

УДК 535.512+535.854

## ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ФАЗЫ РЫТОВА – ВЛАДИМИРСКОГО И ДИСЛОКАЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В. А. Андреев, А. В. Тавров<sup>1</sup>, Д. В. Ублинский<sup>1</sup>,  
Д. А. Орлов<sup>1</sup>, К. А. Коган<sup>1</sup>

*С помощью лазерного интерферометра измерена фаза Рытова – Владимирского, возникающая при отражении циркулярно поляризованной волны от сферической поверхности. Отраженная волна имеет винтовую дислокацию. Полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теорией.*

В настоящее время в поляризационной оптике большой интерес вызывают топологические фазы. Они являются классическим аналогом квантово-механических фаз Берри [1], изучавшихся в последние годы [2 – 6]. Наиболее хорошо изучены фаза Панчарантнама  $\varphi_P$  и фаза Рытова – Владимирского (РВ)  $\varphi_{RV}$  [8, 9]. Первая из них возникает в случае, если поляризация света меняется циклическим образом, так что соответствующая точка на сфере Пуанкаре описывает замкнутый контур. Тогда начальное и конечное состояния света будут отличаться на фазу  $\varphi_P$ , величина которой определяется значением телесного угла, опирающегося на контур, который описала точка на сфере Пуанкаре. Фаза  $\varphi_{RV}$  возникает в том случае, если луч света движется по неплоской траектории. Аналогично сфере Пуанкаре, вводят сферу направлений и откладывают на ней траекторию луча [10]. Если луч описывает на этой сфере замкнутую траекторию, то изменения его поляризации определяются величиной телесного угла, опирающегося на эту траекторию.

В работе [11] изучалась голономия фазы, возникающая в интерферометрах, а в работе [12] измерялась фаза  $\varphi_P$  с помощью интерферометра, лучи в котором проходят один и

<sup>1</sup>Nanotech Company Ltd., 117393, Москва, ул. Академика Пилюгина 26/2–260.

тот же путь, но в разных направлениях. В этих работах используются интерферометры с плоскими зеркалами, поэтому все лучи в световом пучке движутся параллельно друг другу и всем им отвечает одна и та же фаза  $\varphi_{RV}$ . В нашей работе одна из поверхностей оптической системы сферическая. По этой причине параллельные лучи, падающие на ее разные точки, после отражения движутся по разным направлениям и приобретают разные фазы  $\varphi_{RV}$ . Мы измеряем, фактически, распределение фазы Рытова – Владимирского на поверхности полусферы. При этом оказывается, что фаза луча, отраженного от верхнего полюса сферы, неопределенна и фронт отраженной волны имеет винтовую дислокацию. Основы теории таких дислокаций были заложены в работах [13 – 15].

