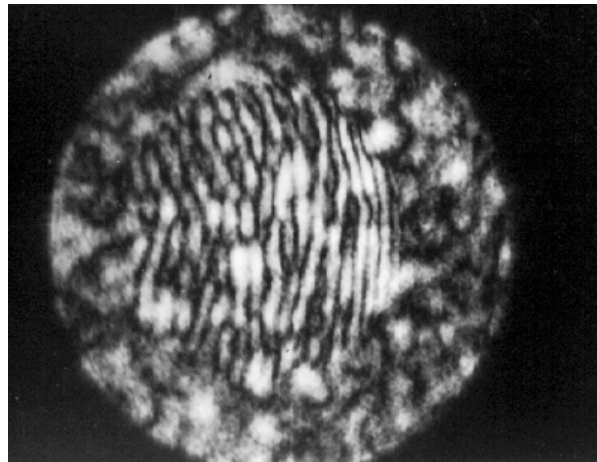


***ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ  
РАСSEИВАЮЩИХ СРЕД***

---

**В.П. Рябухо**

**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
ТОЛЩИНЫ ПРОЗРАЧНЫХ СЛОЕВ И ПОКРЫТИЙ**





Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
Физический факультет  
кафедра оптики и биомедицинской физики

Институт проблем точной механики и управления РАН

**В.П. Рябухо**

**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
ТОЛЩИНЫ ПРОЗРАЧНЫХ СЛОЕВ И ПОКРЫТИЙ**

Учебно-методическое руководство  
к выполнению лабораторной работы

Саратов 2008

**СОДЕРЖАНИЕ**

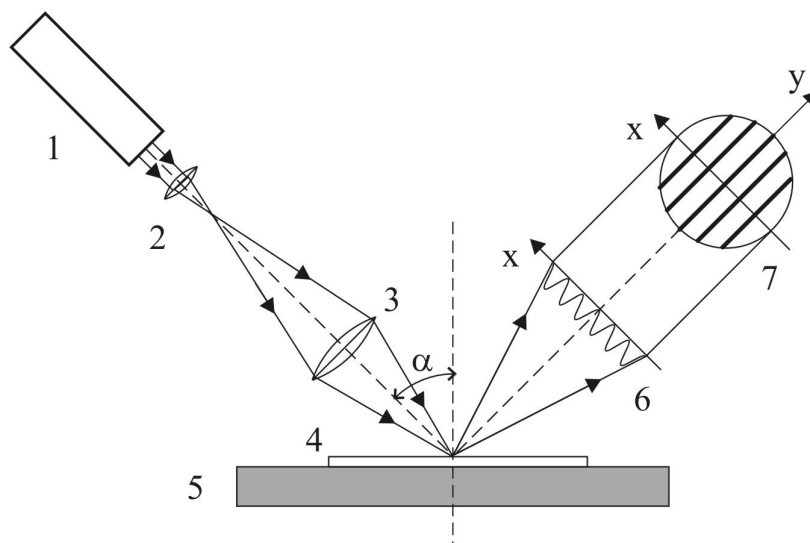
|   |    |
|---|----|
| ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....  | 3  |
| Расчет интерференционной картины. Период интерференционных полос.....   | 3  |
| Учет поляризации зондирующего облучения .....   | 6  |
| Многолучевая интерференция .....  | 8  |
| Спекл-модуляция.....  | 9  |
| ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....   | 13 |
| Экспериментальная установка .....   | 13 |
| Порядок выполнения работы .....   | 14 |
| Лабораторная методика поверки лазерного измерителя толщины ЛИИТ-2,<br>предназначенного для измерения толщины прозрачных покрытий..... | 16 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....  | 18 |

Изучаемый в данной работе способ измерения толщины прозрачного покрытия основан на явлении интерференции лазерного излучения, отраженного от верхней и нижней поверхностей исследуемого слоя. Источником измерительной информации служит интерференционная картина в виде прямолинейных полос, период которых определяется толщиной контролируемого слоя, его показателем преломления, длиной волны и углом падения зондирующего излучения на поверхность слоя.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Расчет интерференционной картины. Период интерференционных полос

Пусть лазерный пучок достаточно большой угловой апертуры фокусируется на поверхность металлической подложки, на которую нанесен тонкий слой прозрачного покрытия (рис.1). В результате отражения от верхней и нижней границ покрытия каждый луч света приобретает свой фазовый сдвиг  $\Delta\varphi(\alpha)$ . В результате в отраженном излучении образуется интерференционная картина полос равного наклона, которую можно наблюдать в некоторой плоскости  $XU$ , расположенной перпендикулярно оптической оси отраженного пучка на расстоянии  $z$  от поверхности.



**Рис.1.** Принципиальная схема измерения толщины прозрачного покрытия:  
1 - лазер; 2 - расширяющий микробъектив; 3 - фокусирующий микробъектив; 4 - плоскопараллельный слой; 5 - подложка; 6 - распределение интенсивности света в плоскости наблюдения;  
7 - схематический вид наблюдаемой интерференционной картины.

