

Ф а з о в ы е п л а с т и н ы

Хроматические фазовые пластины.

Порядок фазовой пластины и точность задержки.

Фазовые пластины создают определенную разность хода между ортогонально поляризованными компонентами излучения и служат для преобразования состояния поляризации.

Фазовые пластины (ФП) вырезают из одноосных двулучепреломляющих кристаллов параллельно оптической оси. Схематически ФП представлены на Рис.1 а, б.

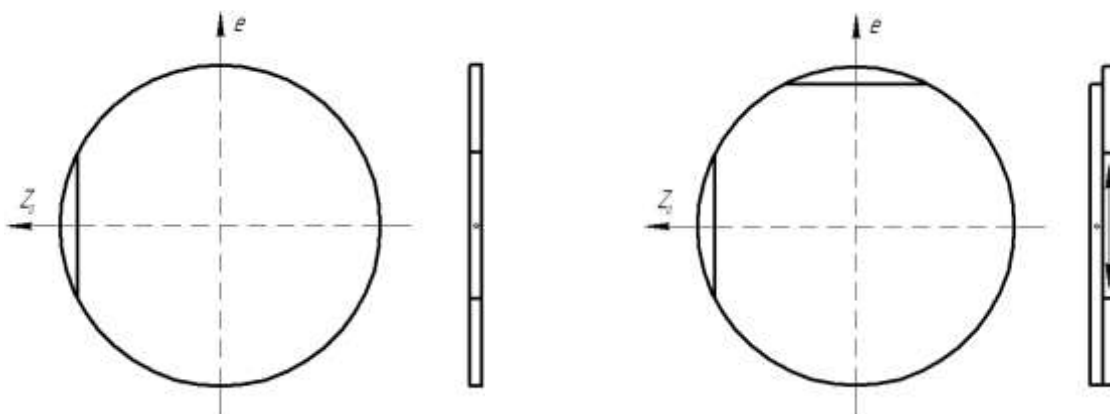


Рис. 1. а. Хроматическая ФП из монопластины

Рис.1.б. Составная ФП нулевого порядка.

Буква «Z» обозначает направление оптической оси, индекс «o» означает, что оптическая ось соответствует направлению распространения обыкновенного луча (по определению оптической оси). При таком способе вырезки пластина имеет две оси – «быструю» и «медленную» - вдоль которых показатели преломления o- и e- лучей ($n_o(\lambda)$ и $n_e(\lambda)$) максимальны. Для положительных кристаллов быстрой осью является направление распространения o-луча (SiO_2 , MgF_2 , Y_2O_3 , TiO_2 , CdS , CdSe), для отрицательных - направление распространения e-луча (CaCO_3 , $\alpha\text{-BBO}$, PbMoO_4 , TeO_2 , LiNbO_3). При падении линейно поляризованного излучения на ФП происходит разделение пучка на обыкновенный и необыкновенный лучи с амплитудами, пропорциональными проекциям электрического вектора на оси «Z_o» и «e» в зависимости от азимута плоскости его колебаний. На выходе из ФП o- и e-лучи приобретают разность фаз $\sigma(\lambda)$:

$$\sigma(\lambda) = 2 \cdot \pi \cdot N(\lambda)$$

$N(\lambda)$ – безразмерная волновая разность хода ВРХ (задержка).

$$N(\lambda) = \frac{L \cdot [n_e(\lambda) - n_o(\lambda)]}{\lambda}$$

Целочисленную часть $N(\lambda)$ (количество интерференционных порядков) называют порядком ФП, дробная часть $N(\lambda)$ отвечает за механизм действия фазовых пластин. Полуволновые ФП с ВРХ $(k+1/2)$ изменяют азимут электрического вектора в линейно поляризованном излучении или направление его вращения в циркулярно-поляризованном

излучении. Четвертьволновые пластины с ВРХ ($k+1/4$) либо ($k+3/4$) превращают линейно поляризованное излучение в циркулярно-поляризованное или при определенной ориентации любое эллиптически поляризованное в линейное. Величина отклонения дробной части задержки от требуемой характеризует точность фазовой пластины. Она определяется либо в долях волнового периода ($\lambda/100$, $\lambda/300$, $\lambda/500$ и т.д.) либо в процентах по отношению к нужной величине дробной части. Первое определение взято из обычной интерферометрии, оно более традиционно, второе более корректно и удобно при практическом использовании.

Точность ФП определяется точностью изготовления ее толщины и точностью измерительного контроля. Обычно толщина ФП доводится до нужной величины постепенно при постоянном измерении задержки – в этом случае определяющей становится точность измерительного контроля. Многочисленные методы измерения задержки фазовых пластин подразделяются на две группы:

1). Методы, в которых используются обычные некогерентные источники излучения. Установление и изменение длины волны осуществляется спектральными приборами – монохроматорами, фильтрами и т.д.

2). Применяются источники света с высокой когерентностью (лазеры), длина волны которых фиксирована и известна с большой точностью.

