

УДК 621.373.826

О. Б. Витрик, О. Т. Каменев, О. В. Кириченко, Ю. Н. Кульчин,
Ю. С. Петров

(Владивосток)

МЕТОД ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ОДНОВОЛОКОННОГО ДВУХМОДОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Предложено решение задачи обработки сигналов двухмодового интерферометра на базе волоконно-оптического устройства, обеспечивающего взаимодействие мод интерферометра с последующим выделением излучения моды низшего порядка. Исследованы зависимости амплитуды и видности получаемого интерференционного сигнала от конструктивных параметров устройства обработки. Показано, что предложенный волноводный пространственный фильтр позволяет эффективно обрабатывать сигнал межмодовой интерференции, формируемый одноволоконными двухмодовыми интерферометрами, что дает возможность широкого использования этого типа интерферометров для приема параметров физических полей.

Одноволоконные интерферометры, использующие явление интерференции мод одного и того же двухмодового волоконного световода (ВС), представляют значительный интерес для создания датчиков физических величин [1]. Как правило, в таких интерферометрах для обработки сигнала межмодовой интерференции используются процессы пространственной фильтрации [2]. Однако пространственные фильтры являются протяженными двумерными устройствами, которые плохо совмещаются с волоконными световодами [3]. Поэтому принципиальное значение для широкого использования одноволоконных двухмодовых интерферометров (ОДИ) в практических задачах имеет разработка устройства, базирующегося на волоконно-оптической элементной базе. Целью настоящей работы является разработка волноводного пространственного фильтра для выделения сигнала межмодовой интерференции ОДИ.

Рассмотрим принцип работы исследуемого устройства. Для этого предположим, что вблизи выходного торца ОДИ, направляющего две моды, расположено устройство, обуславливающее взаимодействие этих волн так, что часть световой мощности одной из мод передается другой моде. Если световое поле суммарной волны, полученной в результате взаимодействия, выделить из всего излучения, распространяющегося по ВС, то его интенсивность окажется функцией разности фаз этих двух мод, т. е. будет содержать информацию о внешних воздействиях на интерферометр.

Устройство, реализующее описанный выше метод обработки, представляет перетяжку, выполняемую посредством вытягивания разогретого участка двухмодового ВС (рис. 1). Участок световода до перетяжки (1) используется в качестве двухмодового интерферометра, после перетяжки (3) — в качестве линии для передачи отфильтрованного излучения. В области перетяжки (2) для обеспечения связи направляемых мод световод изгибается. Диаметр перетяжки выбирается достаточно малым, что необ-

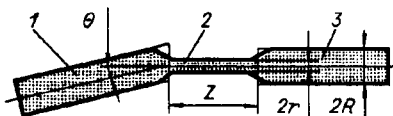


Рис. 1. Устройство обработки сигналов одноволоконного двухмодового интерферометра

ходимо для подавления всех световых волн за исключением моды низшего порядка. Мощность отфильтрованного излучения P в этом случае можно вычислить с использованием результатов [4] в приближении линейно поляризованных LP -мод:

$$P/P_0 = B_{01,01}^2 + B_{11,01}^2 + (B_{01,11}^2 + B_{11,11}^2)\exp(-\gamma Z) + 2[B_{01,01}B_{11,01} - B_{01,11}B_{11,11}\exp(-\gamma Z)]\cos(\varphi_{11} - \varphi_{01}), \quad (1)$$

где $B_{01,01} = (\eta)^{1/2} Y \exp(-X)$, $B_{11,01} = (2XY)^{1/2} Y \eta \exp(-X)$ — соответственно коэффициенты возбуждения моды LP_{01} приемного ВС модами LP_{01} и LP_{11} одноволоконного интерферометра; $B_{01,11} = (2XY\eta)^{1/2} Y \exp(-X)$, $B_{11,11} = Y^2 \times \exp(-X)$ — соответственно коэффициенты возбуждения моды LP_{11} приемного ВС модами LP_{01} и LP_{11} , $Y = 2\eta(1 + \eta)^{-1}$, $X = (\Theta/\Theta_0)^2 [2V_v(1 + \eta)]^{-1}$; Θ — угол изгиба ВС в области перетяжки; $\Theta_0 = \lambda(2\pi n_1 R)^{-1}$; λ — длина волны излучения в ВС; $\eta = r/R$; Z, r — длина и радиус перетяжки соответственно (см. рис. 1); R — радиус сердцевин ОДИ; V_v — нормированная частота излучения в ОДИ; $\varphi_{01}, \varphi_{11}$ — соответственно фазы мод LP_{01} и LP_{11} на выходе из ОДИ; γ — коэффициент затухания моды LP_{11} в области перетяжки, который может быть рассчитан [4]:

$$\gamma = \frac{4\sqrt{2\Delta}U_r^2}{\rho V_v^3 \|H_0^{(1)}(Q_i)H_2^{(1)}(Q_i)\|}, \quad (2)$$

