

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДОВЫХ ФИЛЬТРОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

В представительном ряде конструкций волоконно-оптических датчиков физических величин ведущее место обоснованно занимают датчики микроперемещений [1]. Известные достоинства амплитудных датчиков на многомодовых волокнах не случайно привлекают внимание исследователей к поиску путей расширения функциональных возможностей таких датчиков [2,3]. Особый интерес для ряда прикладных задач, в частности при создании гибких автоматизированных производств, представляют датчики позиционирования, обеспечивающие выставление (позиционирование) того или иного объекта в заданной точке пространства не по абсолютному (измеряемому со значительной погрешностью), а по экстремальному значению интенсивности излучения, прошедшего через волоконно-оптический датчик. В рамках настоящей работы излагаются результаты исследования возможности создания перестраиваемых амплитудных многомодовых датчиков позиционирования, позволяющих без изменения конструкции датчика изменять координаты точки позиционирования путем отдельного возбуждения и селекции мод используемых в датчике световодов.

Рассмотрим общую схему амплитудного датчика с фокусирующим элементом (линза, сферическое зеркало), приведенную на рис. 1. Фокусирующий элемент 3, жестко связанный с перемещающимся объектом, оптически связывает два многомодовых градиентных световода (1,2) с различным градиентным параметром ω . Торцы световодов удалены от фокусирующего элемента с фокусным расстоянием f на различные расстояния a и b , а оптические оси световодов за счет смещения фокусирующего элемента смещены относительно его оптической оси на расстояния Δ_1 и Δ_2 соответственно. Определим зависимость коэффициентов связи различных мод возбуждающего (1) и приемного (2) световодов от вышеупомянутых параметров для двумерного случая (в связи с очевидной факторизуемостью задачи переход к трехмерному случаю осуществим ниже).

Если $\psi_i(x_i)$ - поле в плоскости $z = 0$ (то есть в выходной плоскости световода 1), то в плоскости $z = a + b$ поле $\psi(x, z = a + b)$ описывается соотношением [4]

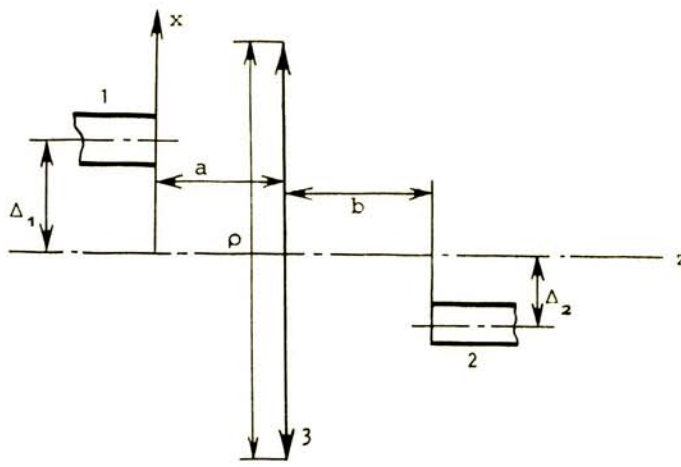


Рис. 1

$$\psi(x) = \frac{\sqrt{\pi} e^{i\frac{3}{4}\pi}}{\lambda\sqrt{aba}} e^{-ik(a+b)} \cdot e^{-i\frac{k}{2f}\rho^2} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_i(x_i) \times \exp \left\{ -\frac{ik}{2} \left[\frac{x_i^2}{a} + \frac{x^2}{b} + \frac{k}{2a} \left(\frac{x_i}{a} + \frac{x}{b} \right)^2 \right] \right\} dx_i. \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \lambda & - \text{длина волны;} \\ k & = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \rho - \text{диаметр линзы;} \\ \alpha & = -\frac{k}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{1}{f} \right). \end{aligned}$$