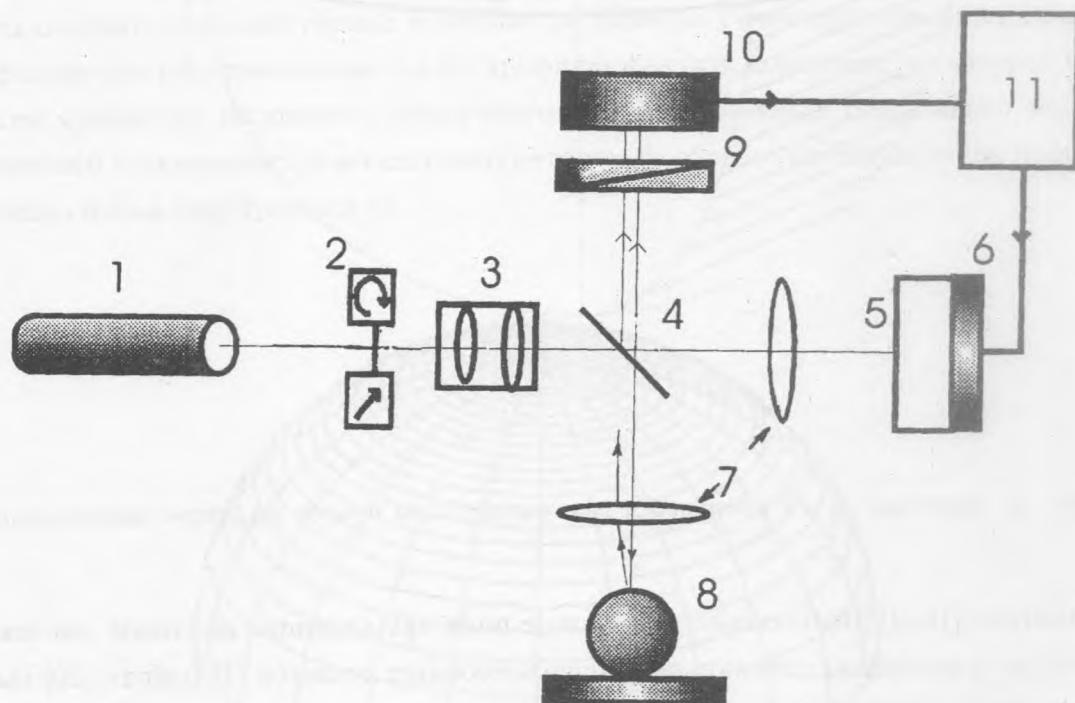


Рис. 1. Принципиальная схема установки.

В работе [16] теоретически было изучено распределение комплексной амплитуды монохроматического волнового поля сложной структуры в связи с вопросом о наличии точек, где амплитуда обращается в нуль. Экспериментальное исследование плотности дислокаций волнового фронта спекл-неоднородных световых полей проводилось в работе [17].

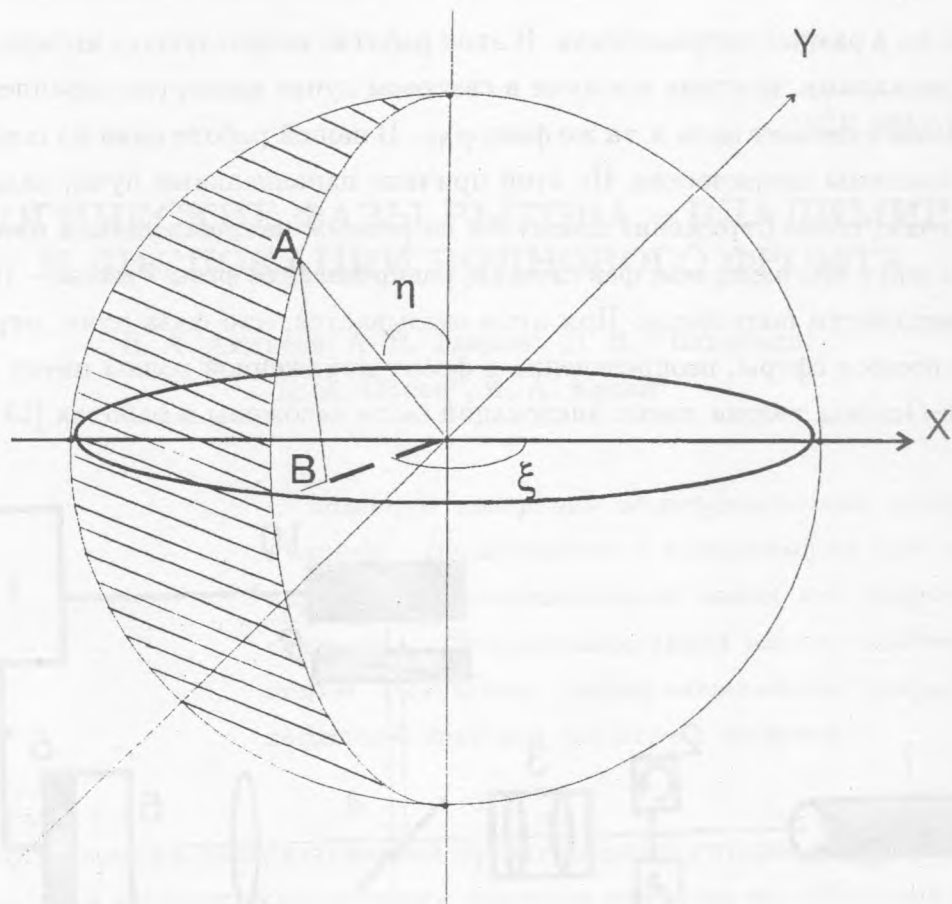


Рис. 2. Контуры лучей опорного и измерительного пучков на сфере направлений.

