

УДК 535.512 + 535.854

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗЫ РЫТОВА–ВЛАДИМИРСКОГО В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ЛИННИКА

В. А. Андреев, К. В. Индукаев¹

Для интерферометра Линника с фокусирующей линзой построено распределение фазы Рытова–Владимирского. Эта фаза возникает из-за того, что наличие фокусирующей линзы на входе в интерферометр и плоских зеркал внутри него приводит к тому, что траектории большинства лучей внутри интерферометра становятся неплоскими. Вычисления проводятся в рамках геометрической оптики. Показано, что добавление дополнительных фокусирующих линз, расположенных перед опорным и объектным зеркалами, не приводит к изменению фазы Рытова–Владимирского.

В настоящее время в физике получили большое распространение так называемые топологические или геометрические фазы, называемые также фазами Берри [1 – 7]. В большинстве работ, посвященных этим фазам, рассматриваются квантовые эффекты, однако существуют и их классические аналоги, также вызывающие большой интерес. В первую очередь, здесь следует назвать фазы Рытова–Владимирского (РВ) φ_{RV} [8, 9] и Панчарантнама φ_P [10], возникающие в поляризационной оптике. Фаза Панчарантнама φ_P возникает в том случае, когда поляризация луча, двигающегося по оптической системе, меняется циклическим образом, так что соответствующая ей точка на сфере Пуанкаре описывает замкнутый контур. В этом случае начальное и конечное состояния света будут отличаться на фазу φ_P , величина которой определяется значением телесного угла, опирающегося на контур, который описала точка на сфере Пуанкаре.

¹ЗАО "Проимпэкс КомТех".

Фаза РВ имеет чисто геометрическую природу.

Для ее описания, аналогично сфере Пуанкаре, вводят сферу направлений и откладывают на ней траекторию луча, проходящего через оптическую систему [11]. В случае, когда направления входящего и выходящего лучей совпадают, эта траектория имеет вид замкнутого контура. Изменение поляризации луча определяется как величиной телесного угла, опирающегося на такой контур, так и его исходной поляризацией.

Отметим принципиальную разницу между фазами Панчарантнама и РВ. Фаза Панчарантнама не меняет тип поляризации и не зависит от этого типа. Фаза РВ может изменить тип поляризации и ее величина зависит от исходного типа поляризации. А именно, если исходный луч света был левациркулярно поляризованным, то после прохождения оптической системы он остается левациркулярно поляризованным, но его фаза меняется на величину

$$\varphi_{RV}^L = \Omega, \quad (1)$$

где Ω – телесный угол, который опирается на контур на сфере направлений.

Если же луч является правациркулярно поляризованным, то его поляризация также не меняется, но фаза меняется на величину

$$\varphi_{RV}^R = -\Omega. \quad (2)$$

Изменение поляризации произвольного луча можно найти, раскладывая его по левациркулярно и правациркулярно поляризованным лучам и используя формулы (1), (2).

Таким образом, фаза РВ возникает из-за того, что луч в оптической системе движется по неплоской траектории. Имеется ряд работ, в которых проводился расчет этой фазы для плоских пучков [12 – 15]. В работе [16] рассматривались расходящиеся пучки света, но такой характер их движения возникал за счет геометрии изучаемого объекта, а не из-за наличия в оптической системе специальных элементов. Но такие элементы, а именно, линзы и неплоские зеркала, входят в состав многих оптических приборов. Тем не менее, нам не известны работы, в которых учитывалась бы фаза РВ, вносимая подобными элементами. Однако их учет может оказаться необходимым в тех случаях, когда полезная информация содержится именно в фазе луча, прошедшего через оптическую систему. Величина фазы может определяться различными причинами и необходимо иметь возможность разделять вклады, обусловленные ими.

Данная работа посвящена расчету фазы РВ, имеющейся в интерферометре Линника. Этот прибор часто используется в качестве профилометра [17], поэтому необходимо

уметь отделять вклад в фазу объектного луча, возникающий за счет длины пути, пройденного этим лучом, от вклада, связанного с неплоскостностью его траектории, т.е. от фазы РВ.