Для расчета коэффициентов связи мод удобно использовать формализм когерентных состояний, развитый в работе [5]. Если $\psi_i(x_i)$ - когерентное состояние $|\beta\rangle$, описывающее гауссов пучок в световоде,

$$\psi_i(x_i) = \left(\frac{k\omega_1}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \exp \left\{ -\frac{k\omega_1}{2}(x_i - \Delta_1)^2 + \sqrt{2k\omega_1}\beta(x_i - \Delta_1) - \frac{|\beta|^2 + \beta^2}{2} \right\}, \quad (2)$$

то после интегрирования в (1) получаем

$$\begin{aligned} \psi(x) & = \frac{\sqrt{\pi} e^{i\frac{3}{4}\pi}}{\lambda\sqrt{aba}} \sqrt{\frac{\pi}{P_1}} \left(\frac{k\omega_1}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \exp \left\{ -ik \left(a + b + \frac{\rho^2}{2f} \right) \right\} \exp \left\{ -\frac{|\beta|^2 + \beta^2}{2} \right\} \times \\ & \times \exp \left\{ -\frac{k\omega_1}{2} \Delta_1^2 - \sqrt{2k\omega_1}\beta\Delta_1 \right\} \cdot \exp \left\{ -\frac{ik}{2} \left(\frac{1}{b} + \frac{k}{2ab^2} \right) x^2 + \right. \\ & \left. + \frac{1}{4P_1} \left(\frac{ik^2}{2aab} - \sqrt{2k\omega_1}\beta - k\omega_1\Delta_1 \right)^2 \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$P = \frac{k\omega_1}{2} + \frac{ik}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{k}{2ab^2} \right). \quad (4)$$

Интегралы перекрытия с когерентным состоянием второго световода

$$|\gamma'\rangle = \left(\frac{k\omega_2}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \exp \left\{ -\frac{k\omega_2}{2}(x - \Delta_2)^2 + \sqrt{2k\omega_2}\gamma'(x - \Delta_2) - \frac{|\gamma'|^2 + \gamma'^2}{2} \right\} \quad (5)$$

имеют вид

$$\langle \gamma' | \beta \rangle = (k \sqrt{\omega_1 \omega_2})^{\frac{1}{2}} \frac{e^{i\frac{1}{2}\pi}}{\lambda \sqrt{ab\alpha p_1 p_2}} \exp \left\{ -ik \left(a + b + \frac{\rho^2}{2f} \right) \right\} \times$$

$$\times \exp \left\{ \frac{\beta^2 + \gamma'^2 + |\beta|^2 + |\gamma'|^2}{2} \right\} \cdot \exp \left\{ -\frac{k}{2} (\omega_1 \Delta_1^2 + \omega_2 \Delta_2^2) - \right.$$

$$\left. - \sqrt{2k\omega_1} \beta \Delta_1 - \sqrt{2k\omega_2} \gamma' \Delta_2 + \frac{1}{4p_1} (\sqrt{2k\omega_1} \beta + k\omega_1 \Delta_1)^2 \right\} \times \exp \left\{ \frac{q^2}{4p_2} \right\}, \quad (6)$$

где

$$p_2 = \frac{k\omega_2}{2} + \frac{ik}{2} \left(\frac{1}{b} + \frac{k}{2ab^2} \right) + \frac{k^4}{16p_1 \alpha^2 a^2 b^2}, \quad (7)$$

$$q = \frac{ik^2 (\sqrt{2k\omega_1} \beta + k\omega_1 \Delta_1)}{4p_1 \alpha ab} - k\omega_2 \Delta_2 - \sqrt{2k\omega_2} \gamma'^*. \quad (8)$$

После подстановки (8) в (6) и сравнения с производящими функциями полиномов Эрмита от двух переменных получаем в явном виде значения интегралов перекрытия между модами $|m\rangle$ первого и модами $|n'\rangle$ второго световодов:

$$T_m^{n'} = T_0^o(m!n'!)^{-\frac{1}{2}} H_{mn'}(c^{-1}, \sigma_1, \sigma_2). \quad (9)$$

