

07;12

## Регистрация эффекта увлечения света в дисковом оптическом интерферометре

© В.О. Гладышев, Т.М. Гладышева, В.Е. Зубарев

Егорьевский авиационный технический колледж гражданской авиации  
Егорьевск, Московской обл.  
E-mail: vgladyshhev@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 июля 2001 г.

Сообщается о регистрации пространственного эффекта увлечения света с  $\lambda = 0.63299 \mu\text{m}$  оптическим диском радиусом  $R_0 = 0.06 \text{ m}$ , вращающимся с частотой  $\omega = 25 \text{ Hz}$ .

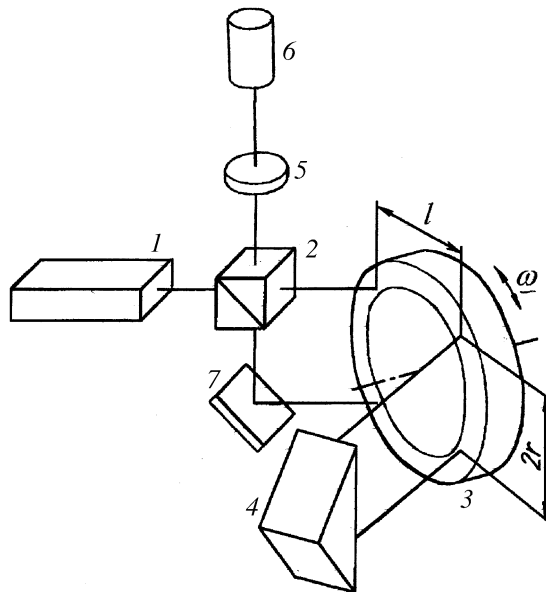
Смещение интерференционной картины определялось по времени следования интерференционных полос по апертуре фотодетектора при вращении оптического диска в прямом и обратном направлении и составляло  $\Delta = 0.0094 \pm 0.0025$  интерференционной полосы.

Распространение электромагнитного излучения во вращающейся среде зависит от результата суперпозиции первичной и вторичных электромагнитных волн, возникающих при взаимодействии электромагнитного излучения с атомами движущейся среды.

Решение дисперсионного уравнения позволяет найти волновой вектор электромагнитной волны в каждой локальной области траектории с учетом пространственного распределения скоростей среды [1]. Решение неоднократно проверялось экспериментально, однако сложность подобных исследований позволила изучить только его частные случаи, такие как продольный эффект Физо [2,3] и нормальный разрыв скорости [4,5], в которых на световой луч влияют либо нормальная, либо тангенциальная составляющие скорости среды.

Во вращающейся среде на электромагнитную волну влияют одновременно нормальная и тангенциальная составляющие движения, поэтому экспериментальная регистрация пространственного эффекта увлечения световой волны является проверкой полного решения дисперсионного уравнения.

В работе представлены результаты серии экспериментов по измерению сдвига интерференционной картины (ИК) в схеме двухлучевого двухпроходного дискового интерферометра (рис. 1).



**Рис. 1.** Оптическая схема интерферометра с вращающимся оптическим диском. Для увеличения оптической длины пути во вращающейся среде на переднюю центральную и заднюю плоские поверхности диска нанесено отражающее покрытие.

Как следует из рис. 1, световой луч  $1$  лазера падал на светоделитель  $2$ , делился на два луча, которые затем поступали на оптический диск  $3$ , переотражались на его двух плоских отражающих поверхностях и выходили, попадая на уголкового отражатель  $4$ . Отразившись от уголкового отражателя, лучи, поменявшись местами, снова проходили оптический диск и, выйдя из него, попадали на светоделитель. На светоделительной поверхности лучи смешивались, проходили объектив  $5$  и образовывали интерференционную картину на экране  $8$ , в центре которого был установлен фотодетектор  $6$  (фотодиод ФД256, работающий в генераторном режиме).