Принципиальная схема интерферометра изображена на рис. 1.

Она включает в себя линзу L_0 , полупрозрачное зеркало BS, два зеркала M_1 и M_2 , а также две линзы L_1 и L_2 , расположенные перед зеркалами M_1 и M_2 . Эти линзы часто называются микрообъективами. Если бы линзы L_1 и L_2 отсутствовали, то это был бы обычный интерферометр Майкельсона. Именно для такого интерферометра мы и проведем первоначальный расчет распределения фазы РВ, а затем покажем, что добавление в схему микрообъективов ничего не меняет.

Прибор содержит также источник излучения I и детектор D , на котором происходит смешивание пучков света из разных каналов.

Вектор \mathbf{n} , задающий направление луча света, мы будем описывать с помощью сферической системы координат, т.е. с помощью углов θ, φ . Угол θ отсчитывается от положительного направления оси Z , а угол φ есть угол между проекцией вектора \mathbf{n} на плоскость XY и положительным направлением оси X в направлении против часовой стрелки.

Ось Z направлена вдоль оптической оси линзы L_0 слева направо, ось X перпендикулярна плоскости зеркала M_2 и направлена вверх, а ось Y лежит в плоскости зеркала M_2 и выходит из плоскости рис. 1.

На линзу L_0 от источника I поступает пучок света, все лучи которого параллельны оси Z . Линза L_0 преобразует параллельный пучок в сходящийся и направляет его на полупрозрачное зеркало BS. На этом зеркале исходный пучок делится пополам, одна его половина проходит через полупрозрачное зеркало BS, а вторая отражается от него. Далее первый из образовавшихся пучков падает на зеркало M_1 , отражается от него, возвращается к полупрозрачному зеркалу BS и, отразившись от него, попадает на детектор D . Второй пучок попадает на зеркало M_2 , отражается от него, проходит через полупрозрачное зеркало BS и также попадает на детектор D , где смешивается с первым пучком.

Оптические элементы интерферометра установлены таким образом, что лучи первого и второго пучков, попадающие в одну и ту же точку плоскости детектора D , имеют одинаковое направление. При этом не имеет значения, расположены фокусы линзы L_0 перед зеркалами M_1, M_2 или же за ними, важно только, чтобы они оба были по одну сторону этих зеркал.

Опишем теперь движение пучков света в интерферометре на языке векторов их направлений.

1. Первый пучок света соответствует опорным лучам. Вектора его направлений образуют следующую последовательность:

$$\begin{aligned} (0, 0, 1)_1^I &\rightarrow (\sin \theta \sin \varphi, \sin \theta \cos \varphi, \cos \theta)_1^{L_0} \rightarrow \\ &(-\cos \theta, \sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi)_1^{M_1} \rightarrow (\cos \theta, \sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi)_1^{BS}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь нижний индекс указывает на номер канала, а верхний показывает, после прохождения какого из оптических элементов сформировался пучок с таким вектором направления.

2. Вектора направлений второго пучка, соответствующие объектным лучам, образуют последовательность

$$\begin{aligned} (0, 0, 1)_2^I &\rightarrow (\sin \theta \sin \varphi, \sin \theta \cos \varphi, \cos \theta)_2^{L_0} \rightarrow \\ &(\sin \theta \sin \varphi, \sin \theta \cos \varphi, -\cos \theta)_2^{BS} \rightarrow (\cos \theta, \sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi)_2^{M_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Отложим вектора (3) и (4) на сфере направлений и соединим соседние точки в этих последовательностях дугами больших кругов. Возникающая при этом фигура изображена на рис. 2. Она соответствует случаю, когда луч света после прохождения линзы L_0 характеризуется вектором, имеющим положительные проекции на оси OX и OY . Для других лучей эти проекции их векторов могут иметь и другие знаки; отметим также, что проекции всех векторов направлений лучей, прошедших линзу L_0 , положительны.

