

07

© 1992

## ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ БИЕНИЙ МОД ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ВОЗМУЩЕНИИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

О.И. К о г о в, О.Л. М а р у с о в,  
В.М. Н и к о л а е в, В.Ю. П е т р у н ь к и н,  
В.Н. Ф и л и п п о в

### 1. В в е д е н и е

Большинство применений волоконных световодов в когерентных оптических устройствах требует знания спектра мод, их постоянных распространения  $\beta_i$  или их разностей

$$\Delta\beta_{ik} = (\beta_i - \beta_k) = \frac{2\pi}{\Lambda_{ik}},$$

где  $\Lambda_{ik}$  — г.н. длина волны биений мод  $E_i$  и  $E_k$ . Известны различные методы измерения  $\Delta\beta_{ik}$  [1-4]. Однако, на наш взгляд, они сложны в реализации или не дают прямых измерений искомым величин.

В данной работе представлены экспериментальные результаты измерений длины волны биений мод и развита простая теоретическая модель на основе локального возмущения световода, перемещаемого вдоль волокна и приводящего к связи распространяющихся мод (рис. 1). Идеологически эта работа близка [5], где с помощью перемещаемого локального воздействия измерялось двулучепреломление одномодового волоконного световода.

Суть измерений, как и в работе [5], легко понять из следующих рассуждений. Пусть в двухмодовом волноводе возбуждена одна мода. В малой области возмущающего воздействия за счет эффекта связи мод появляется вторая мода. Результат их интерференции

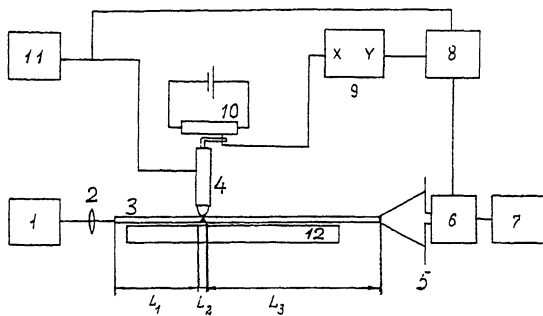


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки. 1 - газовый лазер ( $\lambda = 0.63$  мкм), 2 - микрообъектив, 3 - волоконный световод, 4 - пьезокерамический модулятор, 5 - диафрагма, 6 - фотоприемное устройство, 7 - спектроанализатор, 8 - синхронный детектор, 9 - двухкоординатный самописец, 10 - прецизионный потенциометр, 11 - низкочастотный генератор, 12 - основание.

на выходном торце волокна зависит от длины отрезка  $L_3$  после участка возмущения. При этом пространственное распределение интенсивности света в интерференционной картине повторяется через интервал  $\Delta_{12} = \frac{2\pi}{\beta_1 - \beta_2}$ . Изменяя положение модулятора, т.е. длину  $L_3$ , и наблюдая картину интерференции мод, можно измерить  $\Delta_{12}$ .

## 2. Теоретический анализ

Будем рассматривать двухмодовое изотропное волокно длиной  $L$ , возбуждаемое когерентным источником света с частотой  $\omega$ . Для расчета излучения на выходе световода воспользуемся матричным методом и будем представлять световод состоящим из трех участков с постоянными коэффициентами связи мод на каждом участке. Тогда поле на выходе световода можно представить в виде:

$$E_{\text{вых}} = M_3 M_2 M_1 E_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где  $M_1$  - матрица передачи участка световода длиной  $L_1$ , и коэффициентом связи мод  $K_1 = 0$ ;  $M_2$  - матрица передачи участка световода длиной  $L_2$ , и коэффициентом связи мод  $K_2 = f K$  (считаем, что возмущение вызывает только связь двух направляемых мод и не приводит к связи с излучательными модами и потерям);  $M_3$  - матрица для участка  $L_3$  с  $K_3 = 0$ ;

$E_{\text{вх}} = \begin{vmatrix} A_0 \\ B_0 \end{vmatrix}$  - вектор-столбец амплитуд мод на входе световода;

$E_{\text{вых}} = \begin{vmatrix} A_1 \\ B_1 \end{vmatrix}$  - вектор-столбец комплексных амплитуд мод на выходном торце световода длиной  $L$ .

