

07

## Эффекты временной и продольной пространственной когерентности в неравноплечном интерферометре

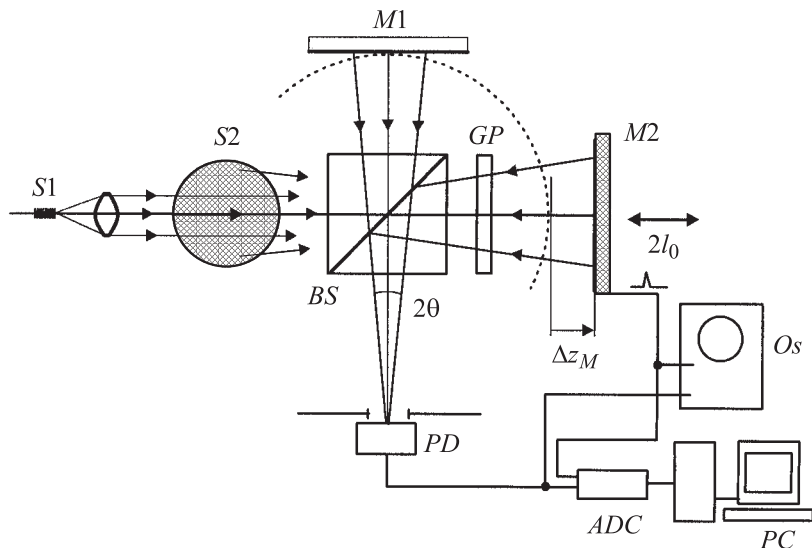
© В.П. Рябухо, Д.В. Лякин, М.И. Лобачев

Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов  
Саратовский государственный университет  
E-mail: rvp@sgu.ru

Поступило в Редакцию 7 июля 2003 г.

Установлено, что при интерференции световых полей с широкими частотным и угловым спектрами в интерферометре Майкельсона со сканирующим зеркалом наличие оптического слоя в одном из плеч интерферометра вызывает взаимное смещение („разбегание“) интерференционных импульсов временной и продольной пространственной когерентности света. Этот эффект приводит к нарушению взаимной когерентности интерферирующих полей, а при использовании двух источников света может быть использован для раздельного определения геометрической толщины и показателя преломления слоя.

В сканирующем интерферометре с источником света с широким частотным спектром формируется интерференционный импульс, длительность которого в шкале оптической разности хода  $\Delta$  определяется длиной временной когерентности света  $l_c \approx \lambda_0^2 / \Delta\lambda$  [1]. Положение максимума огибающей этого импульса, определяемой модулем временной когерентности света  $|\gamma_{11}(\Delta)|$ , совпадает с нулевой оптической разностью хода  $\Delta = 0$ . При внесении в одно из плеч интерферометра оптического слоя импульс смещается относительно первоначального положения на величину дополнительной разности хода  $\Delta_1$  и претерпевает изменение формы из-за влияния дисперсии  $n(\lambda)$  вещества слоя [2–6]. В настоящей работе рассматривается влияние на процессы формирования интерференционного сигнала степени продольной пространственной когерентности света [7–9], проявляющейся при достаточно широком угловом спектре светового поля в области регистрации интерференционного сигнала (при достаточно больших угловых размерах источника света).



