

могут быть особенностями поведения этих связей в майснеровской фазе [8]. Таким образом, этот вопрос, несомненно, нуждается в дальнейшем теоретическом и экспериментальном исследовании.

Список литературы

- [1] Заварицкий Н. В., Заварицкий В. Н., Петров С. В., Юргенс А. А. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. Приложение. С. 23—26.
- [2] Yamada Y., Fukushima N., Nakayama S. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. Vol. 26. N 5. P. 865—866.
- [3] Vean C. P. // Rev. Mod. Phys. 1964. Vol. 36. N 1. P. 31—36.
- [4] Буш А. А., Гордеев С. Н., Дубенко И. С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. Приложение. С. 204—207.
- [5] Копелевич Я. В., Леманов В. В., Сохин Э. Б., Сырников П. П. // ФТТ. 1988. Т. 30. Вып. 8. С. 2432—2436.
- [6] Okada M., Okuyama A., Matsumoto T. et al. // Jap. J. Phys. 1988. Vol. 27. N 9. P. L1715—1717.
- [7] Янсон И. К. // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. Вып. 5. С. 1497—1510.
- [8] Heaton J. W., Rose-Innes A. C. // Cryogenics. 1964. Vol. 4. P. 85—89.

Московский институт
радиотехники, электроники и автоматики

Поступило в Редакцию
10 ноября 1988 г.

07

Журнал технической физики, т. 59, в. 11, 1989

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ ФАЗОВЫХ ДАТЧИКОВ

А. Г. Булушев, Е. М. Дианов, А. В. Кузнецов, О. Г. Хохотников

Среди различных типов волоконно-оптических датчиков наиболее чувствительными являются те, в которых осуществляется модуляция оптической фазы. Роль преобразователя фазовой модуляции в амплитудную в таких датчиках выполняют волоконно-оптические интерферометры [1, 2].

В настоящей работе на основе связанных одноименных волоконно-оптических кольцевых интерферометров реализованы схемы, которые могут применяться в волоконных датчиках. Использование многолучевых кольцевых интерферометров вместо традиционных интерферометров Маха—Цендера дает возможность увеличить чувствительность датчика за счет многократного прохождения излучения в измерительном кольце. Включение в схему наряду с измерительным кольцом также опорного кольца позволяет, во-первых, регистрировать изменение сигнала по двухлучевой схеме, наблюдая интерференцию волн, прошедших одинаковый оптический путь через первое и второе кольца ($n_1 L_1 = n_2 L_2$, где n_i , L_i — количество проходов и оптическая длина i -го кольца, соответственно), и, во-вторых, использовать источники излучения с малой длиной когерентности [3].

На рис. 1, а приведена схема датчика на основе двух последовательных кольцевых интерферометров (1 — направленный ответитель, 2 — фазовый модулятор или чувствительный элемент). Рассмотрим такое устройство в импульсном режиме, который позволяет работать с сигналом, прошедшим заданное количество проходов через интерферометр. Подавая на вход схемы отдельный импульс с амплитудой A , на выходе получим затухающую последовательность импульсов. Первый импульс (нулевой порядок $n=0$) соответствует сквозному проходу, последующие импульсы ($n > 0$) возникают из-за задержки в кольцевых интерферометрах. Амплитуда n -го импульса A_n в случае, когда длины интерферометров $L_1 \approx L_2$ имеют вид

$$\begin{aligned}
 A_0 &= \gamma_1 \gamma_2 \sqrt{r_1 r_2} \exp i\alpha \quad (n=0), \\
 A_n &= \gamma_1 \gamma_2 \left\{ \sqrt{r_1} t_2 (r_2)^{(n-1)/2} \varepsilon_2^n + (r_1)^{(n-1)/2} t_1 \sqrt{r_2} \varepsilon_1^n + \right. \\
 &+ \left. t_1 t_2 \sum_{m=1}^{n-1} (r_1)^{(m-1)/2} (r_2)^{(n-m-1)/2} \varepsilon_1^m \varepsilon_2^{n-m} \right\} \exp i\alpha \quad (n > 0).
 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь r_i , t_i — коэффициенты перекачки и прохождения ответителя i -го интерферометра [4]; γ_i — амплитудный коэффициент потерь [5]; $\varepsilon_i = \gamma_i \exp(i\beta L_i)$, где β — постоянная распространения HE_{11} -моды одноименного волоконного световода (ОВС); α — набег фазы на участке

ОВС, соединяющем интерферометры (мы пренебрегаем потерями ОВС по сравнению с потерями ответвителей). Первые две части в фигурных скобках (1) соответствуют задержке импульса на n проходов одного из интерферометров. Остальные члены дают вклад $\sim (n-1)t_i$, который при том же n существенно уменьшается для кольцевых интерферометров с большой резкостью, имеющих $r_i \approx 1$ [6].