Такое разделение не общепринято в литературе по ФП, но мы считаем его наиболее общим и продуктивным. Оно позволяет с единых позиций рассмотреть вопрос о связи точности измерений задержки с порядком ФП, ее рабочей длиной волны, ошибками эксперимента. Дело в том, что эти две группы методов имеют два разных источника появления основной ошибки при определении точности ФП. В первой группе основная ошибка при измерениях обусловлена неточностью в определении длины волны зондирующего излучения. Во второй группе главные ошибки обусловлены интерференцией многократных пере- отражений световых пучков от входной и выходной граней внутри фазовой пластины (см. следующий раздел).

Оценим влияние величины порядка ФП и точности в определении длины волны при абсолютно точном измерении фазовой задержки (ВРХ). На имеющейся у нас аппаратуре мы можем устанавливать и измерять длину волны с гарантированной точностью 0,0001 мкм. Исходя из этой величины можно рассчитать минимальные длины волн, начиная с которых мы можем проводить измерительный контроль фазовых пластин с заданной точностью: не менее $\lambda/100$, $\lambda/300$, $\lambda/500$. Данные сведены в Таблицу 1.

Данные Таблицы 1 соответствуют фазовым пластинам из кристаллического кварца. Для ФП из других материалов результаты будут очень близки к приведенным в Таблице 1. Небольшие различия могут определяться только различиями в первых производных дисперсии двупреломления материалов.

Приведенные в Таблице 1 величины не зависят от конкретного метода измерения волновых задержек. Для измерения ФП с большей чем в Табл.1 точностью следует сначала повысить точность установления и определения рабочей длины волны – только потом можно обсуждать точности методик.

Таблица 1.

Порядок ФП	Min длина волны для точности лучше 1/100 (нм)	Min длина волны для точности лучше 1/300 (нм)	Min длина волны для точности лучше 1/500 (нм)
0	<190	<190	<190
1	<190	<190	<190
2	<190	<190	220
3	<190	203	261
4	<190	227	297
5	<190	249	344
6	<190	271	388
7	<190	297	433
8	190	326	478
9	195	353	535
10	203	378	574
11	211	410	616
12	220	433	672
13	227	457	723
14	234	495	770
15	242	506	832
16	249	541	876
17	261	574	926
18	265	603	999
19	271	626	1042
20	283	657	1098

В процессе производства фазовых пластин мы используем несколько методов измерительного контроля ФП. Блок-схема универсальной спектрополяриметрической установки приведена на Рис.2.

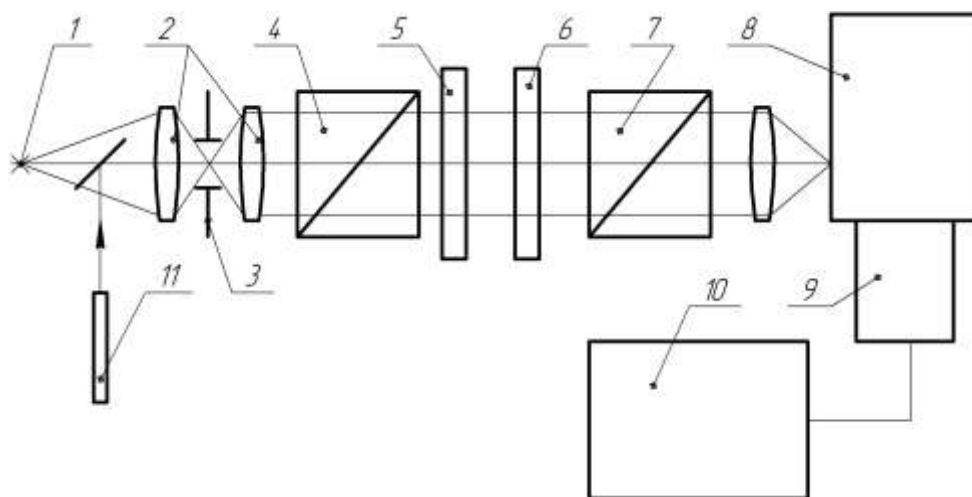


Рис.2. Блок схема универсальной спектрополяриметрической установки.

Обозначения: 1 – сменные источники некогерентного излучения (водородная лампа, лампа накаливания, глобар); 2,3 – коллиматор; 4 – поляризатор (призма Глана, поляризатор-решетка); 5 – тестируемая ФП; 6 – четвертьволновый компенсатор (пластина $\lambda/4$); 7 – анализатор (призма Глана, поляризатор-решетка); 8 – автоматизированный монохроматор со сменными решетками; 9 – блок сменных фоторегистраторов (ФЭУ, фотодиоды, пироэлектрический приемник, болометр); 10 – персональный компьютер, 11 – юстировочный лазер.

Наличие разных источников излучения, поляризаторов разных типов, сменных дифракционных решеток в монохроматоре а также сменных фотоприемников позволяет проводить спектрополяриметрические измерения в широкой спектральной области 0,19 – 25 мкм.