В работах [18, 19] наблюдались волновые поля, обладающие винтовой дислокацией, полученные с помощью специальных дифракционных решеток. В работе [20] была теоретически рассмотрена и экспериментально реализована возможность формирования волнового фронта с единичной винтовой дислокацией при прохождении циркулярно поляризованного света через многомодовые оптические волокна. В нашей работе показано, что наряду с другими факторами, источником дислокаций может служить фаза Рытова – Владимирского.

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. В ее основу положен интерферометр Майкельсона [21]. Будем далее предполагать, что источник 1 генерирует пучок света с плоским волновым фронтом. Фаза одинакова во всех точках поперечного сечения. Коллиматор 3 обеспечивает однородность засветки поля

зрения микроскопа  $8 \times 8 \text{ мкм}^2$ . С помощью поляризаторов 2 устанавливают линейную или круговую поляризацию засветки. На светоделительной пластинке 4 пучок делится на два: опорный и объектный. Опорный пучок отражается от подвижного зеркала 5, через линзу 7 возвращается на светоделитель и через анализатор 9 направляется на координатно-чувствительный фотодетектор. Предполагается, что фронт опорного пучка плоский на фотодетекторе. Объектный пучок проходит через линзу, аналогичную 7, и отражается от объекта 8. Предполагается далее, что после отражения объектный пучок перестает быть плоской волной, лучи движутся в разных направлениях. Линза собирает лучи в параллельный пучок. Однако разным точкам поперечного сечения теперь соответствуют разные отраженные фазы. Фаза произвольного луча пучка определится соответствующей точкой поверхности объекта. Геометрия поверхности объекта в профилометре восстанавливается по профилю фазовой поверхности, которая строится путем сравнения опорного и объектного лучей с помощью подвижного зеркала 5, соединенного с пьезоэлектрическим модулятором 6, обработка результатов проводится с помощью блока электроники 11.

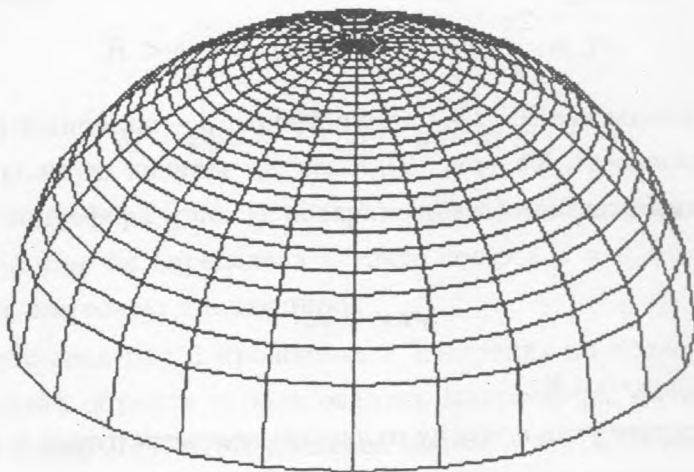


Рис. 3. Модельный расчет формы поверхности в линейно поляризованном свете.

Если считать матрицу Джонса объекта единичной, то измеряется сумма  $\varphi = \varphi_L + \varphi_{RV}$ . Фаза  $\varphi_L$  не зависит от исходной поляризации луча и определяется только геометрией поверхности. В случае полусферы