В эксперименте использовались полупроводниковый лазер на 1.3 мкм, ОВС с диаметром сердцевинки ~ 6 мкм, оболочки 125 мкм, длиной волны отсечки 1.1 мкм и сплавные ответвители, аналогичные [7]. Для удобства иллюстрации особенностей схемы оба интерферометра имели небольшую резкость $F \approx 10$. На практике могут применяться интерферометры с $F \gg$

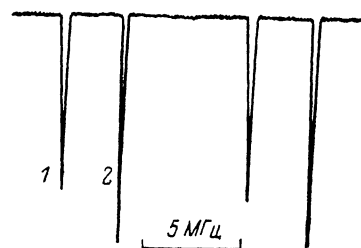
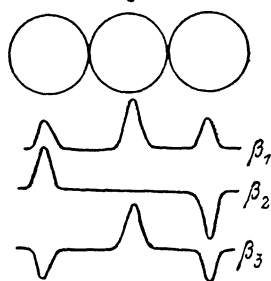
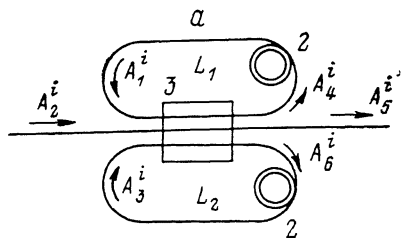
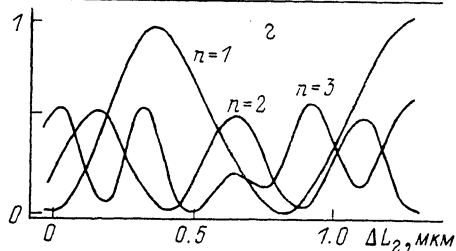
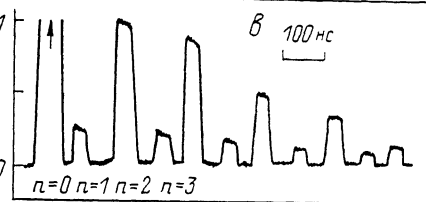
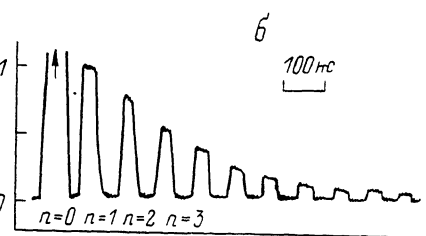
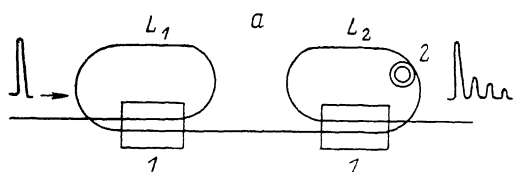


Рис. 1. Датчик на основе двух последовательных кольцевых интерферометров.

Рис. 2. Двухкольцевой интерферометр на основе линейного 3×3 ответвителя.

a — схема интерферометра (2 — фазовые модуляторы, 3 — 3×3 ответвитель); *б* — сечение участка связи 3×3 ответвителя и схема структуры поля низших мод участка связи с постоянными распространения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$; *в* — спектр пропускания интерферометра при модуляции длин L_1 и L_2 (1, 2 — резонансы пропускания первого и второго кольцевых интерферометров соответственно).

≥ 300 [8]. Длины интерферометров $L_1 \approx L_2 \approx 20$ м, причем L_2 могла изменяться с помощью пьезо-керамического модулятора. На рис. 1, б, в показан отклик схемы на прямоугольный световой импульс длительностью 50 нс для двух различных L_2 при фиксированной длине L_1 . На рис. 1, г приведено поведение интенсивности выходных импульсов с разными n при линейном изменении L_2 . Как и следует из (1), чувствительность при возрастании n увеличивается. Присутствие на зависимостях с $n > 1$ нескольких периодов связано с дополнительными членами (1), которые дают существенный вклад из-за малой резкости интерферометров. Это связано с тем, что в настоящей работе для показа эффекта возрастания фазовой чувствительности с ростом n длины опорного и измерительного колец выбирались равными. В практически интересном случае длины L_1 и L_2 необходимо выбирать такими, чтобы n -й импульс измерительного кольца совпадал на выходе только с m -м импульсом опорного кольца.

