

### Роль угла падения и угловой апертуры входного излучения.

Часто считают, что при наклонном падении коллимированного пучка на ФП происходит увеличение задержки ортогонально поляризованных компонент за счет увеличения оптической длины пути. Это не соответствует действительности. При наклонном падении изменяется угол между волновой нормалью и оптической осью пластины и, соответственно, величина показателя преломления для необыкновенного луча. При этом уменьшается двупреломление, которое может компенсировать увеличение длины пути и даже привести к уменьшению фазовой задержки. Величина эффекта сильно зависит для данного угла падения от ориентации плоскости падения луча относительно оптической оси. Для моделирования мы, как и ранее, берем кварцевую пластину 13-го порядка с волновой задержкой  $N=13,5$  для полуволновой и  $N=13,25$  для четвертьволновой ФП. Графики на рис.8 иллюстрируют данное явление.

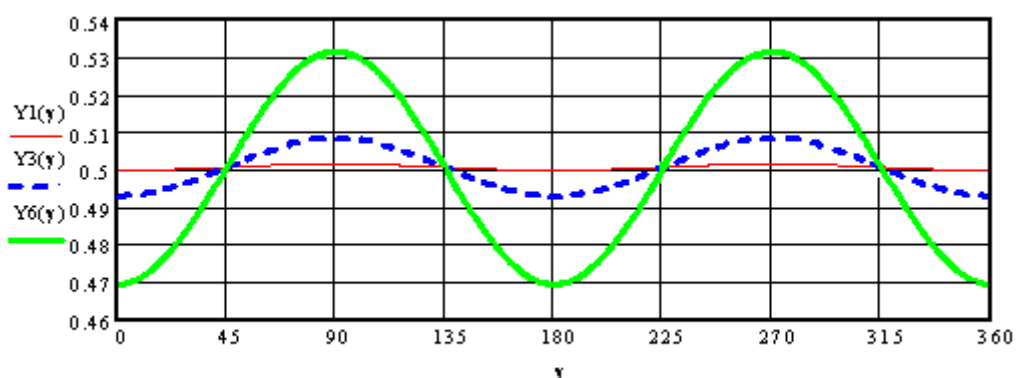


Рис. 8. Величина дробной части задержки полуволновой ФП 13-го порядка на длину волны 0,6328 мкм для коллимированного пучка в зависимости от азимута плоскости падения  $\gamma$  (град.) относительно оптической оси. Угол падения 1 град. ( $Y1(\gamma)$  -пунктир), 3 град. ( $Y3(\gamma)$  - штриховая), 6 град. ( $Y6(\gamma)$  - сплошная линия)

Видим, что отличия задержки от полуволновой одинаковы как в большую, так и в меньшую сторону и достигают для угла падения 6 град. величины  $\lambda/32$  (6,4%). Такая зависимость задержки от азимутального угла плоскости падения характерна для всех двупреломляющих кристаллов. Амплитуда отклонений волновой задержки от номинала в сторону больших и меньших задержек определяется только порядком пластины и практически не зависит от величины двупреломления. Это иллюстрирует график на рис.9.

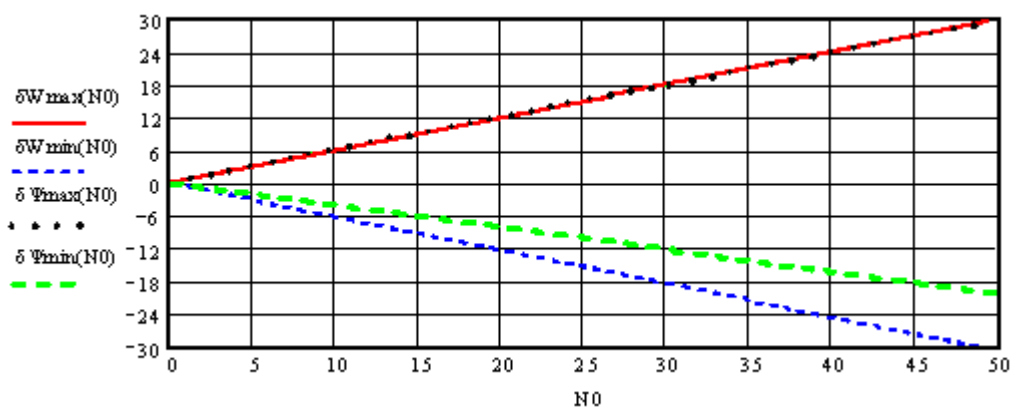


Рис.9. Максимальные ошибки волновой задержки фазовых пластин (для азимуты плоскости падения 0, 90, 180, 270, 360 град. относительно оптической оси) в % от номинала в зависимости от величины порядка пластины. Угол падения коллимированного пучка на ФП – 6 град. Функции  $\delta W_{max}(N_0)$ ,  $\delta W_{min}(N_0)$  относятся к ФП из кварца; функции  $\delta \psi_{max}(N_0)$ ,  $\delta \psi_{min}(N_0)$  – к ФП из кальцита. Индексы «max» и «min» означают