Опишем теперь все точки на рис. 2. Точка I с координатами

$$(0, 0, 1) \quad (5)$$

соответствует лучу, подошедшему слева к линзе L_0 и движущемуся вдоль оси OZ . Пройдя линзу L_0 , луч преломляется, вектор его направления приобретает координаты

$$(\sin \theta \sin \varphi, \sin \theta \cos \varphi, \cos \theta) \quad (6)$$

и изображается на сфере направлений точкой A . Точки I и A соединяются дугой большого круга. Далее луч A попадает на полупрозрачное зеркало BS , где делится на два луча: опорный и объектный. Опорный луч проходит через зеркало BS , не меняя своего направления, падает на зеркало M_1 , отражается от него и приобретает направление

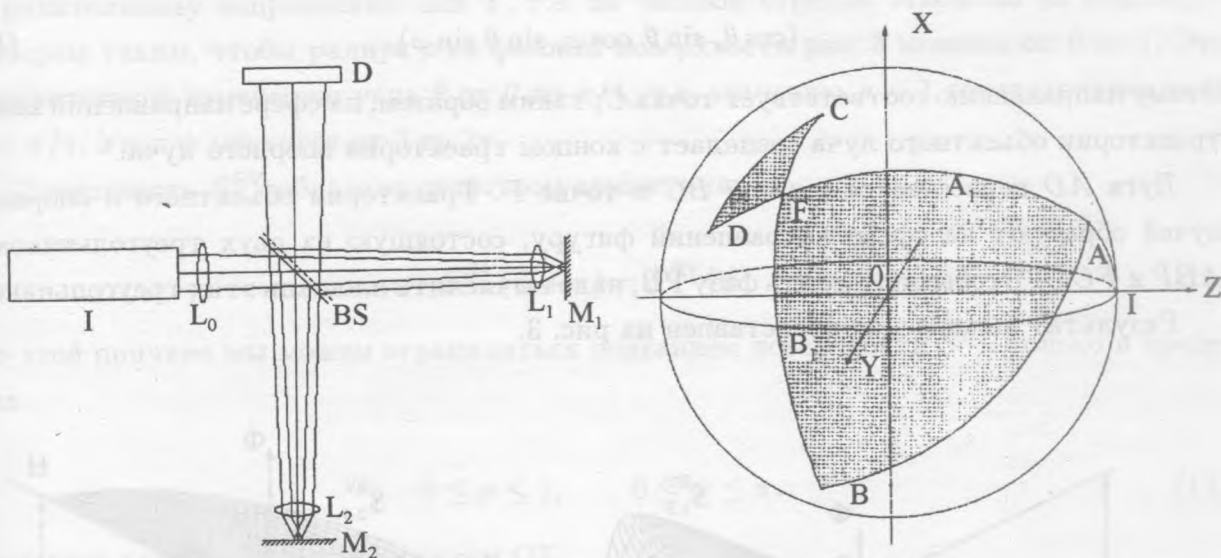


Рис. 1. Принципиальная схема интерферометра Линника.

Рис. 2. Вид траекторий лучей на сфере направлений.

$$(-\cos \theta, \sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi). \quad (7)$$

Этому направлению на сфере направлений отвечает точка D . Легко видеть, что лучи (5), (6), (7) лежат в одной плоскости, поэтому и отвечающие им точки I, A, D лежат на одной дуге большого круга. Отразившись от зеркала M_1 , луч D движется к полупрозрачному зеркалу BS , отражается от него, приобретает направление C

$$(\cos \theta, \sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi). \quad (8)$$

Мы видим, что траектории опорного луча на сфере направлений соответствует ломаная $IADC$, образованная двумя отрезками дуг большого круга – ID и DC .

Опишем теперь траекторию объектного луча. Этот луч возникает из той половины исходного луча, которая не проходит через полупрозрачное зеркало BS , а отражается от него. После такого отражения объектный луч начинает двигаться в направлении

$$(\sin \theta \sin \varphi, \sin \theta \cos \varphi, -\cos \theta), \quad (9)$$

которому на сфере направлений отвечает точка B . Затем объектный луч падает на зеркало M_2 , отражается от него и движется в направлении

$$(\cos \theta, \sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi). \quad (10)$$

Этому направлению соответствует точка C ; таким образом, на сфере направлений конец траектории объектного луча совпадает с концом траектории опорного луча.

