

07

Первые результаты измерения зависимости пространственного увлечения света во вращающейся среде от скорости вращения

© В.О. Гладышев, Т.М. Гладышева, М.И. Дашко,
Н.Е. Трофимов, Е.А. Шарандин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
E-mail: vgladyshev@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 марта 2007 г.

Обсуждаются результаты экспериментов по наблюдению зависимости скорости распространения света c от векторного поля скоростей вращающейся оптически прозрачной среды. В интерферометре свет от лазера с длиной волны $\lambda = 0.632991 \mu\text{m}$ проходил через вращающийся оптический диск с показателем преломления стекла $n = 1.7125$, геометрическая длина пути одного луча в среде в проекции на плоскую поверхность диска $l = 30.4 \text{ mm}$, толщина диска $d = 20 \text{ mm}$, угол падения луча на плоскую поверхность диска $\vartheta_0 = 50.7^\circ$. Частота вращения диска изменялась до 380 Hz , что соответствует проекции скорости движения среды на волновой вектор электромагнитной волны $V_{2n} = 36 \text{ m/s}$.

Результаты экспериментов подтвердили в первом приближении классическую линейную зависимость сдвига интерференционных полос от скорости движения среды.

PACS: 42.25.Bs, 42.25.Hz, 03.30.+p, 07.60.Ly

В работе обсуждается анизотропия, возникающая в движущихся средах. В таких средах скорость распространения света зависит от скорости и направления движения среды. Траекторией распространения света во вращающейся среде является кривая линия [1]. Величина дополнительной разности хода, возникающей вследствие искривления лучей, может быть сравнима по порядку величины с разностью хода лучей вследствие продольного эффекта Физо. Это связано с возникновением на тангенциальном разрыве скорости нарушения закона Снеллиуса, что вместе с явлением искривления траектории должно приводить к

смещению точки выхода луча из среды. Данное комплексное явление представляет собой поперечное увлечение света в движущейся среде.

Поперечное увлечение света может возникать при распространении излучения во вращающемся оптическом диске. В 1977 г. Х. Билгером и В. Стовеллом был выполнен эксперимент, в котором свет распространялся во вращающемся оптическом диске (OD) в кольцевом лазерном интерферометре [2]. Результаты эксперимента интерпретировались как наблюдение эффекта Физо. Однако, так как во вращающемся диске возникает тангенциальный разрыв скорости на плоской поверхности диска, фазовый набег циркулирующих электромагнитных волн был обусловлен продольным и поперечным увлечением электромагнитных волн. Это подтверждают расчеты, основанные на решении дисперсионного уравнения, которые показывают, что дополнительный сдвиг интерференционной картины (ИК) в аналогичных экспериментах может достигать порядка 20% от величины, вызванной эффектом Физо [3].

В данной работе обсуждаются результаты интерферометрических экспериментов по измерению зависимости оптической анизотропии света во вращающейся оптически прозрачной среде от скорости вращения. Под анизотропией в данном случае понимается зависимость скорости распространения света в оптической среде от скорости и направления движения среды. Для исследования эффекта увлечения света во вращающейся среде была предложена схема интерферометра с вводом излучения через плоскую поверхность вращающегося диска [4,5]. В этой схеме влияние кривизны траектории минимально и им можно пренебречь. Однако для измерения зависимости эффекта увлечения света от скорости вращения необходимо было увеличить диапазон скоростей. Это было реализовано авторами в интерферометре, схема которого представлена на рис. 1. Данная схема также обладает разностными компенсирующими свойствами, что позволяет устранить влияние сейсмических, акустических, тепловых шумов, а также вариаций показателя преломления воздуха.

Луч от лазера L разделяется светоделителем BS на два, которые после зеркал M_1 и M_2 проходят вращающийся OD в противоположных направлениях. Вследствие вращения OD один из лучей получает положительный сдвиг фазы, другой — отрицательный. Затем лучи смешиваются на BS и после зеркала M_3 и оптической системы OS попадают на фотодетектор PD . Изменение направления вращения OD приводит к изменению направления смещения полос в плоскости апертуры PD . Для