ошибки в сторону больших и меньших задержек. В расчете показатель двупреломления кварца взят 0,01; кальцита – 0,2, но это практически не имеет значения

Для материала с малым двупреломлением (кварц) максимальные отклонения задержки в большую и меньшую сторону одинаковы, для материала с 20-тикратно большим двупреломлением (кальцит) при больших порядках ФП отклонение в сторону больших задержек немного превалирует (сказывается увеличение оптического пути). Из Рис.9 можно сделать несколько важных выводов.

1. При работе с коллимированными пучками точность задержки ФП может быть улучшена при небольшом изменении угла падения пучка на пластину. Выбирая азимут плоскости падения задержку можно как увеличить, так и уменьшить. При этом все поддается точному расчету.
2. При использовании коллимированных пучков часто прибегают к небольшому заклону пластин для предотвращения бликов от поверхностей. Чтобы не изменить при этом точность задержки следует наклонять пластину таким образом, чтобы азимут плоскости падения составлял с оптической осью ФП угол 45, 135, 225, 360 град.
3. При работе в конусной угловой апертуре (сходящейся либо расходящейся) выходное излучение ФП по световому полю будет иметь разные формы поляризации. Это может иметь значение при обработке изображений в поляризованном свете. В качестве наглядного примера на рис.10а,б приведены гистограммы распределения поляризационного контраста излучения, выходящего из полуволновой кварцевой пластины. Под поляризационным контрастом понимается величина обратной эллиптичности по интенсивности (отношение главных осей выходного эллипса по интенсивностям). Входное излучение падает по нормали для центрального луча в световом конусе с половинным углом 3 град. Каждый столбик соответствует лучу, падающему на ФП под определенным углом в пределах углового конуса и с определенным азимутом плоскости падения относительно оптической оси пластины.

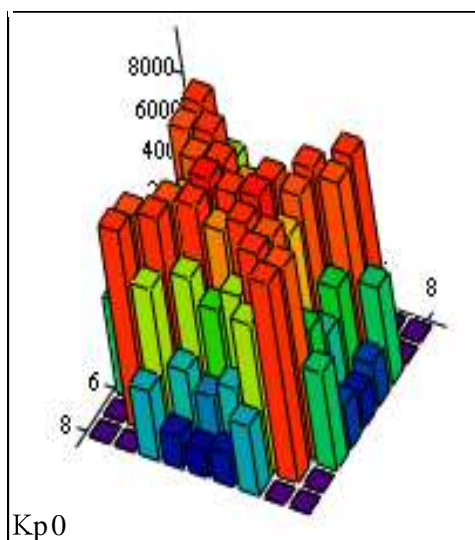


Рис.10.а – Полуволновая ФП с  $N=13.5$  изготовлена с абсолютной точностью задержки

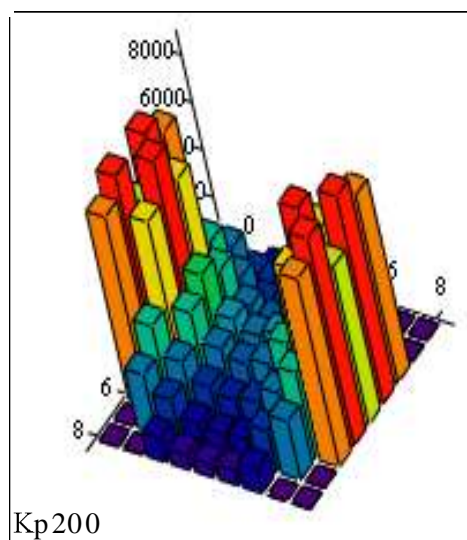


Рис.10 б – Та же пластинка изготовлена с точностью  $+\lambda/200$  ( $N=13.505$ )

Высота столбика соответствует величине поляризационного контраста луча. Центральный столбик – это луч, падающий по нормали, следующий ряд – лучи с углом падения 0,75 град., далее 1,5 град., 2,25 град. и последний по краю апертуры с углом падения 3 град. При расчете контраст входного линейно поляризованного излучения

принимался равным  $1E+4$ . Расчет интенсивностей проводился методом матриц Мюллера и для сравнения модифицированным методом матриц Джонса, результаты совпадают.