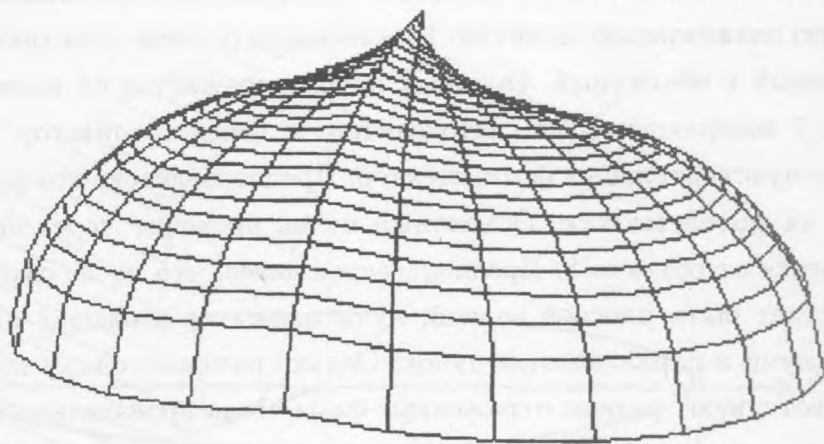


Рис. 4. Модельный расчет формы поверхности в левоциркулярном свете.

$$\varphi_L = \frac{2\pi}{\lambda} (R - \sqrt{R^2 - \rho^2}), \quad 0 < \rho < R. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны света,  $R$  – радиус сферы,  $\rho$  – полярный радиус проекции В точки А сферы на плоскость XY (рис. 2). Фаза  $\varphi_R$  зависит от поляризации исходного луча. В случае левоциркулярного света

$$\varphi_{RV} = 2\xi, \quad (2)$$

где  $\xi$  – полярный угол точки В.

Фаза  $\varphi_{RV}$  не зависит от угла  $\eta$  между радиусом-вектором точки А и осью Z. Формулу (2) можно получить как прямым расчетом, так и графически, откладывая траектории лучей на сфере направлений (рис. 2).

Телесный угол, опирающийся на замкнутый контур, составленный из этих двух траекторий, равен  $\Omega = 2\pi - 2\xi$  (на рис. 2 угол  $\Omega$  заштрихован). Соответствующая фаза  $\varphi_{RV} = +2\xi$ , знак фазы зависит от направления луча.

Для правоциркулярного света  $\varphi_{RV} = -2\xi$ . В случае линейно поляризованного света  $\varphi_{RV} = 0$ . Поэтому фазовая поверхность полусферы для линейно поляризованного света описывается уравнением (1), а для левоциркулярного – уравнением



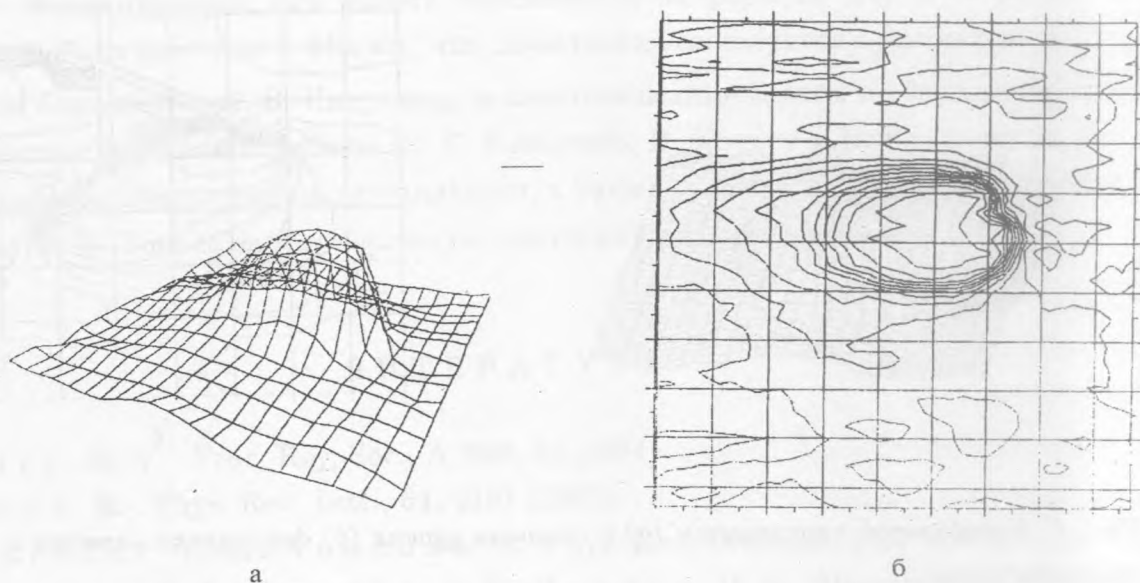


Рис. 5. Вид фазовой поверхности (а) и ее линии уровня (б) для шарика латекса в линейно поляризованном свете.