Матрицы передачи различных участков волокна легко построить на основе результатов задачи связи двух мод с постоянным коэффициентом связи [6]:

$$M_1 = \begin{vmatrix} e^{-j\beta_1 L_1} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta_2 L_1} \end{vmatrix}, \quad M_3 = \begin{vmatrix} e^{-j\beta_1 L_3} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta_2 L_3} \end{vmatrix},$$

$$M_2 = \begin{vmatrix} e^{-j\beta_1 L_2 - j\frac{\Delta L_2}{2}} \cdot (\cos \beta L_2 + j\frac{\Delta}{2\beta} \sin \beta L_2); & j\frac{k}{\beta} \sin \beta L_2 e^{-j\beta_1 L_2 - j\frac{\Delta L_2}{2}} \\ j\frac{k}{\beta} \sin \beta L_2 e^{-j\beta_2 L_2 + j\frac{\Delta L_2}{2}}; & e^{-j\beta_2 L_2 + j\frac{\Delta L_2}{2}} \cdot (\cos \beta L_2 - j\frac{\Delta}{2\beta} \sin \beta L_2) \end{vmatrix},$$

где  $\beta_{1,2}$  — постоянные распространения мод

$$\Delta = \beta_1 - \beta_2, \quad \beta = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta^2 + 4k^2}.$$

Выполнив операции перемножения матриц и найдя коэффициенты  $A_1$  и  $B_1$ , поле на выходном торце световода можно представить в виде:

$$\varepsilon_{\text{вых}}(r, \varphi, z) = A_1(z) E_1(r, \varphi) + B_1(z) E_2(r, \varphi), \quad (3)$$

где  $E_{1,2}(r, \varphi)$  — функции мод, зависящие от поперечных координат в сердцевине световода. Коэффициенты  $A_1$  и  $B_1$  являются комплексными функциями параметров волокна, коэффициента связи  $K$  и длин участков  $L_{1,2,3}$ . Интенсивность света на выходном торце световода в точке с координатами  $(r, \varphi)$  определяется:

$$\begin{aligned} I_{\text{вых}}(r, \varphi) &= \varepsilon_{\text{вых}} \cdot \varepsilon_{\text{вых}}^* = |A_1|^2 E_1^2 + |B_1|^2 E_2^2 + E_1 E_2 (A_1^* B_1 + A_1 B_1^*) = \\ &= E_1^2 [A_0^2 - 2A_0 B_0 \frac{k}{\beta} \sin \beta L_2 \sin(\Delta L_1 - \beta L_2)] + \\ &+ E_2^2 [B_0^2 + 2A_0 B_0 \frac{k}{\beta} \sin \beta L_2 \sin(\Delta L_1 - \beta L_2)] + \\ &+ 2E_1 E_2 [A_0 B_0 \cos(\Delta L) + \frac{k}{\beta} (A_0^2 - B_0^2) \sin \beta L_2 \times \\ &\times \sin(\Delta L_3 + (2\Delta - \beta)L_2)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) видно, что при регистрации интенсивности света „в точке“ в выходном излучении волновода появляются составляющие, пропорциональные отношению  $k/\beta$  и зависящие от положения модулятора на световоде, т.е. от  $L_1$  и  $L_3$ .

При приеме всего излучения световода влияние положения модулятора исчезает с учетом ортонормированности мод:

$$I_{Bbix} = \int_{S_0} I_{Bbix}(r, \varphi) dS = A_0^2 + B_0^2 = I_0, \quad (5)$$

где  $I_0$  – интенсивность на входе световода (потери не учитывались),  $S_0$  – поперечное сечение световода.

### 3. Эксперимент

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Излучение газового лазера 1 с помощью микрообъектива 2 вводилось в волоконный световод 3, часть которого была закреплена на твердом основании 12. Для работы схемы по переменному току применяли модуляционную методику и синхронное детектирование. Для этого на пьезокерамический модулятор 4 подавали напряжение с частотой 17 кГц от генератора 11. На одном торце модулятора прикреплялся металлический цилиндр диаметром 5 мм, обеспечивавший локальное возмущение световода. Пьезокерамика была закреплена на микроподвижке. С помощью прецизионного потенциометра 10 вырабатывался сигнал о положении модулятора и подавался на X-вход самописца 9. Фотоприемное устройство 6 с диафрагмой 5 регистрировало часть излучения световода на частоте модуляции 17 кГц. После синхронного детектора 8 сигнал подавался на Y-вход самописца 9. Амплитуда модулирующего напряжения от генератора 11 подбиралась таким образом, чтобы полезный сигнал, зависящий от положения модулятора был достаточно большим, но не появился бы еще сигнал обычной дифференциальной фазовой модуляции [7]. Как правило, это соответствовало амплитуде колебаний модулятора  $\sim 1-3$  мкм.