Здесь

$$c = \begin{pmatrix} 1 + \frac{k^5 \omega_1}{p_2 (4p_1 \alpha ab)^2} - \frac{k\omega_1}{p_1} & \frac{ik^3 \sqrt{\omega_1 \omega_2}}{4p_1 p_2 \alpha ab} \\ \frac{ik^3 \sqrt{\omega_1 \omega_2}}{4p_1 p_2 \alpha ab} & 1 - \frac{k\omega_2}{p_2} \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\sigma_1 = \frac{k\omega_1 \sqrt{2k\omega_1} \Delta_1}{2p_1} - \sqrt{2k\omega_1} \Delta_1 - \frac{ik^3 \sqrt{2k\omega_1} \omega_2 \Delta_2}{8p_1 p_2 \alpha ab} - \frac{k^5 \sqrt{2k\omega_1} \omega_1 \Delta_1}{2p_1 (4p_1 \alpha ab)^2}; \quad (11)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{2k\omega_2} \Delta_2 \left(\frac{2k\omega_2}{4p_2} - \alpha \right) - ik^3 \frac{\sqrt{2k\omega_2} \omega_1 \Delta_1}{8p_1 p_2 \alpha ab}; \quad (12)$$

$$T_0^o = \left(\frac{k\sqrt{\omega_1 \omega_2}}{p_1 p_2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{e^{i\frac{1}{2}\pi}}{\lambda \sqrt{ab\alpha}} \exp \left\{ -ik \left(a + b + \frac{\rho^2}{2f} \right) \right\} \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{k}{2} (\omega_1 \Delta_1^2 + \omega_2 \Delta_2^2) + \frac{(k\omega_1 \Delta_1)^2}{4p_1} + \frac{(k\omega_2 \Delta_2)^2}{4p_2} - \right.$$

$$\left. - \frac{k^4 (k\omega_1 \Delta_1)^2}{4p_2 (4p_1 \alpha ab)^2} - \frac{ik^4 \omega_1 \omega_2 \Delta_1 \Delta_2}{8p_1 p_2 \alpha ab} \right\}. \quad (13)$$

В том числе для фундаментальных мод

$$T_0^{n'} = T_0^o(n'!)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{2} - \frac{k\omega_2}{2p_2} \right)^{\frac{n'}{2}} \cdot H_{n'}(\tau_1), \quad (14)$$

$$T_m^o = T_0^o(m!)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{2} - \frac{k\omega_1}{2p_1} + \frac{k^5 \omega_1}{(4p_1 \alpha ab)^2 2p_2} \right]^{\frac{m}{2}} \cdot H_m(\tau_2), \quad (15)$$

где

$$\tau_1 = \frac{\sigma_2}{2\sqrt{(1/2) - k\omega_2/2p_2}}, \quad (16)$$

$$\tau_2 = \frac{\sigma_1}{2\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{k^5 \omega_1}{2p_2 (4p_1 \alpha ab)^2} - \frac{k\omega_1}{2p_1}}}. \quad (17)$$

Коэффициенты связи между модами определяются как

$$W_m^{n'} = |T_m^{n'}|^2.$$

Все полученные выражения, начиная с (1), имеют сингулярность при $\alpha = 0$.

Повторение вышеприведенных выкладок для этого случая позволяет определить значения интегралов перекрытия в виде

$$\tilde{T}_m^{n'} = \tilde{T}_0^o (m!n'!)^{-\frac{1}{2}} \cdot H_{mn}(\tilde{c}^{-1}, \tilde{\sigma}_1^*, \tilde{\sigma}_2), \quad (18)$$