Рассмотрим луч света, падающий на верхнюю поверхность слоя под некоторым углом  $\alpha$  (рис.2.). Свет отражается от верхней и нижней границ слоя, при этом между соответствующими отраженными лучами 1 и 2 возникает некоторая разность фаз  $\Delta\varphi$ . Тогда распределение интенсивности света в интерференционной картине (или, короче, на интерферограмме) в зависимости от угла падения (или равного ему угла отражения)  $\alpha$  можно записать в виде

$$I(\alpha) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi(\alpha), \quad (1)$$

где  $I_1(\alpha)$  и  $I_2(\alpha)$  – интенсивности световых волн, отраженных от верхней и нижней поверхностей слоя;  $\Delta\varphi(\alpha)$  – разность фаз между этими волнами. Найдем величину  $\Delta\varphi(\alpha)$ , используя рис.2. Рассматривая соответствующие треугольники на этом рисунке, можно получить следующие выражения

$$2AB = \frac{2h}{\cos\beta} = 2h \frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}},$$

$$2AC = 2\sqrt{\frac{h^2}{\cos^2 \beta} - h^2} = 2h\sqrt{\frac{\sin^2 \alpha}{n^2 - \sin^2 \alpha}},$$

$$AD = 2AC \cos(90^\circ - \alpha) = 2AC \sin \alpha = 2h \frac{\sin^2 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}.$$

Поскольку разность фаз  $\Delta\varphi = 2\pi\Delta/\lambda$ , где  $\Delta$  – разность хода волн, то

$$\Delta\varphi(\alpha) = \frac{2\pi}{\lambda}(n2AB - AD) = \frac{4\pi h}{\lambda}\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}, \quad (2)$$

где  $h$  – толщина пленки;  $n$  – ее показатель преломления;  $\lambda$  – длина волны света. При выводе формулы (2) также был использован закон преломления  $\alpha = n \sin\beta$ , где  $\beta$  – угол преломления. Графическое распределение результирующей интенсивности в интерференционной картине без учета зависимости амплитуд отраженных волн от угла  $\alpha$  представлено на рис.3. На графике видна характерная особенность рассматриваемых интерферограмм, состоящая в их квазипериодичности: максимумы и минимумы интенсивности (интерференционные полосы) разделены угловыми интервалами  $\Lambda_\alpha$ , монотонно возрастающими с приближением  $\alpha$  к 0 и к  $90^\circ$

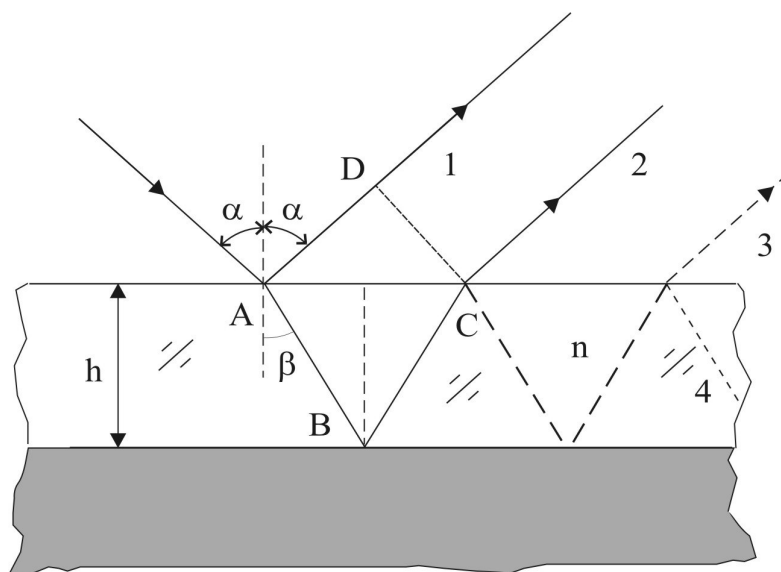


Рис.2. Лучевая схема отражения света от прозрачного покрытия.

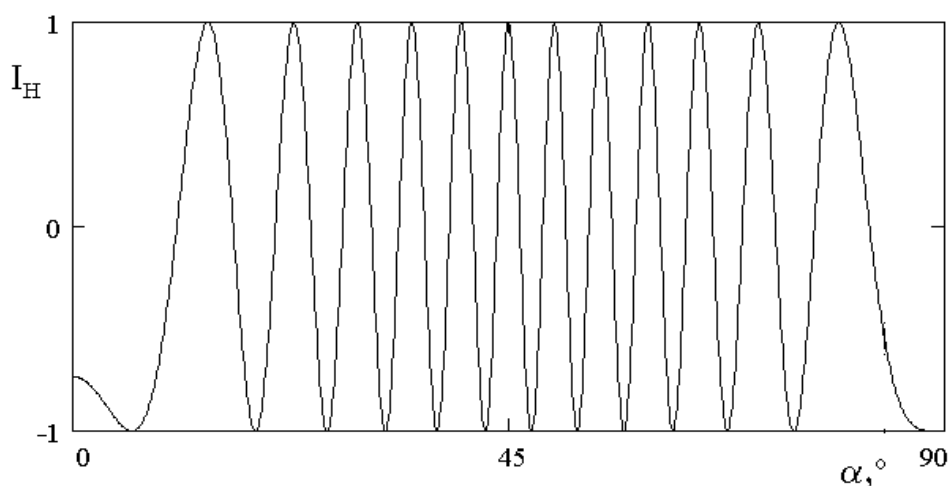


Рис.3. Зависимость нормированной интерференционной компоненты интенсивности отраженного поля  $I_H(\alpha) = [I(\alpha) - I_1(\alpha) - I_2(\alpha)] / [2(I_1(\alpha)I_2(\alpha))^{1/2}]$  от угла падения  $\alpha$  лазерного излучения ( $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ ) на поверхность прозрачного слоя толщины  $h = 10 \text{ мкм}$  с показателем преломления  $n = 1,5$ .