В эксперименте использовался лазер ЛГН-302, создающий на входе в интерферометр электромагнитную волну с  $\lambda = 0.63299 \mu\text{m}$  и мощностью  $P_0 \approx 0.84 \text{ W}$  для горизонтальной и вертикальной составляющих

поляризации. В качестве вращающейся среды использовался оптический диск диаметром 120 mm и толщиной 30 mm, выполненный из эталонной пластинки стекла ЛК5 с показателем преломления  $n = 1.4766$  на  $\lambda$ . Для увеличения длины оптического пути за счет переотражений на плоские торцевые поверхности диска были нанесены зеркальные покрытия с коэффициентом отражения  $R = 0.9$ .

Смена направлений вращения оптического диска приводила к смене знаков сдвига фаз интерферирующих лучей и соответственно к смене направлений сдвига ИК.

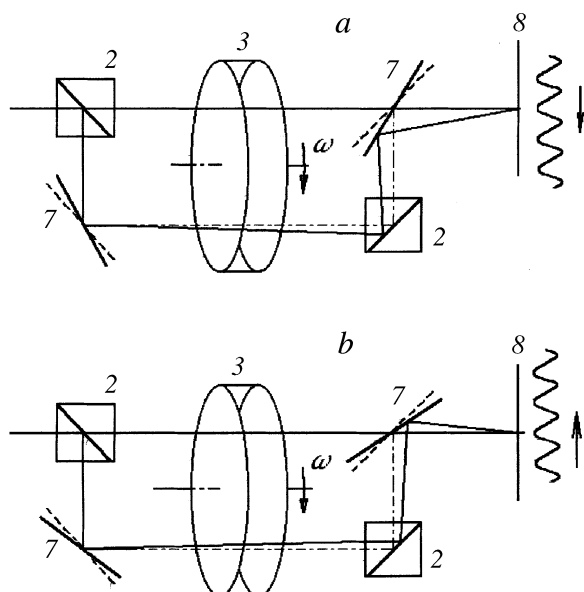
Так как в данной схеме лучи проходят одни и тот же оптический путь, интерферометр является нечувствительным к вибрациям и стационарным смещениям оптического диска, упругой деформации диска и его клиновидности.

Вместе с тем смещение ИК зависит от явления фотоупругости, которое может изменять свою величину в зависимости от скорости и направления движения. Для исключения влияния данного явления проводились серии экспериментов с прямым и обратным вращением оптического диска для различных относительных положений лучей (рис. 2), что обеспечивалось юстировкой положения зеркала (7). Явление фотоупругости приводило к одному и тому же направлению смещения картины при одном направлении вращения оптического диска, в то время как пространственное увлечение света приводило к различным направлениям смещения ИК при различных относительных положениях лучей.

Юстировками зеркал и светодетектора создавалась ИК из параллельных контрастных полос равного наклона. Вращение оптического диска приводило к смещению интерференционных полос таким образом, что по апертуре фотодетектора перемещались три интерференционные полосы в одну, а затем в другую сторону.

Смещение ИК, связанное не с кинематическим движением оптического диска, а со сдвигом фаз интерферирующих лучей, вследствие пространственного эффекта увлечения или явления фотоупругости должно было изменять время между моментами прохождения интерференционной полосой фотодетектора при различных направлениях вращения оптического диска.

Зависимость напряжения на фотодетекторе для относительных положений лучей (рис. 2) при вращении оптического диска по часовой стрелке представлена на рис. 3.



**Рис. 2.** Условная схема хода лучей от светоделителя 2 к экрану 8 при различных поворотах зеркала 7. Изменение относительного положения лучей приводит к смещению ИК вниз (*a*), вверх (*b*) при вращении оптического диска в одну и ту же сторону.