где

$$\tilde{c} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{k\omega_1 a^2}{p_0 b^2} & \frac{k\sqrt{\omega_1 \omega_2} a}{p_0 b} \\ \frac{k\sqrt{\omega_1 \omega_2} a}{p_0 b} & 1 - \frac{k\omega_2}{p_0} \end{pmatrix}; \quad (19)$$

$$p_0 = \frac{k\omega_1}{2} - \frac{a^2}{b^2} + \frac{k\omega_2}{2} - \frac{ik}{2f} \cdot \frac{a}{b}; \quad (20)$$

$$\tilde{\sigma}_1 = \frac{\sqrt{2k\omega_2^3} \Delta_2}{4p_0} - \sqrt{2k\omega_1} \Delta_1 - \frac{k\omega_2 \sqrt{2k\omega_1} a \Delta_2}{2p_0 b}; \quad (21)$$

$$\tilde{\sigma}_2 = \frac{\sqrt{2k\omega_2^3} \Delta_2}{4p_0} - \frac{k\omega_1 \sqrt{2k\omega_2} a \Delta_1}{2p_0 b} - \sqrt{2k\omega_2} \Delta_2; \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \tilde{T}_0^o &= i \left(\frac{ak\sqrt{\omega_1 \omega_2}}{p_0 b} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left\{ -ik \left(a + b + \frac{p_0^2}{2f} \right) \right\} \times \\ &\times \exp \left\{ -\frac{k}{2} (\omega_1 \Delta_1^2 + \omega_2 \Delta_2^2) + \frac{k^2 \omega_1^2 \Delta_1^2 a^2}{4p_0 b^2} + \frac{(k\omega_2 \Delta_2)^2}{4p_0} - \frac{k^2 \omega_1 \omega_2 a \Delta_1 \Delta_2}{2p_0 b} \right\}. \end{aligned} \quad (23)$$

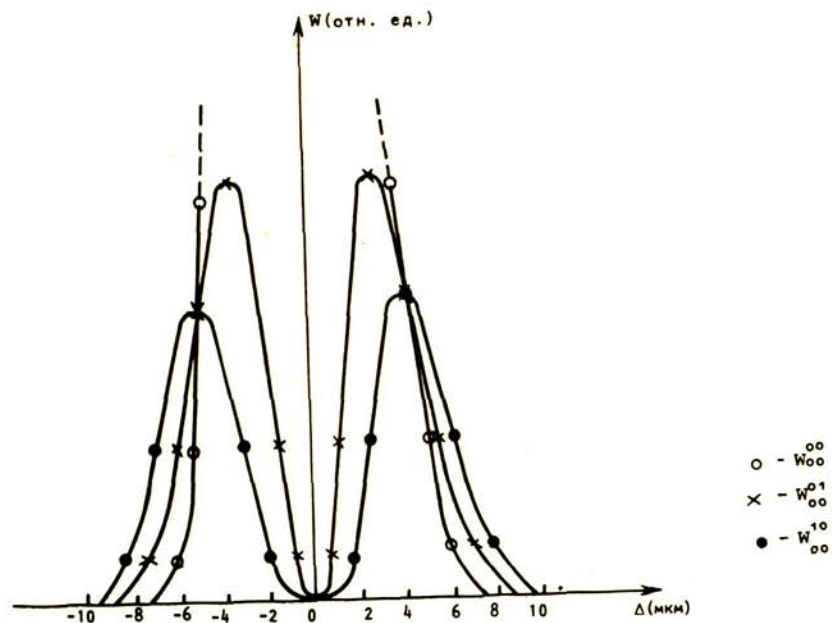
И, соответственно,

$$\left. \begin{aligned} \tilde{T}_0^{n'} &= \tilde{T}_0^o (n'!)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{k\omega_2}{2p_0} \right)^{\frac{n'}{2}} \cdot H_{n'}(\tilde{\tau}_1), \\ \tilde{T}_m^o &= \tilde{T}_0^o (m!)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{k\omega_1 a^2}{2p_0 b^2} \right) \cdot H_m(\tilde{\tau}_2), \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$\tilde{\tau}_1 = \frac{\tilde{\sigma}_2}{2\sqrt{\frac{1}{2} - \frac{k\omega_2}{2p_0}}}; \quad \tilde{\tau}_2 = \frac{\tilde{\sigma}_1}{2\sqrt{\frac{1}{2} - \frac{k\omega_1 a^2}{2p_0 b^2}}}. \quad (25)$$

Аналогичное решение имеет рассматриваемая задача для мод Гаусса-Эрмита по координате y , а моды Гаусса-Лагерра $U(x, \varphi)$ и, соответственно, коэффициенты связи могут быть получены из мод Гаусса-Эрмита по известным соотношениям [4].