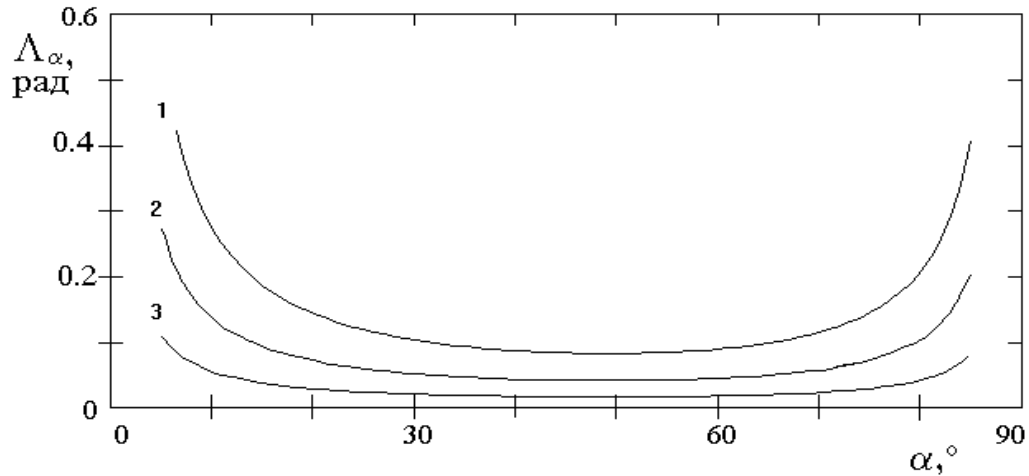
Угловой период интерференционных полос  $\Lambda_\alpha$  можно найти как величину, обратную значению “мгновенной” пространственной частоты  $\nu(\alpha)$ , формально определяемой

как  $\nu(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Delta\varphi(\alpha)}{d\alpha}$ . Тогда с учетом соотношения (2) для углового периода полос по-

лучаем

$$\Lambda_{\alpha} = \frac{1}{v(\alpha)} = \frac{\lambda \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{h \sin 2\alpha}. \quad (3)$$

Эта зависимость проиллюстрирована соответствующими графиками рис. 4.



**Рис. 4.** Зависимость углового периода интерференционных полос  $\Lambda_{\alpha}$  от угла падения  $\alpha$  лазерного излучения ( $\lambda = 0,63$  мкм) на поверхность прозрачного слоя с показателем преломления  $n = 1,5$  и толщиной  $h$ : 1 –  $h = 10$  мкм; 2 –  $h = 20$  мкм; 3 –  $h = 30$  мкм.

Поскольку интерференционная картина наблюдается на некотором расстоянии  $z$  от поверхности слоя, то пространственный период полос можно определить как  $\Lambda = z\Lambda_{\alpha}$ . Таким образом, соотношение (3) можно записать в виде

$$h = \frac{\lambda z \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\Lambda \sin 2\alpha}. \quad (4)$$

Формула (4) является основной для расчета  $h$  по измеренным величинам  $\alpha$ ,  $\Lambda$ ,  $z$  при известных  $n$  и  $\lambda$ .

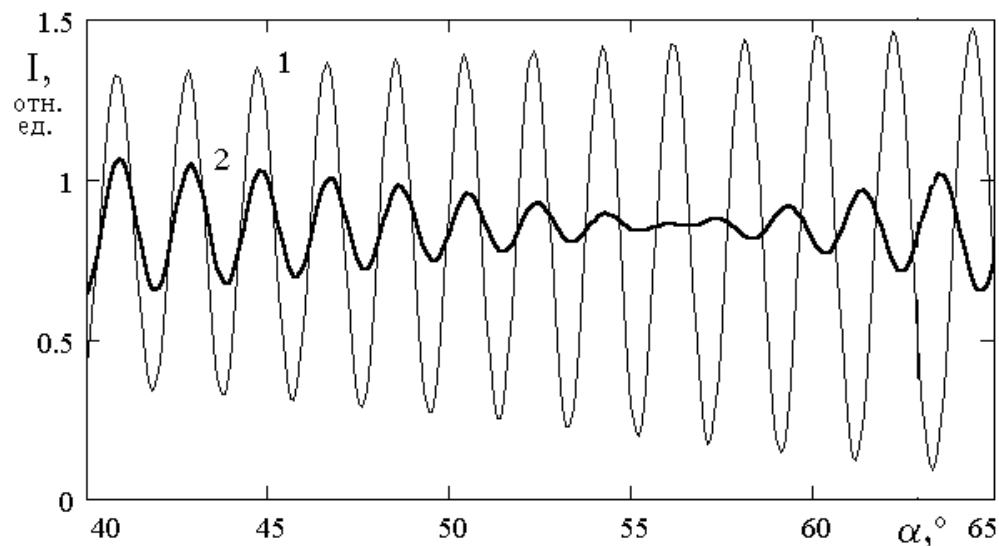
Далее остановимся на анализе факторов, влияющих на вид результирующего распределения интенсивности и имеющих как принципиальную, так и практическую значимость для рассматриваемой методики измерений.