Дуга AD пересекается с дугой BC в точке F . Траектории объектного и опорного лучей образуют на сфере направлений фигуру, состоящую из двух треугольников – ABF и FCD . Чтобы определить фазу $PВ$, надо вычислить площадь этих треугольников.

Результат вычисления представлен на рис. 3.

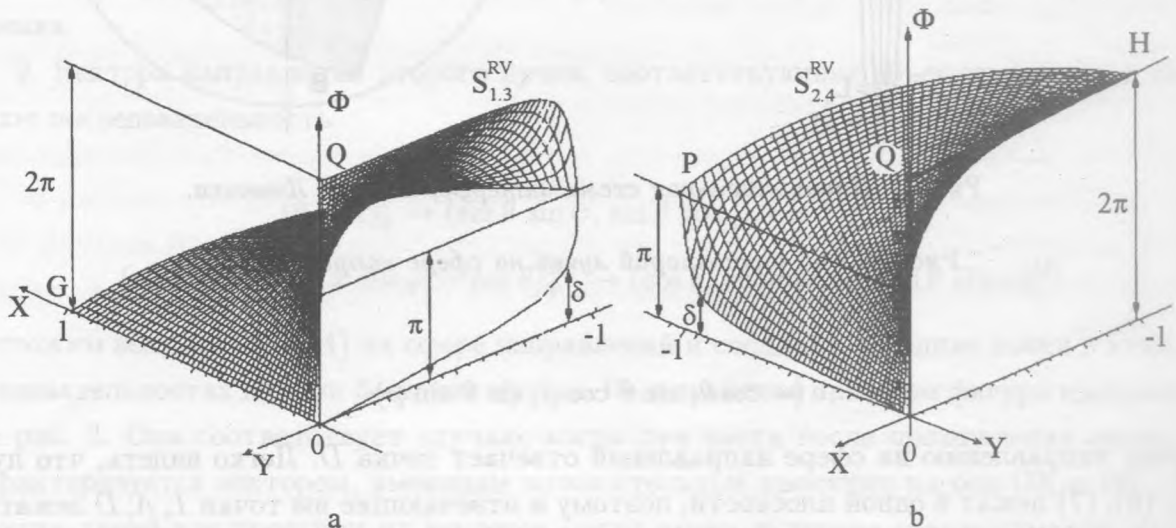


Рис. 3. Поверхность фазы Рывтова-Владимирского. а) части поверхности $S_{1.3}^{RV}$, расположенные в первом и третьем квадрантах плоскости XY , б) части поверхности $S_{2.4}^{RV}$, расположенные во втором и четвертом квадрантах плоскости XY .

Распределение фазы $PВ$ для циркулярно поляризованной волны образует поверхность S^{RV} над плоскостью XY . На этой плоскости введем декартову систему координат с осями X, Y . Каждая точка этой поверхности с координатами (x, y) соответствует лучу, который пересекает линзу L_0 в точке с теми же самыми координатами. После того, как луч света пересечет плоскость линзы в точке (x, y) , направление его движения будет задаваться вектором (6). При этом угол θ определяется только расстоянием $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ точки (x, y) от начала координат, а угол φ совпадает с соответствующим углом ψ этой точки в полярной системе координат. По этой причине, для того, чтобы описать структуру фазовой поверхности, введем на плоскости XY полярную систему координат (ρ, ψ) . Угол ψ будем отсчитывать от положительного направления оси X к

отрицательному направлению оси Y , т.е. по часовой стрелке. Масштаб на осях X, Y выберем таким, чтобы радиус ρ на фазовой поверхности рис. 3 менялся от 0 до 1. Это соответствует изменению угла θ от 0 до $\pi/4$, т.е. значению $\rho = 1$ соответствует угол $\theta = \pi/4$. Угол ψ меняется от 0 до 2π .