На рис. 2 приведены графики зависимости коэффициентов связи трех низших мод Гаусса-Лагерра приемного световода с фундаментальной модой возбуждающего световода, полученные для распространенных световодов с диаметром сердцевины 50 мкм, $p_0 = 1,45$, $\omega_1 = \omega_2 = 10^{-2} \cdot 1/\text{мкм}$, при $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$, $a = b = 2f$. Случай возбуждения и детектирования фундаментальной моды характеризуется кривой с одним максимумом (точкой позиционирования) в начале координат; при этом крутизна кривой по сравнению с традиционным случаем возбуждения и детектирования одновременно всех мод [1] существенно возросла (полуширина кривой около 6 мкм и более 40 мкм соответственно). При селективировании на выходе приемного световода мод LP_{01} и LP_{10} наблюдаются симметричные максимумы коэффициента связи при смещениях объекта на рас-



стояние $-3,18$ мкм и $-4,37$ мкм соответственно и нулевым значениям в начале координат.

Таким образом, выбирая для детектирования ту или иную моду, возбуждаемую в приемном световоде, можно смещать с некоторым шагом точку позиционирования датчика, не изменяя его конструкции (отметим, что при детектировании мод высших порядков возможно получение наборов экстремумов для одной моды при разных смещениях). Весьма примечательным представляется и тот факт, что на одном измеряемом интервале перемещений (например, от 0 до $3,18$ мкм) кривые, описывающие возбуждение различных мод (LP_{00} и LP_{01} в простейшем случае), имеют различный знак крутизны и различное абсолютное значение крутизны. Следовательно, суммируя с различным весом на одном фотоприемнике световые потоки, соответствующие хотя бы двум выделяемым модам, может быть также получен датчик не с одним максимумом, а с набором экстремумов разного уровня, то есть датчик позиционирования с набором рабочих точек. Наконец, обеспечивая возможность изменения веса при суммировании мод на фотоприемнике, мы получаем плавно регулируемый датчик позиционирования, то есть датчик, на выходе которого измеряемое значение интенсивности излучения достигает максимума в точке пространства, координаты которой определяются выбранными для детектирования модами и весовым коэффициентом их суммирования. Так, суммирование сигналов, соответствующих модам LP_{00} и LP_{01} при изменении веса суммирования моды LP_{00} (например, введением в пучок соответствующих этой моде калиброванных светофильтров с оптической плотностью от 0 до 4) позволяет перемещать точку позиционирования в интервале $0-3,18$ мкм.

Экспериментальное исследование зависимости коэффициентов связи мод низших порядков, проведенное с использованием синтезированных на ЭВМ модовых фильтров [6], не выявило заметных отклонений реально наблюдаемых значений коэффициентов связи от расчетных. Таким образом, есть все основания утверждать, что использование модовых фильтров, в том числе составных модовых фильтров (фильтров 2^x и более мод на одном носителе) позволит существенно расширить функциональные возможности амплитудных волоконно-оптических датчиков позиционирования.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Волоконная оптика и приборостроение / Под общ. ред. М.М. Бутусова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1987.
 2. Маевский С.М., Назаров В.Д., Петрик В.Ф. Письма ЖТФ, 1982, т. 8, с. 284.
 3. Кривошлыков С.Г., Сисакян И.Н. Квантовая электроника, 1987, т. 14, с. 481.
 4. Маркузе Д. Оптические волноводы. М.: Мир, 1974.
 5. Кривошлыков С.Г., Сисакян И.Н. Квантовая электроника, 1980, т. 7, с. 553.
 6. Голуб М.А., Карпеев С.В., Кривошлыков С.Г., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. Квантовая электроника, 1983, т. 10, с. 1700.
-