### Учет поляризации зондирующего облучения

Интенсивности интерферирующих волн  $I_1$ ,  $I_2$ , определяются формулами Френеля и зависят от угла падения  $\alpha$ ; а также от состояния поляризации зондирующего излучения



[1-3]. Интерферограммы для облучающей волны в состоянии так называемой  $p$  – и  $s$  – поляризации (линейная поляризация с вектором напряженности электрического поля, соответственно, вдоль и ортогонально плоскости падения волны) приведены на рис.5.



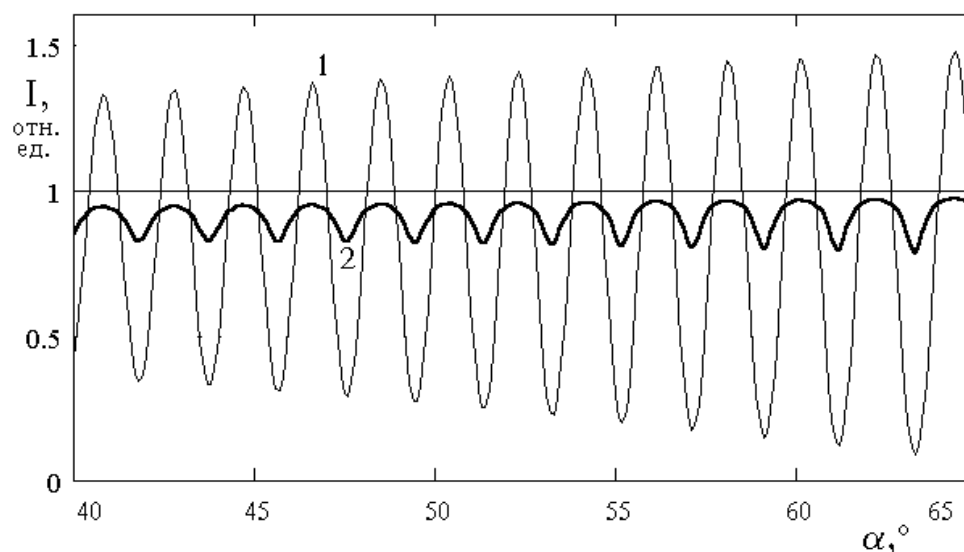
**Рис.5.** Двухлучевые интерферограммы для различных состояний поляризации зондирующего излучения: 1 –  $s$  – поляризация, 2 –  $p$  – поляризация:  $\lambda = 0,63$  мкм, толщина слоя  $h = 25$  мкм, показатель преломления  $n = 1,5$ , эффективный показатель преломления подложки  $n_1 = 0,12 + i1,83$ .

Из рисунка видно, что величина модуляции интенсивности (контраст полос) интерференционной картины оказывается больше для случая  $s$  – поляризации. Для  $p$  – поляризации в области углов падения  $\alpha$  близ характерного значения  $\alpha_0 \approx 57^\circ$  можно отметить практически полное исчезновение полос (контраст полос равен нулю), объясняющееся малым значением интенсивности отраженного от верхней границы слоя луча 1 (по закону Брюстера полное исчезновение отраженного луча 1 наблюдается при угле  $\alpha_0 = \arctg(n) \approx 57^\circ$ , где  $n = 1,5$  – показатель преломления слоя). В области углов падения  $\alpha > \alpha_0$  с увеличением  $\alpha$  заметен взаимный сдвиг экстремумов  $p$  – и  $s$  – интерферограмм на половину ширины интерференционной полосы, что объясняется сменой знака коэффициента отражения первого луча при переходе через точку  $\alpha = \alpha_0$ , что эквивалентно изменению фазы волны на  $\pi$  рад.

Итак, вследствие большей величины контраста полос интерференционной картины, для рассматриваемой методики измерений следует использовать  $s$  – поляризацию зондирующего излучения.

## Многолучевая интерференция

Рассмотренная до сих пор схема формирования результирующего поля как следствия интерференции двух лучей (1 и 2 рис.2), строго говоря, является неполной и отвечает приближению так называемой двухлучевой интерференции. При высокой когерентности освещающего поля, характерной для лазерных источников излучения, следует также рассматривать луч 3, дважды отраженный от подложки, луч 4, трижды отраженный от подложки и т.д. (пунктирные линии на рис.2). На рис.6 приведены интерферограммы, соответствующие двухлучевому приближению (формула (1)) и многолучевой интерференции (формула (5.18) на с.47 работы [3]). Из рисунка видно, что учет многолучевой интерференции приводит, во первых, к уменьшению контраста полос интерференционной картины и, во вторых, к относительному сужению темных полос сравнительно со светлыми полосами.



**Рис.6.** Влияние на интерферограмму эффекта многократного отражения лучей: 1 – двухлучевое приближение (формула (1)); 2 – учет многолучевой интерференции (формула (5,18) на с.47 работы [3]). Случай  $s$  – поляризации зондирующего излучения; остальные параметры те же, что и на рис. 5.

Отметим принципиальную ограниченность двухлучевого приближения, в общем случае не согласующегося с законом сохранения энергии. Действительно, на двухлучевых интерферограммах рис.5 и 6 (нормированных на интенсивность облучающей волны) есть

области, для которых  $I(\alpha) > 1$ . На многолучевой интерферограмме рис.6  $I(\alpha) < 1$  для любых  $\alpha$ . При этом, если учесть интенсивность преломленной в подложку волны  $I_T(\alpha)$ , то согласно [3] приходим к строго выполняющемуся равенству  $I(\alpha) + I_T(\alpha) = 1$ . Следовательно, в ряде случаев, в частности, для прецизионного измерения контраста интерферограмм тонких покрытий, учет многолучевого характера интерференции может оказаться обязательным.