Зависимости были получены на основе осциллограмм, снимаемых с осциллографа С1-118А, обеспечивающего нестабильность синхронизации развертки не более  $0.02(T + 4) \cdot 10^{-9}$  s, где  $T$  — длительность развертки. Осциллограммы преобразовывались в цифровой формат при помощи цифровой фотокамеры Kodak DC240 с разрешением  $1344 \times 971$  pixel.

Временные координаты точек определялись на персональном компьютере типа Pentium 2. Расстоянию между точками 13, 15 на рис. 3 соответствовал условный временной интервал для различных серий замеров  $t_{15} - t_{13} \approx 800 - 1000$  pixel.

Как следует из рис. 3, области точек 14 и 6, 7 соответствуют остановке смещения ИК и смене направления ее вращения, что было проверено в режиме ручной прокрутки оптического диска с шагом

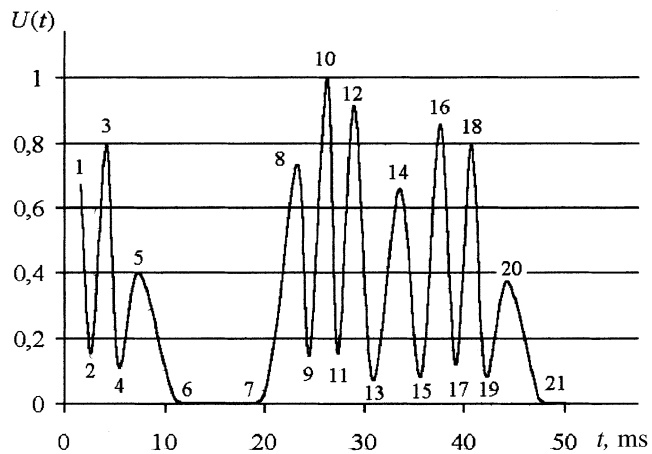


Рис. 3. Зависимость относительного напряжения на фотодетекторе от времени.

поворота  $1^\circ$ . Разность амплитуд сигнала в точках 8 и 20, 10 и 18, 12 и 16 являлась результатом того, что интерференционные полосы совершали вращательное движение, из-за чего полоса проходила фотодетектор в прямом и обратном направлении различными участками.

Отклонение периода вращения  $T_i$  в каждой серии измерений контролировалось по разности координат между идентичными точками 3 и 18, 4 и 19, 5 и 20 и не превышало 0.5% от установившегося значения.

Измеряемыми величинами были координаты  $t_{13}$ ,  $t_{15}$  и  $t_{12}$ ,  $t_{16}$ , которые определяли ширину интерференционной полосы, ее относительное положение и сдвиг.

В нерелятивистском пределе сдвиг интерференционной картины для нашей схемы определяется выражением

$$\Delta = \frac{4lu_l(n^2 - 1)}{\lambda c}, \quad (1)$$

где  $l$  — длина проекции геометрического пути светового луча в оптическом диске на его плоскую поверхность,  $u_l = \omega r$  — проекция скорости среды на  $l$ ,  $\omega$  — частота вращения оптического диска,  $r$  — расстояние от  $l$  до оси вращения оптического диска.

Для реализованных в эксперименте параметров  $l = 0.087$  м,  $r = 0.0225$  м,  $n = 1.4766$ ,  $\omega = 25$  Hz,  $\lambda = 0.63299$   $\mu\text{m}$  из (1) мож-

но получить теоретическую величину смещения полосы относительно неподвижного оптического диска  $\Delta = 0.001217$ .

Метод измерения смещения ИК по вариациям времени следования полос по фотодетектору позволяет повысить точность измерений. Во-первых, измерение сдвига картины производится для двух различных направлений вращения, что увеличивает измеряемую  $\Delta$  в 2 раза. Во-вторых, измеряется величина  $t_{15} - t_{13}$ , содержащая две величины сдвига, и, в-третьих, измерения проводятся при различных относительных положениях интерферирующих лучей. Последнее приводит к сдвигу интерференционной картины в различные стороны при одном и том же направлении вращения, что также увеличивает результирующий сдвиг картины в 2 раза.