Альтернативная двухкольцевая схема использует ответвитель 3×3 из одинаковых О С (рис. 2, а). Мы ограничимся рассмотрением интерферометра на основе линейного ответвителя, поперечное сечение участка связи которого показано на рис. 2, б. Ответвитель, у которого ОВС располагаются в вершинах равностороннего треугольника, может быть рассмотрен аналогично [9]. Из соображений симметрии связь между амплитудами — мод на входе и выходе линейного ответвителя записывается в виде

$$\begin{pmatrix} A_4^i \\ A_5^i \\ A_6^i \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} (\tau_a + \tau_s)/2 & i\rho_s/\sqrt{2} & (\tau_a - \tau_s)/2 \\ i\rho_s/\sqrt{2} & \tau_s & -i\rho_s/\sqrt{2} \\ (\tau_a - \tau_s)/2 & i\rho_s/\sqrt{2} & (\tau_a + \tau_s)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1^i \\ A_2^i \\ A_3^i \end{pmatrix} \exp i\beta_M l. \quad (2)$$

Здесь γ — амплитудный коэффициент потерь; $\tau_s = \exp i\beta_R^1 l \cos \beta_R^0 l$, $\tau_a = \exp(-i\beta_R^1 l)$, $\rho_s = \exp i\beta_R^1 l \sin \beta_R^0 l$ — амплитудные коэффициенты прохождения и перекачки; l — длина участка связи ответвителя; β_M , β_R^0 , β_R^1 — средняя и две относительные постоянные распространения, связанные с постоянными распространения $\beta_1 = \beta_M + \beta_R^0 + \beta_R^1$, $\beta_2 = \beta_M - \beta_R^1$, $\beta_3 = \beta_M - \beta_R^0 + \beta_R^1$ мод участка связи [10], конфигурация которых схематически показана на рис. 2, б. Используя (2), получим амплитудный коэффициент пропускания интерферометра

$$T_a = \{\gamma\tau_s - (i\gamma\rho_s^2\Phi \sin \chi)/(1 - \gamma(\tau_s + \tau_a)\Phi \cos \chi + \gamma^2\tau_s\tau_a\Phi^2)\} \exp i\beta_M l, \quad (3)$$

где $\chi = \beta(L_1 - L_2)/2$ и $\Phi = \exp i\beta(L_1 + L_2)/2$.

Особенность такой схемы — отсутствие на выходе резонансов (при непрерывном режиме) или повторных выходных импульсов (при импульсном режиме) в случае совпадения длин обоих интерферометров.

Пропускание двухкольцевого интерферометра с $L_1 \approx L_2 \approx 20$ м, реализованного на основе сплавного 3×3 линейного ответвителя при модуляции длин L_1 и L_2 , показано на рис. 2, в. В качестве источника излучения служил одночастотный непрерывный полупроводниковый лазер с внешним резонатором [8] на 1.3 мкм. Для обоих колец получены близкие значения резкости резонансов $F_1 = 100$, $F_2 = 80$.

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены схемы волоконных датчиков на основе двух последовательных кольцевых интерферометров и двухкольцевого интерферометра на основе линейного 3×3 ответвителя, последняя из которых реализована впервые. На интерферометре получены резкости резонансов $F_1 = 100$, $F_2 = 80$, близкие для обоих кольцевых интерферометров.

Список литературы

- [1] Adamovsky G. // Electron. Lett. 1985. Vol. 21. N 20. P. 922—923.
- [2] Sakai I., Parry G., Jounquist R. C. // Opt. Lett. 1986. Vol. 11. N 3. P. 18.
- [3] Arai K., Hayashi K., Iigama K. et al. // Electron. Lett. 1988. Vol. 24. N 16. P. 1000—1001.
- [4] Bulushev A. G., Gurov Jn. V., Dianov E. M. J. Lightwave Technology. 1988. Vol. 6. N 10. P. 1575—1585.
- [5] Булушев А. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. В., Охотников О. Г. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 13. С. 1156—1160.
- [6] Ju M. H., Hall D. B. // SPIE Fiber Optic and Laser Sensors II. 1984. Vol. 478. P. 104—108.
- [7] Булушев А. Г., Дианов Е. М., Охотников О. Г., Парамонов В. М. // Квантовая электрон. 1988. Т. 15. № 6. С. 1282—1286.
- [8] Bulushev A. G., Dianov E. M., Kuznetsov A. V., Okhotnikov O. G. // Electron. Lett. 1988. Vol. 24. N 18. P. 1172—1173.
- [9] Davies P. A., Abd-el-Hamid G. // Electron. Lett. 1988. Vol. 24. N 11. P. 662—663.
- [10] Булушев А. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. В., Охотников О. Г. // Радиотехника. 1988. № 8. С. 41—43.

Институт общей физики АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
28 ноября 1988 г.