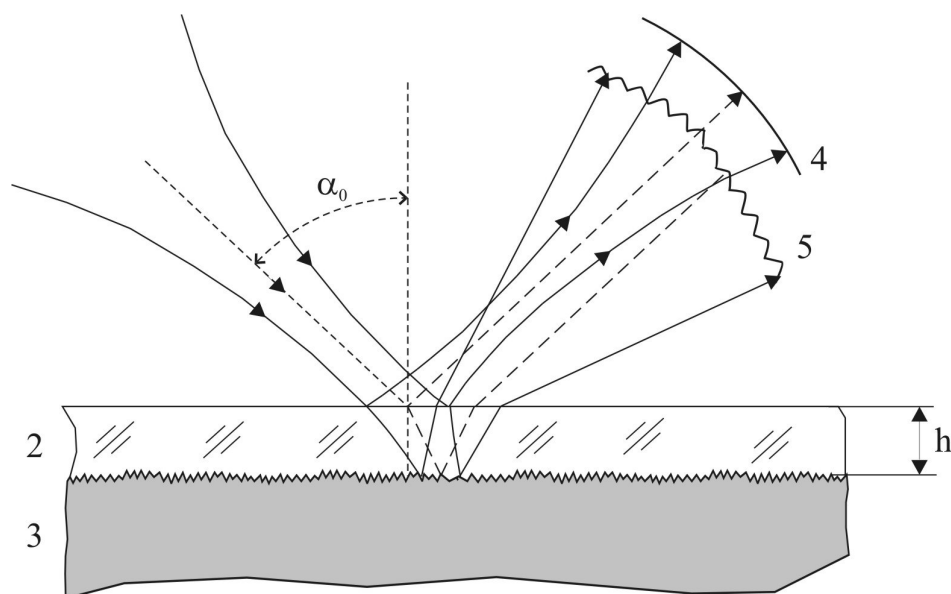
### Спекл-модуляция

Если поверхность металлической подложки имеет микронеровности – шероховатость, то это приводит к диффузному рассеянию света. При освещении такой поверхности когерентным (лазерным) пучком света в отраженном излучении формируется так называемая спекл-структура – картина хаотически расположенных светлых и темных пятен [4,5]. Такие пятна обнаруживаются во всем объеме диффузно рассеянного поля. Возникновение спекл-структуры (от английского слова speckle – крапинка, пятнышко) обусловлено высокой пространственной и временной когерентностью лазерного излучения и интерференцией волн, рассеянных различными участками шероховатой поверхности. По отношению к световому полю, в котором формируется спекл-структура (спеклы), принято использовать термин "спекл-поля". Комплексная амплитуда спекл-поля является случайной функцией координат. Это означает, что в отдельных пространственных элементах поля - спеклах, амплитуда и фаза принимают случайные значения. Поэтому при интерференции спекл-поля со световой волной, имеющей гладкий волновой фронт, помимо детерминированной разности фаз  $\Delta\varphi(\alpha)$  необходимо рассматривать случайную составляющую разности фаз  $\delta\varphi(\alpha)$ , обусловленную отражением от микронеоднородностей металлической подложки.

Вид результирующего интерференционного поля будет зависеть от соотношения между пространственными распределениями случайной и детерминированной составляющими разности фаз интерферирующих волн. Если  $\Delta\varphi(\alpha)$  – быстро меняющаяся функция, такая, что в пределах отдельного спекла она меняется более чем на  $2\pi$  радиан, то в интерференционном поле, в пределах отдельных спеклов формируется квазирегулярное распределение интенсивности в виде косинусоидальных полос. Наблюдается интерференционная картина, модулированная случайной амплитудно-фазовой структурой –

спекл-структурой. Поскольку разность фаз  $\delta\varphi(\alpha)$  принимает случайные значения в различных спеклах, то интерференционные полосы испытывают сдвиг на случайную долю их периода при переходе от одного спекла к соседнему и ветвятся в областях локализации точек с нулевой амплитудой.

Оптическая схема отражения сфокусированного Гауссова лазерного пучка от прозрачного слоя с одной шероховатой поверхностью изображена на рис.7. В отраженном поле интерферируют лазерный пучок с гладким волновым фронтом 5 и спекл-модулированный пучок света 6, образующийся при отражении от шероховатой поверхности подложки 3.



**Рис.7.** Интерференция гладкого и спекл-модулированного полей при отражении сфокусированного лазерного пучка от оптически неоднородного прозрачного слоя:  
1 - освещающий пучок; 2 - прозрачный слой с одной шероховатой поверхностью;  
3 - подложка; 4 - пучок света с гладким волновым фронтом; 5 - спекл-модулированный пучок.

Поперечные размеры спеклов в отраженном излучении обратно пропорциональны диаметру освещенного пятна на рассеивающей поверхности [4]. Для наблюдения достаточно регулярных полос необходимо, чтобы их период  $\Lambda$  был меньше размеров спеклов. Поэтому на поверхности подложки размер пятна освещающего лазерного пучка должен быть достаточно мал.