В результате в эксперименте должна наблюдаться величина смещения  $\Delta_p = 8\Delta = 0.0097$  полосы.

Серии экспериментов включали снятие зависимостей  $U(t)$  с разрешением, при котором в кадре умещалась интересующая нас часть  $t_{12} - t_{16}$  по 25 кадров для каждого направления вращения и для каждого относительного положения лучей.

Величина  $\Delta t_i = t_{13,i} - t_{12,i} + t_{16,i} - t_{15,i}$  дает временную ширину интерференционной полосы, здесь  $i = \overline{1, 25}$ . Величина  $\delta t_i = t_{15,i} - t_{13,i}$  определяет временное положение полосы относительно момента остановки полос в точке 14 для заданного направления вращения и относительного положения лучей. Их отношение определяет относительное положение интерференционной картины в долях ширины полосы, что позволяет устранить возможные вариации периода в каждом кадре.

После расчета условных временных координат  $\delta t_i$ ,  $\Delta t_i$  получали относительные пространственные координаты положения и ширины интерференционной полосы  $\delta x_i$  и  $\Delta x_i$ .

Относительному положению ближайшей к моменту остановки в точке 14 интерференционной полосы соответствует величина

$$\Delta_i = \frac{\delta x_i}{\Delta x_i}. \quad (2)$$

В результате усреднения по 25 кадрам получаем 4 величины, определяющие искомый сдвиг интерференционной картины

$$\Delta_{\exists} = (\Delta_+^1 - \Delta_-^1) - (\Delta_+^2 - \Delta_-^2), \quad (3)$$

где индексы 1, 2 соответствуют двум относительным положениям интерферирующих лучей, а "+" , "-" — правому и левому направлениям вращения.

Обработка данных измерений дает следующий результат для сдвига интерференционной картины с вероятностью 0.9:

$$\Delta_{\ni} = 0.0094 \pm 0.0025 \text{ полосы.}$$

Нетрудно заметить, что величина  $\Delta_p$  попадает в доверительный интервал.

Как показывают расчеты, при использованных параметрах угла падения  $\vartheta_0 = 67^\circ$ , частоты вращения  $\omega = 25 \text{ Hz}$ , радиуса  $R_0 = 0.06 \text{ m}$ , показателя преломления  $n = 1.4766$  отклонение от закона преломления Снеллиуса вследствие поперечного увлечения света должно приводить к сдвигу ИК, на порядок меньшему, чем величина  $\Delta_{\ni}$  [6]. Необходимую чувствительность для регистрации данного явления можно получить, увеличивая  $\omega$  или  $R_0$ .

Стоит отметить, что формула (1) была получена в предположении, что смещение интерференционной картины определяется проекцией вектора линейной скорости среды на волновой вектор электромагнитной волны в каждой точке 3-мерной траектории луча. Результаты эксперимента свидетельствуют о правильности данного подхода. Дальнейшее увеличение чувствительности интерферометра позволит исследовать отклонение от (1), связанное с нарушением закона преломления и нарушением прямолинейности распространения света во вращающейся среде.

## Список литературы

- [1] Гладышев В.О. // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58. В. 8. С. 593–597.
- [2] Fizeau D'H. // Ann. de Chimie et de Phys. 1959. V. 57. P. 385.
- [3] Michelson A., Morley E.W. // Am. J. Phys. 1986. V. 31. N 185. P. 377–386.
- [4] Загороднов О.Г., Файнберг Я.Б., Егоров А.М. // ЖЭТФ. 1960. V. 38. В. 1. С. 7–9.
- [5] Болотовский Б.М., Столяров С.Н. // УФН. 1989. Т. 159. В. 1. С. 155–180.
- [6] Гладышев В.О. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 5. С. 97–100.