В реальных приборах и устройствах пучки чаще всего имеют ненулевую угловую апертуру. При этом интегральное излучение, выходящее из фазовой пластины становится суперпозицией разного типа поляризаций. В такой ситуации понятие точности задержки ФП становится непродуктивным, поскольку не отражает поляризационных характеристик выходного излучения. Мы используем понятие поляризационного контраста фазовой пластины. Для полуволновых ФП, которые поворачивают азимут плоскости колебаний электрического вектора линейно поляризованного излучения на удвоенный азимут оси ФП, поляризационный контраст равен отношению интенсивностей преимущественной компоненты и ортогональной ей. Отличие поляризационного контраста выходного излучения ФП от поляризационного контраста входного излучения является мерой качества преобразования поляризации данной ФП при конкретных условиях ее использования – угловой апертуре, спектральном составе излучения, наличии интерференции переотражений, температурном диапазоне. Величина азимута поворота не зависит от задержки а только от точности установки азимута оси фазовой пластины. Для характеристики качества четвертьволновой пластины в расчете моделируется идеальный четвертьволновый компенсатор Сенармона (пластина  $\lambda/4$  плюс вращающийся линейный анализатор). Поляризационный контраст полученного линейно поляризованного излучения в сравнении с контрастом входного излучения является мерой качества тестируемой ФП  $\lambda/4$  опять же при конкретных условиях ее использования. Все это может быть сформулировано в рамках параметров Стокса [11], но для потребителей фазовых пластин понятие поляризационного контраста более близко, поскольку измеряется непосредственно и четко отражает меру ухудшения чистоты состояния поляризации, вносимую фазовой пластиной при данных угловых и спектральных характеристиках входного излучения, точности изготовления толщины, температурном диапазоне и т.д.

Рассчитать среднюю задержку ФП в конусе угловой апертуры методом взвешивания задержек лучей идущих под разными углами нельзя, поскольку это фазы. Мы рассчитываем комплексные амплитуды (векторы Максвелла-Джонса) лучей, падающих под разными углами с разными ориентациями азимута плоскости падения, используя матрицы Джонса элементов схемы – поляризатора, фазовых пластин и их композиций, четвертьволнового компенсатора (если он имеется), анализатора. Из комплексных амплитуд вычисляются интенсивности лучей. Далее интенсивности усредняются интегрированием от 0 до  $2\pi$  по азимуту плоскости падения при данном угле падения и затем по углу падения в световом конусе с последующей нормировкой. Из интенсивностей определяется средняя задержка и поляризационный контраст моделированием одного из методов указанных в предыдущем разделе.

Обычно моделируется компенсатор Сенармона и ищется угол гашения и поляризационный контраст полученного линейно поляризованного излучения. Такой расчет максимально приближен к условиям реального измерения и использования ФП.

Лучи, идущие по разным траекториям считаются некогерентными между собой и не интерферируют. Но языке расчета интегральная интенсивность получается сложением интенсивностей отдельных лучей. Основной вывод – наблюдаемая средняя задержка не зависит от величины угловой апертуры при нормальном падении для центрального луча. Падение в угловой апертуре приводит к уменьшению поляризационного контраста (чистоты состояния поляризации) выходного излучения.

В таблице 2 приведены величины поляризационного контраста четвертьволновых ФП разного мультипорядка с абсолютно точной толщиной на длину волны 550 нм для разных угловых апертур входного излучения. При расчетах контраст входного линейно поляризованного излучения принимался равным  $1E+5$ .

**Таблица 2.**

Полуугловая апертура, град	Порядок пластины, толщина, мм				
	0,25	5,25	11,25	17,25	34,25
	0,015	0,315	0,675	1,035	2,055
0,1	1E+5	1E+5	1E+5	1E+5	1E+5
1	1E+5	1E+5	9E+4	8E+4	5E+4
3	1E+5	4E+4	1.2E+4	6E+3	1.5E+3
5	9E+4	8E+3	1.8E+3	800	200
10	7E+4	530	117	50	12
15	3E+4	105	23	10	2

Рассмотрение данных Таблицы 2 приводит к известному выводу: лучшие эксплуатационные характеристики у ФП более низкого порядка, желательно нулевого. В таблице 3 приведены поляризационные контрасты дляборок нулевого порядка с разной толщиной компонентов (разной общей толщиной) для разных угловых апертур входного излучения.