Поперечный угловой размер спеклов  $\varepsilon_{\perp}$  в плоскости падения лазерного пучка можно определить по формуле

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\lambda}{D}, \quad (5)$$

где  $D = 2w_0 / \cos \alpha_0$  – размер освещенной области на металлической поверхности подложки в плоскости падения лазерного пучка;  $2w_0$  – диаметр сфокусированного лазерного пучка; коэффициент  $\cos \alpha_0$  учитывает наклонное падение лазерного пучка под углом  $\alpha_0$ .

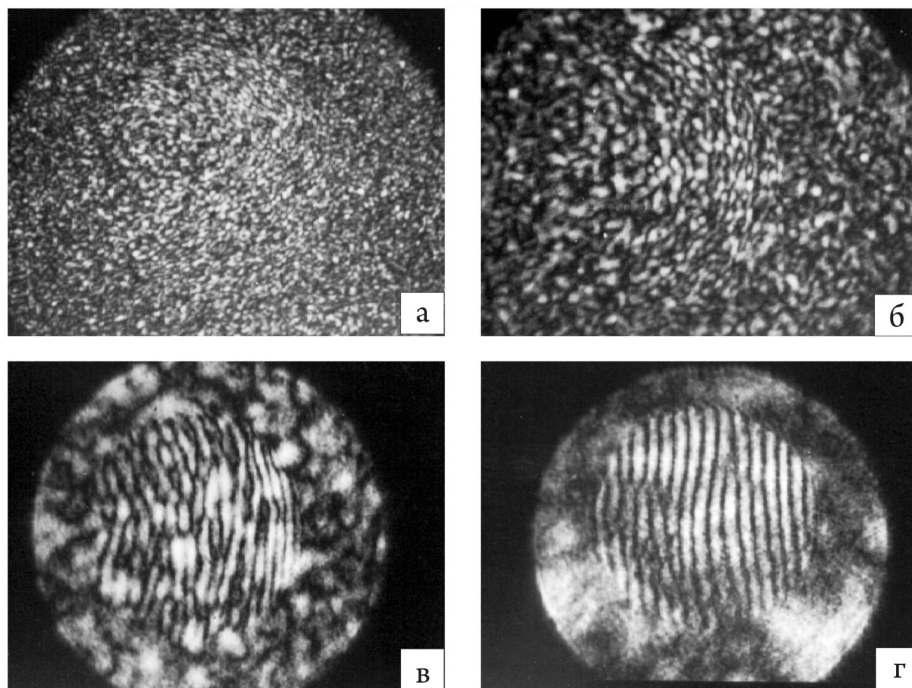
Условие хорошего наблюдения интерференционных полос можно формально записать в виде

$$\varepsilon_{\perp} > \Lambda_{\alpha}. \quad (6)$$

Появление интерференционных полос в пределах отдельных спеклов можно объяснить, проследив аналогю с интерференционной схемой Юнга. Действительно, при отражении от прозрачного слоя сфокусированного лазерного пучка формируются два вторичных источника света. Один – действительный, получающийся при отражении от верхней гладкой поверхности слоя, а второй – мнимый, формирующийся в отраженном от подложки лазерном пучке. В результате интерференции света от этих источников образуются интерференционные полосы с угловым периодом  $\Lambda_{\alpha} = \lambda / d$ , где  $d$  – поперечное расстояние между источниками. Если  $\Lambda_{\alpha} < \varepsilon_{\perp}$ , то полосы видны в отдельных спеклах. Нетрудно видеть, что для этого необходимо, чтобы расстояние  $d$  между источниками превышало диаметр  $D$  пятна на шероховатой поверхности подложки.

На рис.8 представлены фотографии, которые прослеживают развитие регулярной интерференционной картины на фоне спекл-структуры при совмещении рассеивающей поверхности подложки с перетяжкой освещающего сфокусированного лазерного пучка. На рис.8,а интерференционная картина зашумлена спекл-модуляцией вследствие малости поперечных размеров спеклов (размеры освещающего пятна на подложке достаточно большие). По мере уменьшения диаметра перетяжки лазерного пучка, сфокусированного

на металлическую подложку, размеры спеклов увеличиваются (формула (5)), что приводит к постепенному появлению интерференционных полос в пределах отдельных спеклов (рис.8,б,в). На рис.8,г приведена почти регулярная интерференционная картина, полосы которой описывают незначительный изгиб при переходе от одного спекла к соседнему и ветвятся в точках с нулевой амплитудой спекл-поля. Такая картина полос вполне приемлема для проведения измерения толщины покрытия.



**Рис.8.** Развитие картины регулярных интерференционных полос на фоне лазерной спекл-структуры по мере совмещения перетяжки лазерного пучка с шероховатой поверхностью подложки прозрачного слоя.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