$$\varphi_L + \varphi_{RV} = \frac{2\pi}{\lambda} (R - \sqrt{R^2 - \rho^2}) + 2\xi. \quad (3)$$

Поверхность (1) – полусфера (рис. 3), поверхность (3) изображена на рис. 4. Из формулы (3) видно, что фаза  $\varphi_{RV}$  не определена в точке полюса  $\rho = 0, \eta = 0$ , а волновой фронт имеет в этой точке винтовую дислокацию.

С помощью установки рис. 1 проводились измерения по проверке формул (1), (3). В качестве сферического объекта использовались микросферы латекса диаметра 3 мкм, источника света – лазер ЛГН-210А с длиной волны  $\lambda = 0,6328$  мкм.

Производили одновременную равномерную засветку рабочего поля микроскопа, и поверхность верхней полусферы латекса помещали в поле зрения. Поэтому выбранный размер микросферы являлся оптимальным по ряду причин.

Во-первых, объект целиком попадает в поле зрения и легко отождествляется. Во-вторых, отношение высоты дополнительного пика – искажения микросферы вследствие фазы Рытова – Владимирского к диаметру микросферы 1:5 также оптимально для наблюдения эффекта. Деформации изображения микросферы меньшего диаметра были бы слишком велики, и сферичность нельзя было бы наблюдать. Напротив, на поверхности

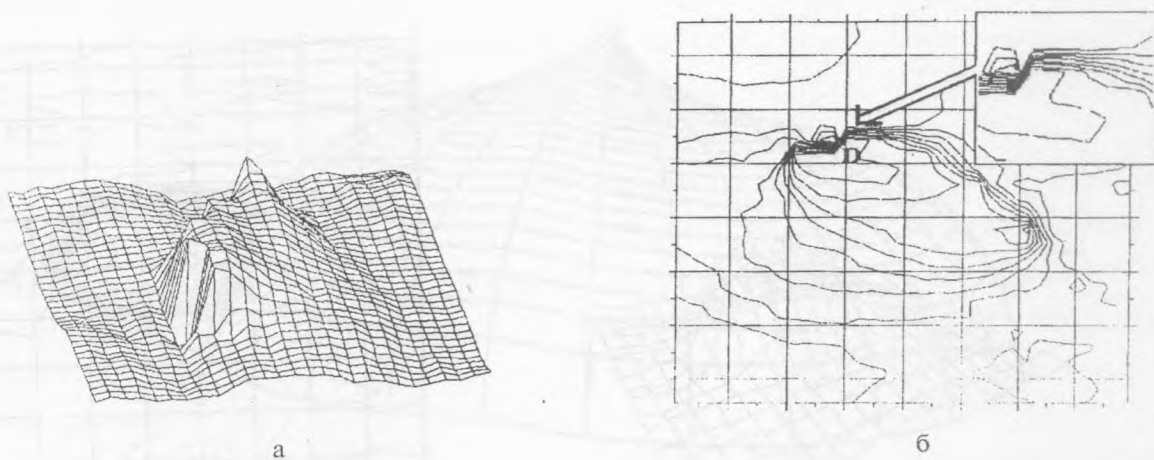


Рис. 6. Вид фазовой поверхности (а) и ее линии уровня (б) для шарика латекса в левоциркулярном свете.

сферы большего диаметра, например, 1 см, пик расчетной высоты 0,5 мкм может быть трудно различим на фоне случайных неровностей поверхности сферы.

Латекс использовался по той причине, что из него легко получить шарики микронного размера. Кроме того, эксперимент сознательно ставил цель, не используя материал с высоким отражением, показать, что искажения изображения за счет фазы РВ могут быть наблюдаемыми в профилометрических измерениях объектов любой природы. При измерении отраженная компонента была достаточно существенна, по сравнению с рассеянной. На это указывает визуальное наблюдение микросфер с резко очерченной границей при общем увеличении  $2000\times$ .