Метод тестирования полуволновых ФП основан на нахождении спектрального положения полуволновых минимумов. Спектр пропускания ФП между параллельными поляризаторами при ориентации азимута ее оптической оси под 45 град. к плоскости пропускания поляризаторов представляет циклоиду, в которой минимумы соответствуют длинам волн, где она является полуволновой (Рис.3а). При этом положение минимума определяется только задержкой. Любые ошибки в установлении азимутальных углов элементов схемы, наличии расходимости и некогерентности зондирующего пучка, появлении интерференции переотражений (см. следующий параграф) сказываются только на глубине минимума и не отражаются на его спектральном положении. При близости положения минимума к требуемой длине волны ошибку задержки можно определить по формуле

$$\delta N = (N + 0,5) \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda}$$

где N – целочисленный порядок пластины, λ_0 – требуемая длина волны, λ – реально наблюдаемое положение минимума у данной ФП. Эта формула дает слегка завышенное значение точности, поскольку использует приближение одинаковости двупреломления материала при λ и λ_0 , но хороша тем, что не использует никаких добавочных сведений. Используя данные по дисперсии двупреломления материала ее можно уточнить. У нас имеются данные по дисперсии двупреломления всех применяемых материалов. Для кварца и ниобата лития имеются приличные литературные данные [1], для MgF₂, CdS, CdSe – измерены нами.

Четвертьволновые ФП тестируются другим методом. Азимут оптической оси ФП также устанавливается под 45 град. относительно азимута поляризатора. При вращении анализатора измеряется индикатриса пропускания (Рис. 3б). Дробная часть задержки N_d определяется по формуле

$$N_d = \pi^{-1} \cdot \arctg \sqrt{\frac{J_s}{J_p}}$$

где J_s и J_p – интенсивности светового потока при азимутах анализатора 90 и 0 град. относительно азимута поляризатора.

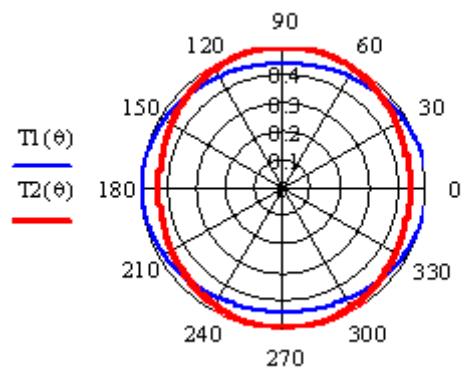
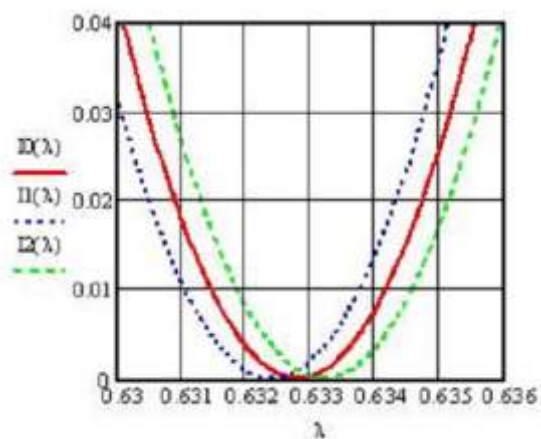


Рис.3а. Полуволновые минимумы для ФП с задержкой 14,5 ($I_0(\lambda)$), 14,49 (точность $-\lambda/100$ $I_1(\lambda)$), 14,51 (точность $+\lambda/100$ $I_2(\lambda)$)

Рис.3б. Индикатриса пропускания для ФП с задержкой 14,24 (точность $-\lambda/100$ $T_1(\theta)$), и 14,26(точность $+\lambda/100$)

Этот метод предъявляет более жесткие требования к условиям измерений. Должны быть устранены переотражения от поверхностей ФП (см. следующий раздел), не допускается наличие неполяризованного фона, при использовании монохроматора с дифракционными решетками следует вводить поправки на разное пропускание монохроматора для ортогональных поляризаций, источник света и фотоприемник должны быть хорошо стабилизированы.

В ряде задач для измерения задержек ФП, как полуволновых так и четвертьволновых, мы применяем компенсационный метод Сенармона. Для этого в схему спектрополяриметра вводится четвертьволновый компенсатор δ на Рис.2. При этом спектрополяриметр работает по принципу фотометрического нульэллипсометра. Вращением анализатора измеряется угол гашения, из величины которого вычисляется дробная часть задержки. Эта методика нечувствительна к неполяризованному излучению и позволяет оценить поляризационно-контрастные характеристики фазовой пластины. Этот метод, как и предыдущий, чувствителен к наличию интерференции переотражений. Способы устранения их влияния будут рассмотрены в следующем разделе.

Для описанных выше трех методов мы проанализировали ошибки, возникающие при фотоэлектрических методах регистрации, установке и отсчете азимутальных углов, установке и определении рабочей длины волны. Выяснилось, что основная ошибка измерения точности ФП обусловлена неточностями в установке и определении длины волны. То же самое относится и к другим многочисленным методам, описанным в литературе, в том числе и более изощренным в отношении экспериментальной аппаратуры. Без повышения спектральной точности применение их не имеет смысла.