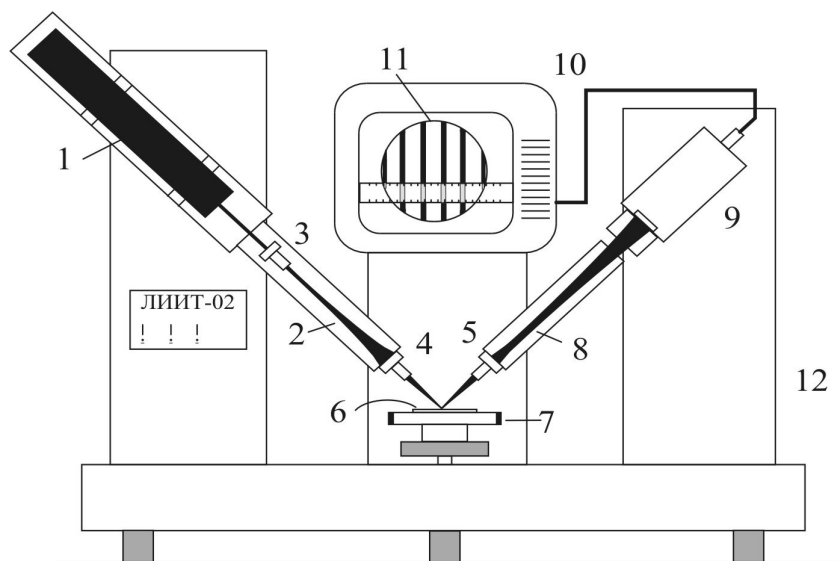
**Задание 1.** Определить толщину тонкой стеклянной пластины с известным показателем преломления  $n$ .

**Задание 2.** Определить толщину прозрачного лакового покрытия с известным показателем преломления  $n$ , нанесенного на металлическую подложку с шероховатой поверхностью.

### Экспериментальная установка

Принципиальная схема установки – лазерного интерференционного измерителя толщины прозрачных покрытий *ЛИИТ – 2*, изображена на рис.9.

Принцип действия измерителя основан на явлении интерференции лазерного излучения, отраженного от верхней и нижней поверхностей прозрачного слоя вещества. Толщина слоя определяется путем измерения периода интерференционных полос при известных остальных параметрах оптической схемы и показателе преломления слоя.



**Рис.9.** Схема лазерного интерференционного измерителя толщины прозрачных слоев и покрытий *ЛИИТ – 2*:

1 - лазер; 2, 8 - лазерный пучок; 3, 4, 5 - микрообъективы; 6 – контролируемый объект; 7 - юстировочный предметный столик; 9 - ТВ камера; 10 - монитор; 11 - картина интерференционных полос; 12 - миллиметровая линейка; 13 - основание установки.

Формирование острогофокусированного освещающего лазерного пучка осуществляется с помощью микрообъективов 3 и 4. Точная настройка положения перетяжки лазерного пучка на поверхность образца осуществляется вертикальным перемещением предметного столика 7. Угол падения лазерного пучка на исследуемую поверхность равен  $45^\circ$ . В этой области углов период интерференционных полос, как показано в теоретической части, весьма мало зависит от угла падения излучения, что повышает точность и достоверность измерений, выполняемых на установке. Регистрирующий приемный оптоэлектронный узел состоит из микрообъектива 5, миниатюрной видеокамеры 9 и телевизионного монитора 10. Отраженный от контролируемой пластины или прозрачного слоя лазерный пучок переотображается на входную мишень видеокамеры микрообъективом 5. Положение этого микрообъектива относительно лазерного пятна на поверхности слоя определяет масштаб изображения интерференционных полос на экране монитора и диапазон измеряемых толщин покрытий. Настройка приемной части установки осуществляется перемещением микрообъектива 5 с помощью специального регулировочного винта (на рис.9 не показан). С помощью миллиметровой шкалы, установленной на экране монитора измеряется период полос. Процедура измерения толщины прозрачных покрытий на данной установке предусматривает предварительную градуировку измерительного сигнала, с помощью которой устанавливается зависимость между периодом интерференционных полос  $\Lambda$ , наблюдаемых на экране монитора и толщиной слоя  $h$  с известным показателем преломления  $n$ . В соответствии с формулами (3) и (4) градуировочная зависимость имеет вид

$$h = \beta / \Lambda$$

где  $\beta$  – градуировочный коэффициент, значение которого зависит от угла падения лазерного пучка  $\alpha_0$ , показателя преломления  $n$  контролируемого слоя (см. формулы (3) и (4)), а также от коэффициента увеличения периода полос в приемной оптоэлектронной части установки. Для определения значения градуировочного коэффициента  $\beta$  используются эталонные образцы стеклянных пластин и лаковых покрытий с известными толщинами и показателями преломления.

### Порядок выполнения работы

1. Контролируемое изделие поместить на поверхность предметного столика 7 (рис.9) и под сфокусированное лазерное пятно подвести контролируемый участок стек-



лянной пластины или покрытия. Регулировочным винтом столика добиться острой фокусировки лазерного пучка на стеклянной пластине или поверхности подложки лакового покрытия. При этом на экране телевизионного монитора 10 должна появиться достаточно четкая интерференционная картина в виде системы сравнительно прямолинейных вертикальных полос.

2. Определить период интерференционных полос, появившихся на экране монитора, при помощи миллиметровой линейки. Для этого необходимо:

- 1) выбрать на экране  $m$  отчетливых полос;
- 2) по шкале линейки определить расстояние  $L$  (в мм) между ними;
- 3) рассчитать период  $\Lambda$  по формуле  $\Lambda = L/(m - 1)$ .

3. Процедуру получения четких интерференционных полос и определения их периода по п.п.1 и 2 выполнить  $N$  – раз и определить среднее значение периода полос  $\bar{\Lambda}$ .

4. Используя полученное таким образом значение  $\bar{\Lambda}$  и градуировочного коэффициента  $\beta$ , по формуле (7) вычислить толщину  $h$  стеклянной пластины или контролируемого участка покрытия.