**Таблица 3.**

Полуугловая апертура, град.	Общая толщина сборки нулевого порядка, мм				
	1	2	3	4	8
0,1	1E+5	1E+5	1E+5	1E+5	1E+5
1	8E+4	5.8E+4	3.8E+4	2.5E+4	7.8E+3
3	6E+3	1.6E+3	740	416	104
5	880	220	96	54	13
10	55	13.5	6	3.4	1.2
15	10	2.7	1.4	1.2	1.1

Данные Таблицы 3 показывают, что сборки нулевого порядка так же чувствительны к величине угловой апертуры в зависимости от толщины, как и ФП мультипорядка. Они решают задачу термостабилизации ФП, но не угловой апертуры.

В таблице 4 приведены результаты расчетов, позволяющие сравнить меру влияния на поляризационный контраст полуволновой ФП ( $N=14.5$ ) угловой апертуры 3 град. и ошибок в толщине при изготовлении ФП для разных степеней поляризации входного излучения. Столбец 1 содержит величины поляризационного контраста интегрального выходного монохроматического излучения для абсолютно точной ФП в угловой апертуре 3 град. В столбцах 2 и 3 содержатся поляризационные контрасты для ФП, изготовленной с точностью  $\lambda/200$  и  $\lambda/100$ . Поляризационные контрасты для них рассчитаны для полностью коллимированного луча, падающего по нормали.

**Таблица 4.**

Степень поляризации входного излучения	Степень поляризации выходного излучения		
	Интегральный сигнал, +/- 3 град.	Центральный луч	
		1/200	1/100
	1	2	3
Абсолютная	7 500	4 000	1 000
100 000	7 000	3 900	1 000
10 000	4 300	2 900	960
1000	880	800	520
100	100	100	92

Данные Таблицы 1 показывают определяющее влияние степени поляризации входного излучения. Для входного контраста 1000 влияние апертуры и ошибок в изготовлении соизмеримы, а для излучения с более низкой степенью поляризации просто нет отличий.

Если ФП используется в некоторой заметной апертуре, то не имеет смысла предъявлять высокие требования к точности изготовления толщины.

В разделе 1.1.2. мы обещали предложить простой способ устранения влияния интерференции переотражений при оперативном измерительном контроле ФП с помощью лазерных источников света либо обычных при высоком спектральном разрешении. Вывод, полученный в данном разделе о независимости задержки ФП от величины угловой апертуры при измерениях, позволяет это сделать.

Проведем расчет волновых задержек при наличии Френелевских переотражений от поверхностей ФП при измерениях в разной угловой апертуре. Для моделирования выбираем, как и ранее, четвертьволновую ФП мультипорядка с задержкой  $N=13.25$  на длину волны He-Ne лазера  $\lambda=0,6328$  мкм. Расчет также проводится методом матриц Джонса, но при вычислении интегральной интенсивности, измеряемой в экспериментах, суммируются не интенсивности отдельных лучей а их комплексные амплитуды с учетом многократных отражений. При вычислении задержек моделировался компенсационный метод измерения волновой разности хода (метод Сенармона – пластина  $\lambda/4$  плюс вращающийся анализатор) Результаты представлены на рис.11. При небольшой угловой апертуре ( $\pm 1$  град.) переотражения продолжают сильно влиять на задержку, но в апертуре  $\pm 6$  град. амплитуды уже настолько перемешиваются, что отклонения от волновой задержки без переотражений практически нет. На рис.12 этот случай изображен отдельно в увеличенном масштабе. Ошибка измерений из-за переотражений равна 0,16%, это соответствует ошибке в единицах периода  $\lambda/2500$ . Это очень важный результат, позволяющий автоматизировать измерительный контроль точности фазовых пластин при изготовлении. Длина волны лазерных источников известна с высокой точностью, они малогабаритны (полупроводниковые лазерные модули на гетероструктурах) и экономичны. Показатели двупреломления кварца известны тоже с высокой точностью.