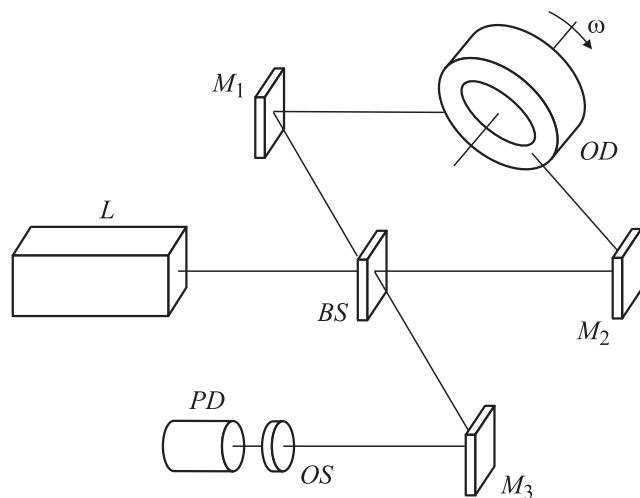


Рис. 1. Двухлучевой однопроходный интерферометр с вращающимся OD .

увеличения оптического пути в материале диска лучи переотражались на зеркальных участках его плоских поверхностей (передняя плоская поверхность имеет зеркальное покрытие центральной части, задняя поверхность полностью зеркальная).

В первом приближении данный интерферометр эквивалентен однопроходному интерферометру Физо. Рассмотрим схему интерферометра в инерциальной системе отсчета (ИСО), где интерферометр покоится, т. е. при $\beta = V/c = 0$, c — скорость света в вакууме. Скорости оптически прозрачной среды соответствует величина $\beta_{2n} = \pm V_{2n}/c$, V_{2n} — проекция скорости движения среды на волновой вектор электромагнитной волны в ИСО интерферометра. В указанном приближении, т. е. без учета эффекта нарушения закона Снеллиуса, световая волна частоты ω_0 падает из первой среды с показателем преломления $n_1 = 1$ на границу, отделяющую ее от второй среды с n_2 , заданным в ИСО, где среда покоится. Для нормального падения лучей решение дисперсионного уравнения будет определяться инвариантами $I_t = k_t = k_0 \sin \vartheta_0 = 0$, $-I_1 = \omega_0(1 - \beta) = \omega_0$ [6].

Тогда волновым векторам преломленных лучей, распространяющихся в противоположных направлениях, соответствует выражение

$$k_{2n} = \frac{\omega_0}{c} \frac{-\beta_{2n}(n_2^2 - 1) + n_2(1 - \beta_{2n}^2)}{1 - n_2^2 \beta_{2n}^2}. \quad (1)$$

Смещение интерференционных полос будет зависеть от времени распространения света в противоположных направлениях

$$\Delta_0 = \frac{c}{\lambda} (t_2 - t_1) = \frac{lc}{\lambda \omega_0} (k_{2n,2} - k_{2n,1}) = \frac{2l}{\lambda} \frac{\beta_{2n}(n_2^2 - 1)}{1 - n_2^2 \beta_{2n}^2}, \quad (2)$$

где l — длина оптического пути одного луча в движущейся среде, λ — длина волны света в ИСО, где среда покоится.

В экспериментах были реализованы следующие параметры: диаметр диска равнялся $D = 45$ мм, длина пути одного луча в среде в проекции на плоскую поверхность диска $l = 30.4$ мм, показатель преломления стекла $n_2 = 1.7125$, толщина диска $d = 20$ мм, угол падения луча на плоскую поверхность диска $\vartheta_0 = 50.7^\circ$, длина волны лазера $\lambda = (0.6329910 \pm 1) \cdot 10^{-7}$ м, частота вращения OD изменялась в пределах от 100 до 380 Гц. Для данных параметров при частоте вращения диска $\nu = 200$ Гц ожидаемое смещение полос вследствие эффекта Физо равно $\Delta_0 = 1.18 \cdot 10^{-2}$.

Однако теоретический анализ указывает на необходимость учета нарушения закона Снеллиуса вследствие наличия тангенциального разрыва скорости на границе раздела воздух–стекло. Вследствие поперечного увлечения света угол преломления рассчитывается по формуле [3]

$$\operatorname{tg} \vartheta'_2 = \frac{\sin \vartheta_0}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \vartheta_0 - (n_2^2 - 1)\beta_{2n}}}. \quad (3)$$

В эксперименте $\beta_{2n} = 6.4 \cdot 10^{-8}$ при $\nu = 200$ Гц, что определяет отклонение ϑ'_2 от $\vartheta_2 = \operatorname{arctg} \frac{l}{3d}$ на уровне $2 \cdot 10^{-6}$ градуса. Дополнительное смещение ИК определяется по формуле

$$\Delta' = \frac{6d(n_2 - 1)}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos \vartheta'_2} - \frac{1}{\cos \vartheta_2} \right) \cong \frac{(n_2 - 1) \operatorname{tg} \vartheta_2}{n_2} \Delta_0 = 2.5 \cdot 10^{-3}. \quad (4)$$

Суммарное смещение полос вследствие продольного и поперечного эффекта Физо равно $\Delta_{\Sigma} = \Delta_0 + \Delta' = 1.43 \cdot 10^{-2}$.