$\Delta = \Delta n/n_1$, $\Delta n = n_1 - n_2$, n_2, n_1 — показатели преломления оболочки и сердцевин световода соответственно; $U_r = \text{Re}(U)$, $Q_i = \text{Im}(Q)$; U, Q — поперечные фазовые параметры моды LP_{11} в сердцевине и оболочке ВС в области перетяжки; $H_0^{(1)}, H_2^{(1)}$ — функции Ганкеля 1-го рода соответственно 0-го и 2-го порядков. (При выводе (1) полагалось, что моды LP_{01} и LP_{11} в ОДИ переносят одинаковую мощность — P_0 .)

Качество процесса фильтрации сигналов интерферометра можно охарактеризовать следующими параметрами: нормированной амплитудой интерференционного сигнала: $\text{amp} = (P_{\max} - P_{\min})/(2P_0)$ — и его видностью [5, 6]: $V = (P_{\max} - P_{\min})/(P_{\max} + P_{\min})$. Зависимость этих параметров от конструктивных параметров фильтров иллюстрируется рис. 2—4. На рис. 2, кривая 1 — зависимость $\text{amp}(\Theta)$, кривая 2 — $V(\Theta)$, рассчитанные для параметров перетяжки $\eta = 0,4$, $Z = 150$ мкм. На рис. 3 кривая 1 рассчитана для зависимости $\text{amp}(\eta)$, кривая 2 — для зависимости $V(\eta)$ при параметрах перетяжки

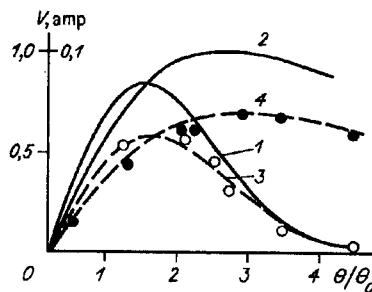


Рис. 2. Зависимость параметров качества интерференционного сигнала от угла наклона световода:

кривые 1, 2 — результаты расчетов соответственно амплитуды и видности, кривые 3, 4 — результаты экспериментального измерения соответственно амплитуды и видности

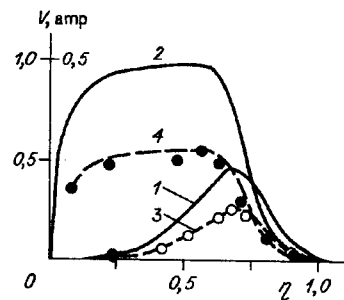


Рис. 3. Зависимость параметров качества интерференционного сигнала от приведенного диаметра перетяжки:

кривые 1, 2 — результаты расчетов соответственно амплитуды и видности, кривые 3, 4 — результаты экспериментального измерения соответственно амплитуды и видности

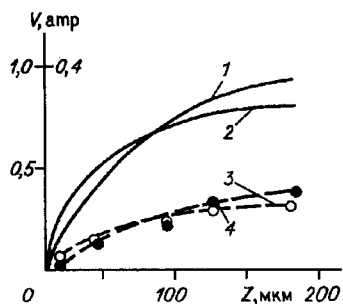


Рис. 4. Зависимость параметров качества интерференционного сигнала от длины перетяжки:

кривые 1, 2 — результаты расчетов соответственно видности и амплитуды, кривые 3, 4 — результаты экспериментального измерения соответственно видности и амплитуды

$\Theta/\Theta_0 = 2$, $Z = 150$ мкм. На рис. 4 представлены зависимости $V(Z)$ (кривая 1) и $\text{amp}(Z)$ (кривая 2), рассчитанные при параметрах перетяжки $\Theta/\Theta_0 = 2$, $\eta = 0,7$.

Из представленных результатов следует, что невозможно добиться одновременно наибольшей амплитуды и видности интерференционного сигнала. Действительно, максимум видности наблюдается в случае равенства интенсивностей интерферирующих световых пучков [6]. В рассматриваемом случае это требует выполнения условия об одинаковой эффективности возбуждения моды LP_{01} в приемном световоде модами LP_{01} и LP_{11} одноволоконного интерферометра. Данное условие выполняется только при значительных наклонах оптических осей интерферометра и приемного световода в области перетяжки, что приводит к значительным потерям мощности прошедшего излучения [5]. Это и обуславливает уменьшение амплитуды интерференционного сигнала в случае, когда его видность максимальна.