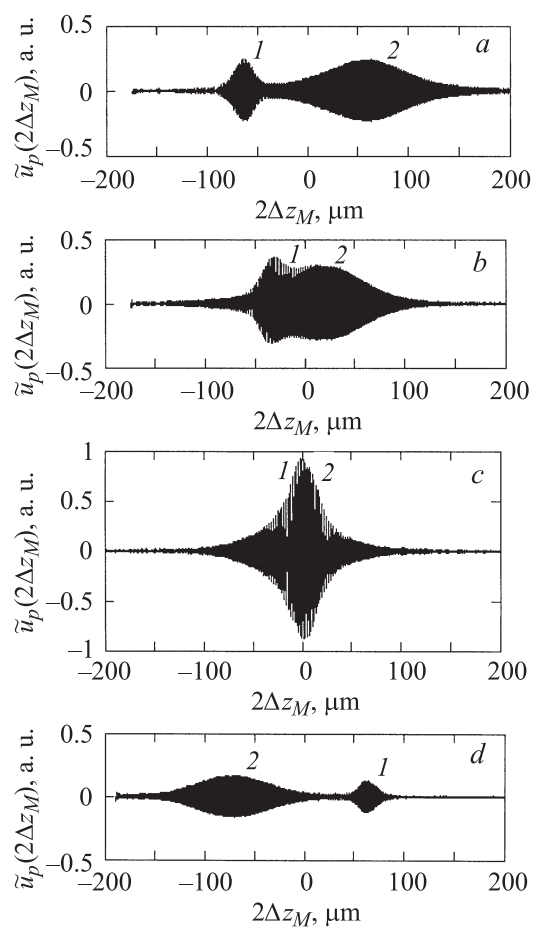
**Рис. 1.** Сканирующий интерферометр Майкельсона с двумя источниками света — широкополосным суперлюминесцентным светодиодом  $S1$  и квазимонохроматическим протяженным — газоразрядной натриевой лампой  $S2$ :  $M1$  — плоское зеркало с возможностью плавного продольного смещения;  $M2$  — плоское зеркало, колеблющееся с амплитудой  $l_0$ ;  $BS$  — делитель пучка;  $GP$  — плоскопараллельная пластинка;  $PD$  — фотодетектор;  $OS$  — осциллограф;  $ADC$  — плата аналого-цифрового преобразования сигнала;  $PC$  — компьютер.

В наших экспериментах использовался интерферометр Майкельсона (рис. 1), в котором одно из плоских зеркал совершало колебательные движения вдоль оптической оси с амплитудой  $l_0$ , достаточной для проявления в интерференционном сигнале и временной, и продольной пространственной когерентности света,  $2l_0 \gg l_c$  и  $2l_0 \gg \rho_{\parallel}$ , где  $\rho_{\parallel}$  — длина продольной пространственной когерентности света, значение которой можно оценить с помощью соотношения  $\rho_{\parallel} \approx 2\lambda_0/\theta^2$ , где  $2\theta$  — угловая апертура светового пучка в плоскости регистрации [7,8]. Устройство сканирования зеркала исключало его наклоны к оптической оси и, следовательно, практически исключало поперечные смещения  $\Delta\rho$  светового поля в плоскости регистрации,  $\Delta\rho \ll \rho_{\perp}$ , где  $\rho_{\perp} \approx \lambda_0/2\theta$  — поперечный радиус пространственной когерентности. Переменный сиг-

нал фотоприемника  $\tilde{u}_p(t)$  подавался на вход осциллографа при использовании синхроимпульса с устройства сканирования зеркала и одновременно оцифровывался с частотой 2.5 МГц и вводился в компьютер для дальнейшего анализа.

Для одновременного наблюдения в выходном сигнале интерференционных импульсов, обусловленных проявлением только временной и только продольной пространственной когерентности, использовались два источника света: суперлюминесцентный светодиод ( $\lambda_0 \approx 0.85 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda \approx 0.02 \mu\text{m}$ ) с коллимированным пучком и натриевая лампа низкого давления ДНАС-18 с достаточно протяженной областью светимости и сравнительно большой длиной временной когерентности излучения желтого дублета  $l_c = \lambda_1\lambda_2/\Delta\lambda_{12} \approx 600 \mu\text{m}$ , где  $\lambda_1 = 0.589 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 0.5896 \mu\text{m}$ . Таким образом, в апертуру фотоприемника, расположенную на оптической оси системы, попадало сразу две пары интерферирующих пучков света: почти параллельного, с малой длиной временной когерентности  $l_c \approx 36 \mu\text{m}$  и пучка света с достаточно большой угловой апертурой  $2\theta \approx 0.2 \text{rad}$  при относительно большой длине временной когерентности. Эти пары пучков света формировали два независимых интерференционных импульса при непрерывном сканировании зеркала  $M2$ . Плавное перемещение зеркала  $M1$  позволяло вывести интерференционные импульсы в удобное для цифровой записи положение.