Интерферометр был сконструирован на двух оптических платформах с пассивной системой вибростабилизации. На одной из платформ находился электродвигатель с OD , на другой — остальная часть интерферометра. В экспериментах использовался стабилизированный He–Ne-лазер ЛГН-302 с мощностью $0.5 \cdot 10^{-3}$ W. Интерференционное отражающее покрытие плоских зеркальных поверхностей OD было рассчитано на длину волны лазера. В качестве измерительного фотодетектора (ФД) был выбран высокоскоростной PIN-фотодиод S5821-01 (Hamamatsu). Интерферометр был помещен в кожух с активной системой термостабилизации. Точность поддержания температуры равнялась 0.1°C .

Смещение ИК определялось по измерению времени следования интерференционных полос по апертуре ФД. Метод измерений описан в работе [4]. Метод пересчета интервала времени в смещение ИК осуществляется при помощи эллиптических интегралов второго рода и описан в [3]. Однако, так как в течение всех измерений интерферометр настроен в одной и той же рабочей точке фазовой кривой, смещение ИК пропорционально времени следования полос в первом приближении.

Первичное преобразование сигналов осуществлялось аналого-цифровым преобразователем PCI-6132 (National Instruments) при входном разрешении 14 разрядов с частотой дискретизации 1 MHz. На независимые входы PCI-6132 поступали сигналы от измерительного фотодиода, фотодиода для контроля мощности излучения лазера и термодатчика. Цифровая последовательность сигналов поступала в персональный компьютер и проходила дальнейшую обработку в среде LabVIEW.

Для увеличения статистической выборки и точности обработки сигнала время записи сигнала при одной частоте вращения равнялось 15 s. Таким образом, например, при частоте вращения 200 Hz одной точке на графике соответствует 3000 замеров. Для уменьшения влияния низкочастотных механических шумов и высокочастотных электромагнитных наводок использовалась полосовая фильтрация Батерворта 5 порядка.

Перед началом измерений интерферометр юстировался таким образом, чтобы за один оборот OD по апертуре ФД проходили в горизонтальном направлении три интерференционные полосы: в первую половину периода в одном направлении, во вторую — в другом. Изме-

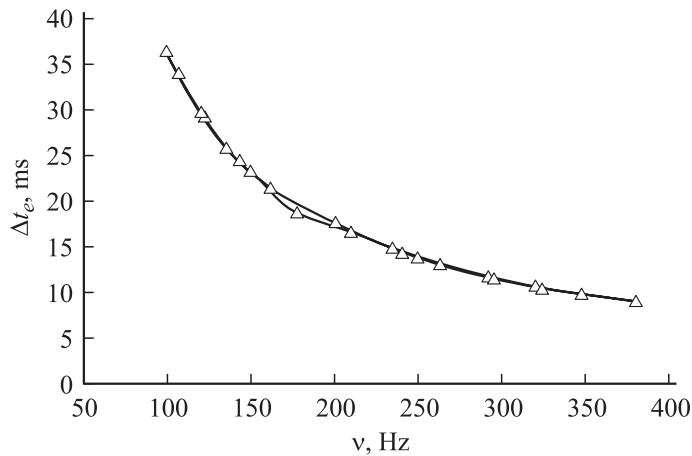


Рис. 2. Зависимость измеренного времени Δt_e прохождения интерференционной полосы по апертуре ФД от частоты вращения OD ν .

ряемой величиной являлся Δt_e — интервал времени между моментами прохождения выбранной интерференционной полосой апертуры ФД. Так как эта величина прямо зависит от периода вращения OD , ее нормировали на период T . Результаты измерений представлены на рис. 2.

На рис. 2 график состоит из двух ветвей, так как измерения начинались с низкой частоты, затем частота увеличивалась до максимальной. После этого частота уменьшалась приблизительно до начальной. Так как зависимости очень близки, можно сделать вывод о достаточно высокой стабильности результатов.