Из представленных результатов расчетов также следует, что существуют оптимальные конструктивные параметры фильтра ($\Theta = 2\Theta_0$, $\eta = 0,65$, $Z > 100$ мкм), при которых амплитуда и видность интерференционного сигнала могут быть одновременно достаточно близки к своим максимальным значениям ($V = 0,9$, $\text{amp} = 0,35$).

В настоящей работе в качестве ОДИ использовались кварцевые волоконные световоды со ступенчатым профилем показателя преломления и следующими параметрами: диаметр сердцевины 6 мкм, оболочки 135 мкм, числовая апертура 0,1. Исследуемый фильтр выполнялся методом вытягивания с последующим контролируемым изгибом разогретого участка двухмодового ВС. При проведении экспериментальных исследований излучение He—Ne-лазера ($\lambda = 0,63$ мкм) вводилось в одноволоконный двухмодовый интерферометр, на выходе которого выполнялось устройство обработки (рис. 5). Внесение разности фаз между модами интерферометра достигалось при продольном растяжении ОДИ. (При этом дополнительная разность фаз между модами LP_{01} и LP_{11} в ОДИ составляет $\varphi_{11} - \varphi_{01} = (\beta_{11} - \beta_{01})\Delta L$, где β_{01} , β_{11} — соответственно постоянные распространения мод LP_{01} и LP_{11} ; ΔL — изменение длины ОДИ [2, 4].) Полученная зависимость для фильтра с перетяжкой представлена на рис. 6. Как видно, зависимость имеет синусоидальный характер, что подтверждает полученные ранее выводы. Некоторая модуляция амплитуды синусоиды может быть объяснена поляризационными биениями светового поля моды LP_{11} , что характерно для мод высших порядков [4].

На рис. 2—4 представлены результаты измерений параметров качества получаемого интерференционного сигнала. На рис. 2, кривая 3 — зависимость $\text{amp}(\Theta)$, кривая 4 — $V(\Theta)$, полученные при параметрах перетяжки $\eta = 0,4$, $Z = 150$ мкм. На рис. 3 кривая 3 получена для зависимости $\text{amp}(\eta)$, кривая 4 — для зависимости $V(\eta)$ при параметрах перетяжки $\Theta/\Theta_0 = 2$, $Z = 150$ мкм. На рис. 4 приведены зависимости $V(Z)$ (кривая 3) и $\text{amp}(Z)$ (кривая 4), измеренные при $\Theta/\Theta_0 = 2$, $\eta = 0,7$. Из

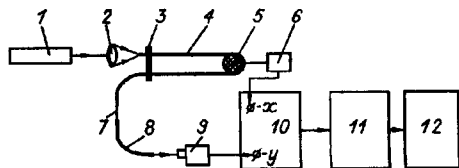
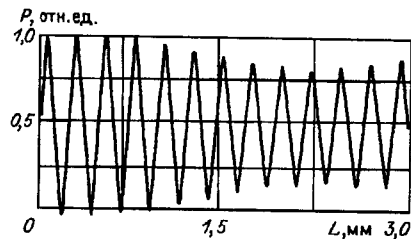


Рис. 5. Экспериментальная установка:

1 — лазер; 2 — объектив; 3 — неподвижная опора; 4 — одноволоконный двухмодовый интерферометр; 5 — подвижная опора; 6 — преобразователь «перемещение — напряжение»; 7 — устройство обработки; 8 — приемный световод; 9 — фотоприемник; 10 — двухкоординатный самописец; 11 — блок сопряжения; 12 — ЭВМ

Рис. 6. Зависимость величины отфильтрованного сигнала от удлинения одноволоконного двухмодового интерферометра



представленных на рис. 2—4 результатов видно хорошее качественное соответствие результатов расчетов и экспериментов. Снижение параметров интерференционного сигнала по сравнению с расчетными результатами может быть объяснено рассогласованием состояния поляризации взаимодействующих волн вследствие поляризационных биений моды LP_{11} в ОДИ, а также дополнительными потерями направляемого излучения в устройстве обработки из-за рассеяния света на неоднородностях, возникающих в процессе изготовления устройства при нагревании и вытягивании световодов.

Предложенный волноводный пространственный фильтр позволяет эффективно обрабатывать сигнал межмодовой интерференции, формируемый одноволоконными двухмодовыми интерферометрами, что дает возможность широкого использования этого типа интерферометров для приема параметров физических полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусурин Б. И., Семенов А. С., Удалов Н. П. Оптические и волоконно-оптические датчики // Квантовая электрон. 1985. 12, № 5.
2. Беловолов М. И., Витрик О. Б., Дианов Е. М. и др. Модуляция фазы и поляризации мод в маломодовом волоконном световоде // Квантовая электрон. 1990. 17, № 1.
3. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
4. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Мир, 1987.
5. Унгер Х. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 26 мая 1995 г.