Для создания в плечах интерферометра дополнительного оптического слоя с возможностью изменения его толщины  $d$  использовался специальный делительный куб, у которого одна половина-призма могла плавно перемещаться вдоль гипотенузной (делительной) грани. Таким образом можно было создавать нескомпенсированный оптический слой в том или ином плече интерферометра (рис. 1). На рис. 2 представлены цифровые осциллограммы интерференционных сигналов — импульсов временной (1) и пространственной (2) когерентности, отображенные в шкале оптической разности хода  $\Delta = 2\Delta z_M(t)$ , где  $\Delta z_M$  — продольное смещение зеркала  $M2$ . Сигналы на рис. 2, *a, b* соответствуют наличию слоя в первом плече ( $M1$ ) интерферометра, на рис. 2, *c* импульсы совпадают, что соответствует компенсации оптических путей в интерферометре ( $d = 0$ ), на рис. 2, *d* оптический слой находится во втором плече ( $M2$ ) интерферометра. При взаимном наложении импульсов на рис. 2, *b* и *c* наблюдаются пространственные биения интерференционных осциллирующих сигналов.

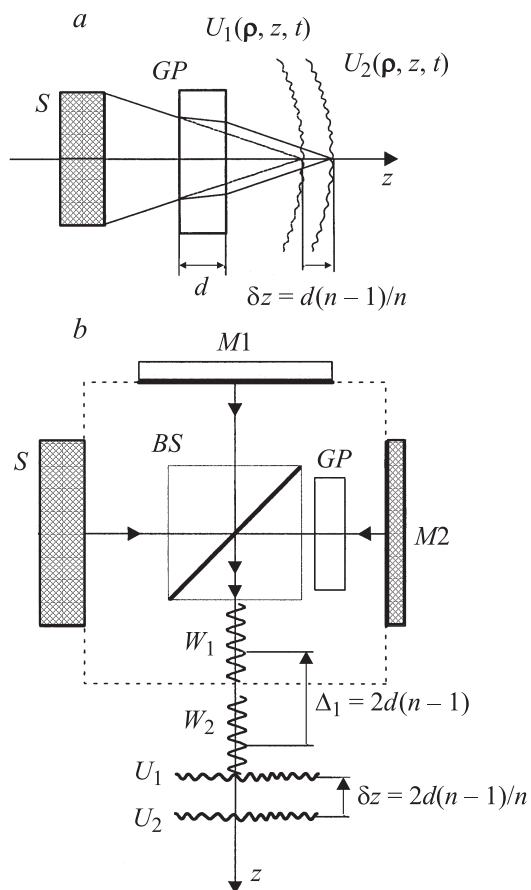


**Рис. 2.** Цифровые осциллограммы интерференционных импульсов временной (1) и продольной пространственной (2) когерентности, отображенные в шкале оптической разности хода  $2\Delta z_M$ , наблюдаемые на выходе интерферометра при внесении в его плечо слоя некоторой оптической толщины  $dn$ :  $a, b$  — слой находится в первом плече ( $M1$ );  $c - d \approx 0$ ;  $d$  — слой во втором плече ( $M2$ ).

Нескомпенсированный слой вносит дополнительную временную задержку [4]  $\delta t \approx \Delta_1/c = 2d(n-1)/c$ , где  $c$  — скорость света,  $n$  — групповой показатель преломления, и соответствующую пространственную задержку  $\Delta_1 = 2d(n-1)$  цугов волн, дважды прошедших через этот слой. При этом амплитудно-фазовая структура светового поля в выходном плече интерферометра испытывает опережающий продольный пространственный сдвиг  $\delta z$  в противоположном направлении. Величина этого сдвига в первом приближении может быть оценена с помощью соотношения  $\delta z \approx 2d(n-1)/n$ . Влияние продольного сдвига становится заметным для поля с относительно малой длиной продольной пространственной когерентности  $\rho_{\parallel} \approx \delta z$ . На рис. 3, *a* показан ход лучей света с широким угловым спектром через плоскопараллельный прозрачный слой, где обозначено:  $U_1(\rho, z, t)$  — комплексная амплитуда поля в отсутствие плоскопараллельного слоя,  $U_2(\rho, z, t)$  — комплексная амплитуда при внесении в поле плоскопараллельного слоя оптической толщины  $dn$ . При этом можем записать  $U_2(\rho, z, t) \approx U_1(\rho, z - \delta x, t + \delta t)$ , где знак приближенного равенства означает определенную декорреляцию комплексной амплитуды поля  $U_1(\rho, z, t)$  при внесении в него прозрачного слоя, вызванную дисперсией  $n(\lambda)$  вещества слоя и сферической аберрацией прошедшего через слой пучка света.

Для более наглядного пояснения обсуждаемых процессов на рис. 3, *b* приведена схема интерферометра, где отображены взаимные пространственные положения идентичных волновых цугов интерферирующих волн и их идентичных амплитудно-фазовых структур при внесении в равноплечный интерферометр оптического слоя определенной толщины.