Как следует из рис. 2, зависимость сигнала от частоты имеет гиперболический вид, однако эта зависимость отлична от теоретической зависимости без учета эффекта Физо.

Зависимость разности рассчитанного сдвига полос без учета эффекта Физо и измеренного сдвига полос от периода вращения представлена на рис. 3. Как следует из графика, эта зависимость имеет линейный вид и в первом приближении качественно подтверждает зависимость (1). Можно заметить, что при периоде 5 мс (это соответствует частоте 200 Гц) интервал времени следования интерференционной полосы уменьшается

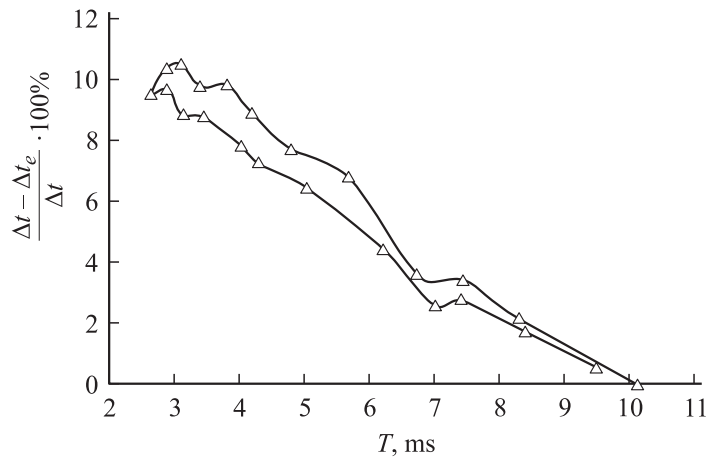


Рис. 3. Зависимость разности рассчитанного без учета эффекта Физо Δt и измеренного сигнала Δt_e (выраженная в процентах к расчетной величине сигнала) от периода вращения.

на $7 \pm 0.7\%$. При этом изменению времени следования полосы соответствует сдвиг ИК $\Delta\Sigma = 1.43 \cdot 10^{-2}$. Направление изменения интервала времени (увеличение или уменьшение) при фиксированном направлении вращения OD зависит лишь от юстировки интерферометра. Таким образом, если калибровать интерферометр, то по изменению времени следования полос можно определять смещение интерференционных полос или решать обратную задачу — по времени следования полос определять скорость движения среды.

Из представленных результатов экспериментов можно сделать заключение, что эффект увлечения света во вращающейся среде линейно зависит от скорости вращения. Анализ экспериментальных данных подтверждает результаты расчетов, основанных на точном решении дисперсионного уравнения, с учетом эффекта нарушения закона Снеллиуса.

Происхождение оптической анизотропии в движущейся среде связано с анизотропными свойствами сил, связывающих атомы решетки среды, и имеет локальный характер. Можно предположить, что существует связь между нелинейными процессами взаимодействия электромагнитного излучения с движущейся средой и причиной, порождающей

анизотропию реликтового микроволнового излучения [7], источником которой, возможно, является геометрия пространства. Тогда эта связь может иметь проявление в экспериментах оптики движущихся сред с изменением пространственной ориентации. В дальнейшем построенный интерферометр предполагается использовать в задаче лабораторного обнаружения пространственной анизотропии. Для этого планируется увеличить параметр, определяющий эффективность увлечения света в движущейся среде $lV_{2n}(n_2^2 - 1)$.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам президента Российской Федерации (грант № МД-170.2003.08).

Список литературы

- [1] *Гладышев В.О.* // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58. В. 8. С. 593–597.
- [2] *Bilger H.R., Stowell W.K.* // Phys. Rev. A. 1977. V. 16. N 1. P. 313–319.
- [3] *Gladyshev V., Gladysheva T., Zubarev V.* // Journal of Engineering Mathematics. 2006. V. 55. N 1–4. P. 239–254.
- [4] *Гладышев В.О., Гладышева Т.М., Зубарев В.Е.* // Письма в ЖТФ. 2002. В. 3. С. 88–94.
- [5] *Gladyshev V.O., Gladysheva T.M., Zubarev V.Ye.* // Proceedings of International Meeting „Physical Interpretations of Relativity Theory“. London: Imperial College, 2002. P. 169–175.
- [6] *Болотовский Б.М., Столяров С.Н.* // УФН. 1989. Т. 159. В. 1. С. 155–180.
- [7] *Сажин М.В.* // УФН. 2004. Т. 174. № 2. С. 197–205.