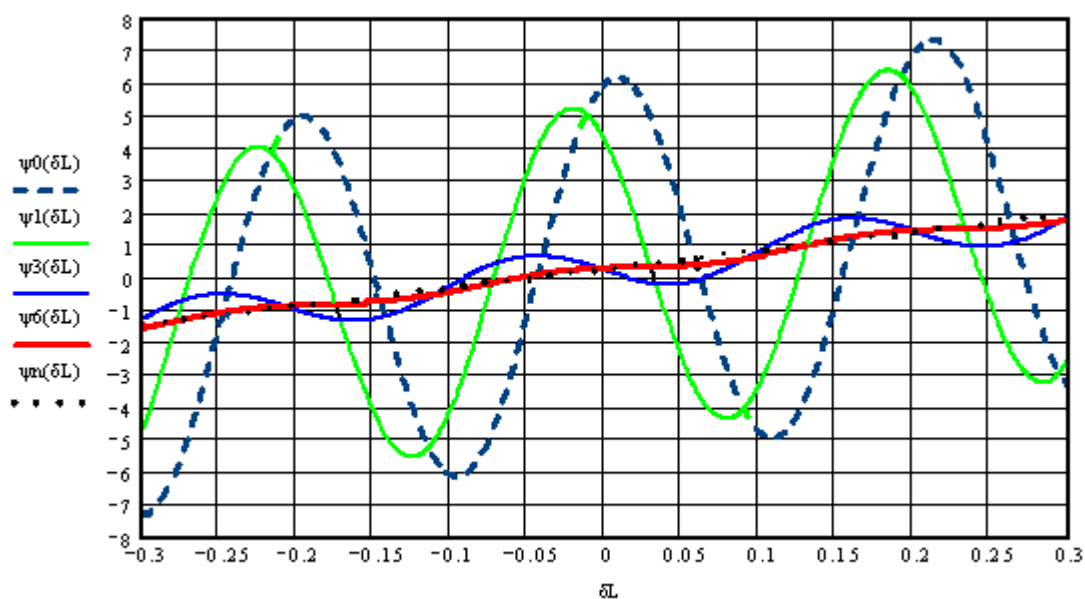


Рис. 11. Ошибка задержки в процентах относительно требуемой в  $\pi/2$  на рабочей длине волны (He-Ne лазер) в зависимости от ошибки изготовления толщины  $\delta L$  в мкм при измерении в разных полуугловых апертурах.

Обозначения:  $\psi_0(\delta L)$  – нулевая угловая апертура,  $\psi_1(\delta L)$  – угловая апертура  $\pm 1$  град.,  $\psi_3(\delta L)$  -  $\pm 3$  град.,  $\psi_6(\delta L)$  -  $\pm 6$  град.,  $\psi_n(\delta L)$  – ошибка задержки в отсутствие

переотражений

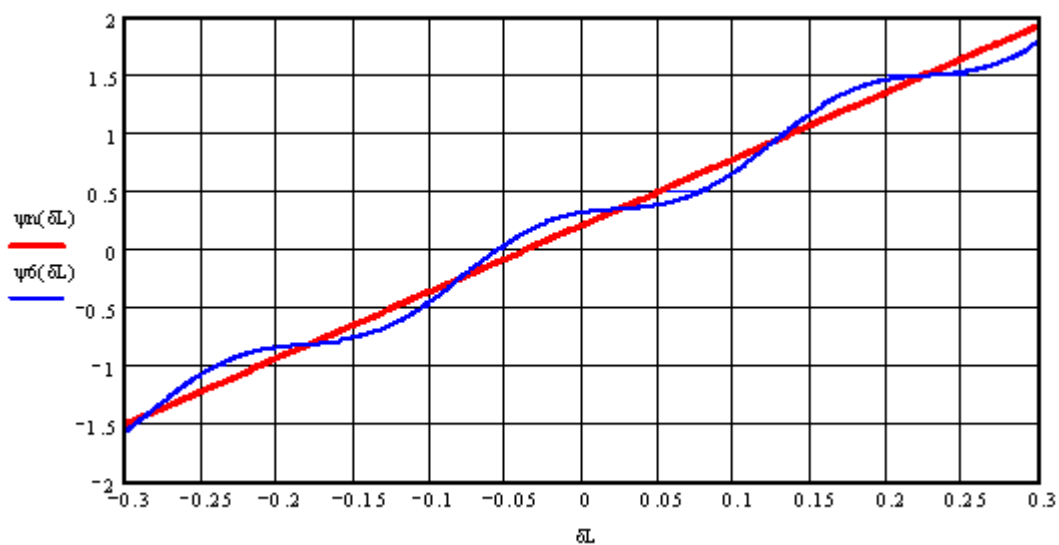


Рис.12. То же что на рис.11 в увеличенном масштабе при измерении в апертуре +/- 6 град. ( $\psi_b(\delta L)$  и в отсутствии переотражений ( $\psi_n(\delta L)$  – например ФП с хорошим антиотражающим покрытием)

Работая в конусной угловой апертуре +/- 6 град. на одной длине волны при автоматическом поиске угла гашения (такая аппаратура хорошо разработана для автоматических эллипсометров) процесс измерительного контроля точности ФП в технологической цепи производства фазовых пластин может быть очень оперативным.