Поверхность S^{RV} обладает свойством симметрии

$$S^{RV}(\psi + \pi) = S^{RV}(\psi). \quad (11)$$

По этой причине мы можем ограничиться описанием поверхности S^{RV} только в пределах

$$0 \leq \rho \leq 1, \quad 0 \leq \psi \leq \pi. \quad (12)$$

Приведем значение фазы φ_{RV} на оси OX

$$\begin{aligned} \varphi_{RV} = 2\pi & \text{ при } 0 < \rho \leq 1, \quad \psi = 0, \\ \varphi_{RV} = 0 & \text{ при } 0 < \rho \leq 1, \quad \psi = \pi. \end{aligned} \quad (13)$$

Теперь приведем значение фазы φ_{RV} на окружности $\rho = r$.

При $r = 1$ значение фазы φ_{RV} линейно возрастает от значения $\varphi_{RV}(1, 0) = 0$ до значения $\varphi_{RV}(1, \pi) = 2\pi$, при этом $\varphi_{RV}(1, \pi/2) = \pi$.

$$\varphi_{RV}(1, \psi) = 2\psi.$$

Если же $r = a < 1$, то значение фазы φ_{RV} монотонно возрастает от значения $\varphi_{RV}(1, 0) = 0$ до значения $\varphi_{RV}(1, \pi) = 2\pi$, но в точке $(a, \pi/2)$ меняется скачком. Таким образом, на оси OY фаза φ_{RV} испытывает разрыв, величина которого равна 2π в точке $(0, 0)$ и убывает до нуля в точке $(1, \pi/2)$.

На рис. 3а изображена часть поверхности S^{RV} , соответствующая значениям $0 \leq \psi \leq \pi/2$; мы обозначаем ее как S_1^{RV} . На рис. 3б изображена часть поверхности S^{RV} , соответствующая значениям $\pi/2 \leq \psi \leq \pi$; мы обозначаем ее как S_2^{RV} . У этих двух частей поверхности S^{RV} общими являются отрезок $0Q$ и точка P . Границе $0P$ поверхности S_2^{RV} на рис. 3б соответствует линия $0P$ на рис. 3а, симметричная линии QP по отношению к плоскости $\Phi = \pi$.

Значения фазы PB для углов $\psi > \pi$ можно найти с помощью соотношения (11). Мы получим, что на оси OX фаза φ_{RV} также испытывает разрыв, величина которого равна -2π , если двигаться вокруг точки 0 в плоскости XY по часовой стрелке. Значениям

$\pi \leq \psi \leq 3\pi/2$ соответствует поверхность S_3^{RV} , совпадающая с S_1^{RV} , а значениям $3\pi/2 \leq 2\psi \leq 2\pi$ соответствует поверхность S_4^{RV} , совпадающая с S_2^{RV} .

Таким образом, при $0 < \rho < 1$ данная поверхность имеет вид четырехзаходового винта. Его шаг близок (чуть меньше) к 8π , когда ρ близко к нулю, и монотонно уменьшается, стремясь к 4π , с ростом ρ . В тот момент, когда параметр ρ достигает значения $\rho = 1$, четырехзаходовый винт превращается в двухзаходовый с шагом 4π .

Такой вид имеет поверхность фазы РВ для интерферометра Линника.

До сих пор при вычислении фазы РВ мы не учитывали линзы L_1 и L_2 , находящиеся перед зеркалами M_1 и M_2 , т.е., фактически, мы рассматривали обычный интерферометр Майкельсона. Посмотрим теперь, к чему может привести учет этих линз.

