускания $\delta = 2\pi(N + 0,5)$, где $N = 0, 1, 2, \dots$:

$$\Delta I_{min} = 4\tau_0 m (d\alpha)^2. \quad (15)$$

Например, при $m = 12$ и $\Delta I_{min} = 10^{-3}$ величина $d\alpha = 22$ угловых минуты. Если $\Delta I_{min} = 10^{-5}$, то пластины должны ориентироваться с точностью 2 угловые минуты.

Результаты расчёта влияния ошибок ориентации кристаллических пластин фильтра Шольца, выполненного методом матриц Джонса, показывают, что при ошибках ориентации ± 30 угловых минут остаточное пропускание в минимумах порядка 10^{-3} , независимо от закона ориентации пластин, что хорошо соответствует результатам, вычисленным по формуле (15).

Эксперименты показали, что при точности ориентации кристаллических пластин порядка 20 угловых минут пропускание вторичного максимума T_2 (пластины ориентированы по закону «треугольник») увеличивается примерно в 2 раза по сравнению с пропусканием T_2 при точности ориентации пластин и поляризаторов 1 угловая минута, что хорошо совпадает с результатами расчёта. В связи с этим был разработан способ ориентации при использовании фотоэлектрической регистрации сигнала, позволяющий устанавливать пластины и поляризаторы с точностью не хуже 1 угловой минуты.

Теперь рассмотрим наличие ошибки в величине вносимой пластинкой разности фаз (т.е. толщине). Пусть пластина имеет ошибку в разности фаз $\Delta\delta$. Для фильтра Шольца, содержащем m кристаллических пластин изменение интенсивности по спектру имеет вид:

$$\Delta I = \frac{\tau_0 m}{2} \left[-\cos \delta \frac{(\Delta\delta)^2}{2} - \sin \delta \Delta\delta \right]. \quad (16)$$

В минимумах пропускания, где $\delta = 2\pi(N + 0,5)$:

$$\Delta I_{min} = \frac{\tau_0 m}{4} (\Delta\delta)^2. \quad (17)$$

Например, при $m = 12$ и $\Delta I_{min} = 10^{-3}$ допуск на разность фаз $\Delta\delta = 2 \cdot 10^{-3}$. Отсюда, допуск на изготовление кристаллических пластин при $\lambda = 500$ нм и $l = 0,5414$ мм равен 0,16 мкм. Соответственно, при $\Delta I_{min} = 10^{-5}$ допуск на толщину кварцевых пластин $\Delta l = 0,016$ мкм. В связи с этим было разработано устройство для контроля толщины кристаллических пластин ИПФ в процессе доводки.