При наличии оптического слоя во втором плече интерферометра, как показано на рис. 1, для компенсации взаимного сдвига  $\Delta_1$  волновых цугов (временной задержки  $\delta t$ ) необходимо сместить зеркало  $M2$  в направлении от делителя  $BS$  на расстояние  $d(n-1)$ . В то же время для компенсации продольного сдвига амплитудно-фазовых структур волновых полей и наблюдения интерференционного импульса продольной пространственной когерентности зеркало  $M2$  должно приблизиться к делителю  $BS$  интерферометра на расстояние  $\delta z \approx d(n-1)/n$  (рис. 2, *d*). Если слой  $GP$  появляется в другом плече интерферометра (с зеркалом  $M1$ ), то компенсация рассматриваемых сдвигов произойдет при противоположных направлениях смещения зеркала  $M2$  (рис. 2, *a, b*). Таким образом, внесение в одно из плеч интерферометра дополнительного оптического слоя приводит к эффекту взаимного смещения — к



**Рис. 3.** *a* — продольный сдвиг амплитудно-фазовой структуры светового поля с широким угловым спектром при внесении в него прозрачного слоя с оптической толщиной  $dn$ ; *b* — взаимное смещение идентичных волновых цугов  $W_1$ ,  $W_2$  и идентичных амплитудно-фазовых структур  $U_1$ ,  $U_2$  оптических полей на выходе интерферометра при наличии в одном из плеч интерферометра плоскопараллельной пластинки с оптической толщиной  $dn$ :  $S$  — протяженный источник света;  $BS$  — делитель пучка;  $M1$  и  $M2$  — плоские зеркала;  $GP$  — плоскопараллельная пластинка.

„разбеганию“ интерференционных импульсов временной и продольной пространственной когерентности.

Уменьшение амплитуд интерференционных осцилляций в импульсах временной и пространственной когерентности, наблюдаемое при увеличении оптической толщины слоя в том или ином интерферометре (рис. 2, *a, b, d*), вызвано процессами снижения взаимной когерентности волн, обусловленными влиянием дисперсии  $n(\lambda)$  и сферической аберрации слоя.

Эффект „разбегания“ интерференционных импульсов временной и продольной пространственной когерентности света при использовании двух разных источников света с близкими значениями средних длин волн может быть использован для отдельного определения геометрической толщины  $d$  и группового показателя преломления  $n$  слоя [10]. Действительно, измеряя смещение импульса временной когерентности  $\Delta_1 \approx 2d(n-1)$  и смещение импульса продольной пространственной когерентности  $\delta z \approx 2d(n-1)/n$  при внесении в равноплечный сканирующий интерферометр слоя оптической толщины  $dn$ , геометрическую толщину и показатель преломления можно определить из соотношений  $d \approx 0.5\Delta_1\delta z/(\Delta_1 - \delta z)$  и  $n \approx \Delta_1/\delta z$ . Например, сигнал на рис. 2, *d* соответствует наличию оптического слоя в плече интерферометра с геометрической толщиной  $\approx 90 \mu\text{m}$  и групповым показателем преломления  $n \approx 1.5$ .

Если в интерферометре используется только один протяженный источник света с широким частотным спектром, формирующий в плоскости регистрации интерференционного сигнала световое поле с достаточно широким угловым спектром, то в определенном приближении огибающая переменной составляющей сигнала интерферометра  $\tilde{u}_p$  будет определяться произведением модулей степеней временной  $\gamma_{11}(2\Delta z_M(t) \pm 2d(n-1))$  и продольной пространственной  $\gamma_{12}(\delta z(t) \mp 2d(n-1)/n)$  когерентности света

$$\tilde{u}_p(t) \sim |\gamma_{11}(2\Delta z_M(t) \pm 2d(n-1))| \cdot |\gamma_{12}(\delta z(t) \mp 2d(n-1)/n)| \\ \times \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda_0} (\Delta z_M(t) \pm d(n-1)) + \Delta\varphi_0 \right], \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi_0$  — некоторая начальная разность фаз. Наличие плоскопараллельного слоя в каком-нибудь плече интерферометра приведет к совместному проявлению временной и продольной пространственной