В случае опорного пучка луч света, пройдя через полупрозрачное зеркало BS , попадает на линзу L_1 и преломляется ею. До попадания на линзу L_1 луч света характеризовался вектором (6), в результате преломления угол θ у вектора направления меняется: $\theta \rightarrow \theta'$, а угол φ не меняется. Поэтому после преломления вектор (6) преобразуется следующим образом

$$(\sin \theta \sin \varphi, \sin \theta \cos \varphi, \cos \theta) \rightarrow (\sin \theta' \sin \varphi, \sin \theta' \cos \varphi, \cos \theta'). \quad (14)$$

После отражения от зеркала M_1 луч света (14) приобретает направление

$$(-\cos \theta', \sin \theta' \cos \varphi, \sin \theta' \sin \varphi), \quad (15)$$

а после прохождения линзы L_1 в обратном направлении описывается вектором (7). Легко видеть, что точки А и D, соответствующие направлениям (6) и (7), и точки Р и Q, соответствующие направлениям (14) и (15), лежат на одной дуге большого круга. Поэтому площадь фигуры на сфере направлений, соответствующей траекториям опорного и объектного лучей в интерферометре, не меняется при добавлении в оптическую схему микробиъективов L_1, L_2 . В силу этого не меняется и величина отвечающей ей фазы РВ.

Из данного рассуждения следует, что если имеется два последовательных направления светового луча \mathbf{n}_1 и \mathbf{n}_2 , образующих плоскость N_{12} , то любое дополнительное изменение направления луча в промежутке между \mathbf{n}_1 и \mathbf{n}_2 не приводит к изменению фазы РВ, если направления этих изменений лежат в плоскости N_{12} .

Обсудим теперь вопрос о том, как следует учитывать полученные выше результаты при проведении профилактических измерений.

Пусть по какой-либо причине объектный луч, проходя по оптической системе, набирает по отношению к опорному лучу еще некоторую дополнительную фазу δ , которая

не зависит от поляризации луча. Это может быть вызвано, например, разницей длин оптических путей, которые проходят опорный и объектный лучи. Мы будем называть ее динамической фазой.

Рассмотрим по отдельности левациркулярно поляризованную, правациркулярно поляризованную и линейно поляризованную волны.

1. Вектор Джонса левациркулярно поляризованной волны имеет вид

$$E_{LF} = \frac{q}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}. \quad (16)$$

После прохождения всего оптического пути разница фаз между опорным и объектным лучами есть $\delta + \Omega$, т.е. является суммой динамической фазы и фазы РВ. На детектор приходит волна, образованная суперпозицией опорной и объектной волн

$$E_{LF}^1 + E_{LF}^2 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} e^{i(\delta+\Omega)} \right). \quad (17)$$

Квадрат амплитуды такой волны имеет вид

$$|E_{LF}^1 + E_{LF}^2|^2 = \frac{1}{2}(1 + \cos(\delta + \Omega)). \quad (18)$$

2. Для правациркулярно поляризованной волны вектор Джонса имеет вид

$$E_{RT} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Теперь после прохождения оптического пути разница фаз между опорным и объектным лучами принимает вид $\delta - \Omega$, т.е. является разностью динамической фазы и фазы РВ. На детектор приходит волна, образованная суперпозицией опорной и объектной волн

$$E_{RT}^1 + E_{RT}^2 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} e^{i(\delta-\Omega)} \right). \quad (20)$$

Теперь квадрат амплитуды падающей волны имеет вид

$$|E_{RT}^1 + E_{RT}^2|^2 = \frac{1}{2}(1 + \cos(\delta - \Omega)). \quad (21)$$

3. Рассмотрим теперь линейно поляризованную волну. Ее вектор Джонса может быть представлен в виде суммы лево- и правациркулярно поляризованных волн

$$E_{LN} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{LF} + E_{RT}) = \frac{1}{2} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \right). \quad (22)$$

На детектор приходит волна

$$E_{LN}^1 + E_{LN}^2 = \frac{1}{4} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} e^{i(\delta+\Omega)} + \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} e^{i(\delta-\Omega)} \right) \quad (23)$$

Квадрат ее амплитуды равен

$$|E_{LN}^1 + E_{LN}^2|^2 = \frac{1}{2} (1 + \cos \delta \cos \Omega). \quad (24)$$

Пусть мы используем интерферометр в качестве профилометра [17] и определяем положение точки исследуемой поверхности по максимальной интенсивности сигнала, модулируя значение динамической фазы δ . Тогда из формул (18), (21) и (24) следует, что в случае правоциркулярно поляризованной волны построенный образ точки поверхности смещается относительно ее действительного положения на величину, пропорциональную фазе РВ Ω . В случае левоциркулярно поляризованной волны образ точки поверхности смещается на то же самое расстояние, но в другую сторону. Если же волна является линейно поляризованной, то образ точки поверхности не смещается относительно своего истинного положения.