На рис. 2 представлены результаты экспериментов для различных волокон. В случае двухмодового волокна наблюдался регулярный по форме близкий синусоидальному сигнал пульсаций интенсивности с периодом  $\Lambda_{12} = 360$  мкм. Для многомодового градиентного волоконного световода получали сигнал сложной формы (рис. 2, б, в). Однако характер сигнала значительно менялся при изменении условий ввода излучения в световод. Так, при центральной нормальной настройке входного пучка света, когда на выходе наблюдались крупные пятна картины интерференции мод, средний период пульсаций был равен  $\sim 400$  мкм (рис. 2, б). При периферийном возбуждении сердцевин градиентного волокна уменьшался размер пятен и средний период пульсаций  $\sim 160$  мкм (рис. 2, в). Применявшиеся волокна имели только первичное покрытие.

### 4. Заключение

Проведенные эксперименты и теоретический анализ показывают принципиальную возможность прямого измерения длины волны биений мод в волоконных световодах. В случае многомодовых волокон представляется целесообразным проведение Фурье-анализа сигнала с целью нахождения спектра  $\Lambda_{ik}$ , и, соответственно,  $(\beta_i - \beta_k)$ .

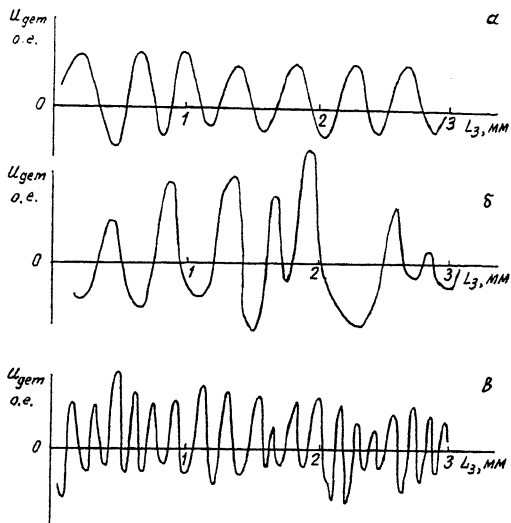


Рис. 2. Зависимость сигнала от положения модулятора. а - двухмодовый световод; б - многомодовый световод, нормальный ввод (крупные пятна); в - многомодовый световод, периферийный ввод (мелкие пятна).

Необходимо отметить, что для успешной реализации описанного метода нужно обеспечить слабое и хорошо локализованное воздействие на световод. По нашим оценкам, постоянное давление модулятора на волокно имело величину  $\approx 30$  грамм при размерах „пятна контакта“  $\approx 50$  мкм. Очевидно, что приведенные величины существенно меньше аналогичных в работе [5] для измерения поляризационных биений. Это отличие условий экспериментов позволяет отделить „фазовые“ возмущения в данной работе от „поляризационных“ возмущений.

Результаты работы представляются полезными при разработке волоконно-оптических датчиков, линий сбора данных, в метрологических устройствах.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] B l a n k e J.N., K i m B.Y., S h a w H.J. // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 389-391.
- [2] S o r i n W.U., K i m B.Y., S h a w H.J. // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 106-108.
- [3] Б а б к и н а Т.В., Г р и г о р ь я н ц В.В., С м и р н о в В.Б. Частотно-импульсные характеристики волоконных

световодов. (Итоги науки и техники, ВИНТИ, серия „Радиотехника“. 1982 г.). Т. 29. С. 3-46.

- [4] Котлов О.И., Марусов О.Л., Николаев В.М. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 7. С. 48-52.
- [5] Браун С.С. // SPIE. 1987. V. 841. P. 367-375.
- [6] Яри в А., Ю х П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.
- [7] Котлов О.И., Петрунькин В.Ю., Соколова С.Л., Филиппов В.Н. Исследование фазовой модуляции когерентного излучения в длинных волоконных многомодовых световодах. // ЖТФ. 1982. Т. 52. В. 11. С. 2202-2206.

С.-Петербургский  
государственный  
технический  
университет

Поступило в Редакцию  
13 марта 1992 г.