На рис. 5а приведен общий вид верхней полусферы, полученный с помощью линейно поляризованного света, а на рис. 6а дано изображение того же самого латекса, полученное с использованием левоциркулярного света. На рис. 5б и рис. 6б приведены линии уровня фазы, деленные на величину  $\Delta\varphi = \pi/4$ . Хорошо видно, что в случае линейно поляризованного света (рис. 5б) линии уровня не пересекаются. В случае циркулярно поляризованного света (рис. 6б) появляется точка D, в которой пересекаются все линии уровня топограммы. Наличие такой точки и свидетельствует о появлении дислокации у волнового фронта.

В первом случае поверхность объекта более гладкая, как и должно быть согласно формуле (1) и рис. 3, а во втором она деформируется, на ней, в соответствии с формулой (3) и рис. 4, возникает дополнительный острый пик, связанный с добавлением фазы

Рытова – Владимирского. Его высота определяется по формуле [21]:  $h = \varphi\lambda/2\pi$ . В нашем случае она дает  $h \simeq 0,64$  мкм, что качественно согласуется с видом рис. 6.

Авторы благодарны К. В. Индукаеву за многочисленные советы и обсуждения, способствовавшие улучшению работы, С. С. Клименко, В. Кочину и В. Куликову за разработку методов компьютерной визуализации, а также руководству Nanotech Company, Ltd в лице Т. Б. Томова за материальную поддержку данного проекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Berry M. V. Proc. Roy. Soc., A **392**, 45 (1984).
- [2] Simon B. Phys. Rev. Lett., **51**, 2167 (1983).
- [3] Агаонов Y. and Anandan J. Phys. Rev. Lett., **58**, 1593 (1987).
- [4] Андреев В. А., Климов А. Б., Лернер П. Б. Письма в ЖЭТФ, **50**, 63 (1989).
- [5] Виницкий С. И., Дербов В. Л., Дубовик В. М. и др. УФН, **160**, 1 (1990).
- [6] Клышко Д. Н. УФН, **163**, 189 (1993).
- [7] Рачаратнам S. Proc. Ind. Acad. Sci. Ser., A **44**, 247 (1956).
- [8] Рытов С. М. ДАН СССР, **28**, 263 (1938).
- [9] Владимирский В. В. ДАН СССР, **31**, 222 (1941).
- [10] Jiao H., Wilkinson S. R., Chiao R., and Nathel H. Phys. Rev., A **39**, 3475 (1989).
- [11] Bergamin A., Savagnero G., Mana G. J. Mod. Optics, **39**, 2053 (1992).
- [12] Hariharan P., Larkin K. G., and Roy M. J. Mod. Optics, **41**, 663 (1994).
- [13] Nye J. F., Berry M. V. Proc. Roy. Soc., A **336**, 165 (1974).
- [14] Nye J. F. Proc. Roy. Soc., A **387**, 105 (1983).
- [15] Наунал J. V. Proc. Roy. Soc., A **414**, 433, 447 (1987).
- [16] Баранова Н. Б., Зельдович Б. Я. ЖЭТФ, **80**, 1789 (1981).
- [17] Баранова Н. Б., Зельдович Б. Я., Мамаев А. В. и др. ЖЭТФ, **83**, 1702 (1982).
- [18] Bazhenov V. Yu., Soskin M. S., and Vasnetsov M. V. J. Mod. Optics, **39**, 985 (1992).
- [19] Basistiy I. V., Bazhenov V. Yu., Soskin M. S., and Vasnetsov M. V. Opt. Commun., **103**, 422 (1993).



- [20] Даршт М. Я., Зельдович Б. Я., Катаевская И. В.,  
Кундикова Н. Д. ЖЭТФ, **107**, 1464 (1995).
- [21] Коломийцов Ю. В. Интерферометры. Ленинград, Машиностроение, 1976.
- [22] Тавров А. В., Андреев В. А., Ублинский Д. В. Оптическая  
техника, N 3(7), 15 (1995).

Поступила в редакцию 22 марта 1996 г.