Существование данного эффекта было экспериментально продемонстрировано в работе [16] при измерении формы поверхности шариков латекса с помощью профилометра, использующего свет различной поляризации. Его наличие приводит к тому, что при работе с поляризованным светом при интерпретации сдвигов фаз между лучами, прошедшими различные пути в оптической системе следует, наряду с другими эффектами, учитывать и фазу РВ. При этом наличие информации о структуре данной фазы, связанной только с самой оптической системой, т.е. о фазовой поверхности рис. 3, позволяет отделить вклады в нее от прибора и от изучаемого объекта. Фактически, такая фазовая поверхность является характеристикой каждого конкретного оптического прибора и должна входить в его паспортные данные. Знать форму этой поверхности полезно, например, еще и потому, что в этом случае можно выбрать для работы наиболее гладкие участки на ней.

Поскольку фаза РВ зависит от поляризации луча, а динамическая фаза и фаза Панчарантнама от поляризации не зависит, то, проводя серию измерений со светом различной поляризации, их можно отделить друг от друга. На этом принципе основан прибор [18 – 20], совмещающий в себе свойства профилометра и эллипсометра.

Авторы благодарны "AMPHORA LLC" за поддержку данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Berry M. V. A. Proc. Roy. Soc., A, **392**, 45 (1984).
- [2] Simon B. Phys. Rev. Lett., **51**, 2167 (1983).
- [3] Berry M. V. A. Phys. Today, **12**, 34 (1990).
- [4] Андреев В. А., Климов А. В., Лернер П. Б. Письма в ЖЭТФ, **50**, 63 (1989).
- [5] Andreev V. A., Klimov A. V., and Lerner P. B. Europhys. Lett., **12**, 101 (1990).
- [6] Виницкий С. И., Дербов В. Л., Дубовик В. М. и др. УФН, **160**, 1 (1990).
- [7] Клышко Д. Н. УФН, **163**, 189 (1993).
- [8] Рытов С. М. ДАН СССР, **28**, 263 (1938).
- [9] Владимирский В. В. ДАН СССР, **31**, 222 (1941).
- [10] Ratchaganam S. Proc. Ind. Acad. Sci. Ser. A, **44**, 247 (1956).
- [11] Jiao H., Wilkinson S. R., Chiao, R., and Nathel H. Phys. Rev. A, **39**, 3479 (1989).
- [12] Bergamin A., Savagnero G., and Mana G. J. Mod. Optics, **39**, 2053 (1992).
- [13] Hariharan P., Larkin K. J., and Roy M. J. Mod. Optics, **41**, 663 (1994).
- [14] Тавров А. В., Kawabata T., Miyamoto Y., Takeda M., and Andreev V. A. J. Opt. Soc. Am. A, **16**, 919 (1999).
- [15] Тавров А. В., Kawabata T., Miyamoto Y., Takeda M., and Andreev V. A. J. Opt. Soc. Am. A, **17**, 117 (2000).
- [16] Андреев В. А., Тавров А. В., Ублинский Д. В., и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 5 – 6, 44 (1996).
- [17] Коломыйцов Ю. В. Интерферометры, Л., Машиностроение, 1976.
- [18] Тавров А. В., Андреев В. А., Ублинский Д. В. Оптическая техника, N 3(7), 15 (1995).
- [19] Тавров А., Andreev V., Ublinsky D., Orlov D., and Kogan K. Proc. SPIE, **2778**, 1072 (1996).
- [20] Андреев В. А., Индукаев К. В., Тавров А. А. и др. Патент РФ N 2029976 кл. G02B 21/00 (1995).

Поступила в редакцию 16 февраля 2000 г.