5. Установить источники и оценить составляющие погрешности измерения покрытий  $h$ .

## Лабораторная методика поверки лазерного измерителя толщины ЛИИТ-2, предназначенного для измерения толщины прозрачных покрытий

### 1. Операции и средства поверки

При проведении поверки лазерного измерителя толщины *ЛИИТ – 2* должны быть выполнены следующие операции:

- 1) Измерение толщины лаковых покрытий на контрольных образцах с помощью индикатора часового типа.
- 2) Градуировка измерителя по контрольным образцам.
- 3) Определение погрешности измерения толщины лаковых покрытий с помощью лазерного измерителя толщины *ЛИИТ – 2*.

Должны применяться следующие средства поверки:

- 1) Контрольные образцы с лаковыми покрытиями.
- 2) Индикатор часового типа с ценой деления  $0,001$  мм и соответствующая оснастка для измерения с помощью индикатора толщины покрытия на образцах.

### 2. Условия поверки и подготовка к ней

Поверка должна проводиться в условиях, нормальных для функционирования лазера *ЛГН – 207 А* и видеоконтрольного устройства, входящих в состав измерителя, а также при температуре и влажности окружающего воздуха, при которых проводятся производственные и лабораторные измерения толщины прозрачных покрытий на изделиях контроля.

Перед проведением проверки должны быть выполнены следующие подготовительные работы:

1. Включение лазера и ВКУ.
2. Регулировка изображения на экране ВКУ в соответствии с инструкцией по его эксплуатации.
3. Проверка равномерности распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, выходящего из фокусирующего микрообъектива. При неравномерности распределения произвести регулировку лазера.

### 3. Проведение поверки

3.1 Измерение толщины прозрачных покрытий на контрольных образцах с помощью индикатора часового типа

В соответствии с инструкцией по эксплуатации индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм произвести измерение толщины лакового покрытия на контрольных образцах, где лаковое покрытие нанесено только на часть поверхности, образуя тем самым ступеньку с непокрытой частью поверхности образца. Толщину покрытия  $h_0$  определяют как разность средних значений отсчетов по шкале индикатора при многократных касаниях штока индикатора поверхности лакового покрытия и поверхности образца без лакового покрытия. Для уменьшения систематической ошибки измерений необходимо устанавливать минимально возможное расстояние между точками касания на непокрытой поверхности образца и на поверхности лакового покрытия. Определить погрешность измерения  $\Delta h_0$ .

3.2. Градуировка измерителя по контрольным образцам

В соответствии с этой операцией произвести измерение периода интерференционных полос, наблюдаемых на экране ВКУ при использовании образцов с известной толщиной покрытия, измеренной в соответствии с п.3.1. Определить калибровочный коэффициент  $k$  по формуле

$$k = h_0 \Lambda_0$$

где  $h_0$  – толщина лакового покрытия образца (в мм);  $\Lambda_0$  – период интерференционных полос на экране ВКУ (в мм).

Установить на предметный столик контрольный образец с измеренной по п.3.1. толщиной лакового покрытия таким образом, чтобы лазерный пучок фокусировался на ту часть поверхности лакового покрытия, на которой определялась толщина с помощью индикатора часового типа. Получить на экране ВКУ отчетливую картину интерференционных полос. Определить период этих полос при помощи миллиметровой шкалы следующим образом:

- выбрать на экране  $m_0$  отчетливых полос;
- по шкале определить расстояние  $L_0$  ( в мм) между ними;
- рассчитать период  $\Lambda_0$  по формуле

$$\Lambda_0 = \frac{L_0}{m_0 - 1}$$

Произвести перефокусировку лазерного пучка на контролируемую поверхность  $N$  – раз с помощью регулировочного винта столика с вертикальным ходом. Определить погрешность измерения величины периода полос  $\Delta\Lambda_0$ .

Произвести расчет калибровочного коэффициента  $k$  в трех контрольных образцах со значением толщин лаковых покрытий, указанных в п.3.1.

Определить относительную погрешность измерения толщины лакового покрытия  $\varepsilon_h$  по формуле

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_u}{h_0} \cdot 100\%$$

где  $h_0$  – значение толщины лакового покрытия контрольного образца, измеренное с помощью индикатора часового типа.

3.3. Действия по п.3.2. произвести для всех трех контрольных образцов с значениями толщин лаковых покрытий, указанных в п.3.1.

Лазерный измеритель толщины *ЛИИТ – 2* считать выдержавшим испытания, если значение относительной погрешности не превышает  $\pm 15\%$  для нижней границы диапазона измерений;  $\pm 5\%$  для толщины лаковых покрытий 50 – 100 мкм.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ./Под ред. Г. П. Мотулевич. - М.: Наука, 1970, 855 с.
2. Ландсберг Г. С. Оптика. - М.: Наука, 1976, 928 с.
3. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. -М.: Изд.-во АН СССР, 1957, 502 с.
4. Франсон М. Оптика спеклов. Пер. с англ. - М.: Мир, 1980, 171с.
5. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. - М.: Мир, 1986, 328 с.
6. Рябухо В.П., Ульянов С.С., Миненкова И.Ф. Формирование квазирегулярной интерференционной картины в спекл-модулированном лазерном пучке, отраженном от прозрачного оптически неоднородного слоя. Журнал технической физики, 2002, Т.72, № 4, С.72-75.