когерентности света и исчезновению интерференционного сигнала при  $2d(n-1) \approx l_c$ , если  $l_c < \rho_{\parallel}$ , или при  $2d(n-1)/n \approx \rho_{\parallel}$ , если  $l_c > \rho_{\parallel}$ . При  $l_c < \rho_{\parallel}$  для компенсации взаимной задержки волн в плечах интерферометра и восстановления их взаимной временной когерентности необходимо зеркало  $M2$  сместить по направлению к делителю на величину  $\Delta z_M \approx d(n-1)$ . Это смещение вызовет соответствующий продольный сдвиг волнового поля на выходе интерферометра на величину  $2d(n-1)$ , и в сумме взаимный продольный сдвиг интерферирующих волновых полей составит  $\delta z \approx 2d(n-1)/n + 2d(n-1)$ . Если радиус продольной пространственной когерентности  $\rho_{\parallel}$  в этом случае окажется меньше  $\delta z$ ,  $\rho_{\parallel} < 2d(n^2-1)/n$ , то взаимная когерентность волн не восстановится, и интерференционный сигнал будет отсутствовать при любом компенсирующем смещении зеркала интерферометра. Однако, поскольку  $\rho_{\parallel} \approx 2\lambda/\theta^2$ , то при уменьшении  $\theta$ , например, путем удаления плоскости наблюдения сигнала от делителя  $BS$  можно восстановить взаимную когерентность и наблюдать интерференционный сигнал.

Аналогичные суждения справедливы и для случая, когда  $l_c > \rho_{\parallel}$  и в продольном направлении когерентные свойства поля ограничиваются пространственной когерентностью. Для компенсации продольного сдвига волнового поля  $\delta z \approx 2d(n-1)/n$ , вызванного внесением оптического слоя в плечо интерферометра, необходимо на эту величину сместить зеркало  $M2$  в направлении от делителя  $BS$ . При этом разность хода волн увеличится и станет равной  $\Delta \approx 2d(n-1) + 2d(n-1)/n$ . Если окажется, что эта разность хода превышает длину когерентности  $l_c$ , то взаимная когерентность волн не восстановится. Для появления интерференционного сигнала потребуется увеличение  $l_c$ , например путем фильтрации частотного спектра используемого излучения.

Отметим, что для наблюдения обсуждаемых эффектов может быть использовано рассеянное лазерное излучение с достаточно широким угловым спектром в сочетании с широкополосным источником направленного света. Более того, аналогичные эффекты можно наблюдать и при интерференции сфокусированных пучков света, также отличающихся широким угловым спектром, но в этом случае необходимо использование достаточно широкой, интегрирующей, апертуры фотоприемника [11].

Учет вышерассмотренных процессов при интерференции оптических полей с широким частотным и угловым спектрами, например в низкокогерентной интерферометрии и томографии, с использованием



сфокусированного низкокогерентного зондирующего пучка света, позволит более адекватно интерпретировать результаты интерференционных измерений.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-25.2003.2, поддержке ведущих научных школ и гранта № REC-006 of the U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF).

## Список литературы

- [1] *Мандель Л., Вольф Э.* Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Наука, Физматлит, 2000. 896 с.
- [2] *Danielmeyer H.G., Weber H.P.* // *Phys. Rev. A.* 1971. V. 3. P. 1708–1711.
- [3] *Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С.* Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640 с.
- [4] *Москалев В.А.* Теоретические основы оптико-физических исследований. Л.: Машиностроение, 1987. 318 с.
- [5] *De Groot P.* // *Opt. Lett.* 1992. V. 17. N 12. P. 898–900.
- [6] *Hitzenberger C.K., Baumgartner A., Fercher A.F.* // *Opt. Commun.* 1998. V. 154. P. 179–185.
- [7] *Сороко Л.М.* Основы голографии и когерентной оптики. М.: Наука, 1971. 616 с.
- [8] *Rosen J., Yariv A.* // *Opt. Commun.* 1995. V. 117. P. 8–12.
- [9] *Rosen J., Takeda M.* // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. N 23. P. 4107–4111.
- [10] *Ohmi M., Shiraishi T., Tajiri H., Haruna M.* // *Opt. Rev.* 1997. V. 4. N 4. P. 507–515.
- [11] *Рябухо В.П., Хомутов В.Л., Лякин Д.В., Константинов К.В.* // *Письма в ЖТФ.* 1998. Т. 24. В. 4. С. 19–24.