

07

## Спектрополяриметрия многомодовых кварцевых волокон в ИК-диапазоне длин волн

© Д.А. Дмитриев, В.Т. Прокопенко

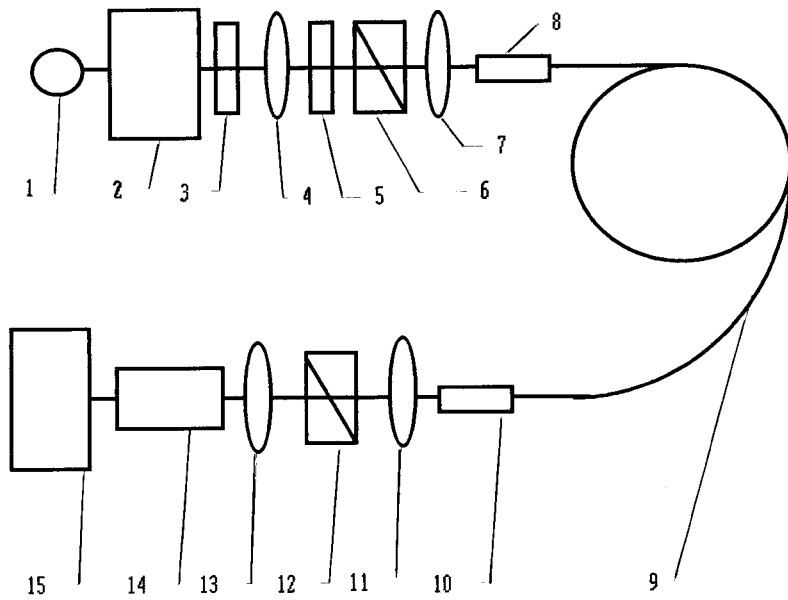
С.-Петербургский институт точной механики и оптики  
(технический университет)

Поступило в Редакцию 16 сентября 1997 г.

В окончательной редакции 20 апреля 1998 г.

Представлены результаты экспериментальных спектрополяриметрических исследований многомодовых волоконных световодов с диаметром сердцевины от 65 до 404  $\mu\text{m}$  в ИК-диапазоне длин волн (0,8, 1,3, 1,55  $\mu\text{m}$ ). Предложено теоретическое объяснение полученных результатов.

Многомодовые волоконные световоды (ВС) значительно уступают одномодовым световодам по параметрам широкополосности и оптических потерь, тем не менее они обладают несомненными преимуществами при их использовании в системах передачи и обработки информации малой протяженности, например бортового и объектового назначения. Достоинства многомодовых ВС являются высокая эффективность ввода–вывода излучения в световод, технологичность выполнения микрооптических устройств на их основе, низкая стоимость. Полноценное практическое использование многомодовых ВС требует знания их поляризационных характеристик в ИК-диапазоне длин волн 0,8–1,55  $\mu\text{m}$ , соответствующем минимальным потерям излучения в кварцевых ВС и рабочим длинам волн высокомошных полупроводниковых источников света. Важные результаты по поляризационным свойствам многомодовых волокон были получены в ряде теоретических и экспериментальных работ [1–7]. Однако систематических спектрополяриметрических исследований многомодовых ВС в широком участке ИК-диапазона волн до последнего времени не проводилось. Ниже представлены результаты измерений деполяризующих свойств многомодовых ВС в диапазоне длин волн 0,8–1,55  $\mu\text{m}$  и предложено теоретическое истолкование полученных результатов.



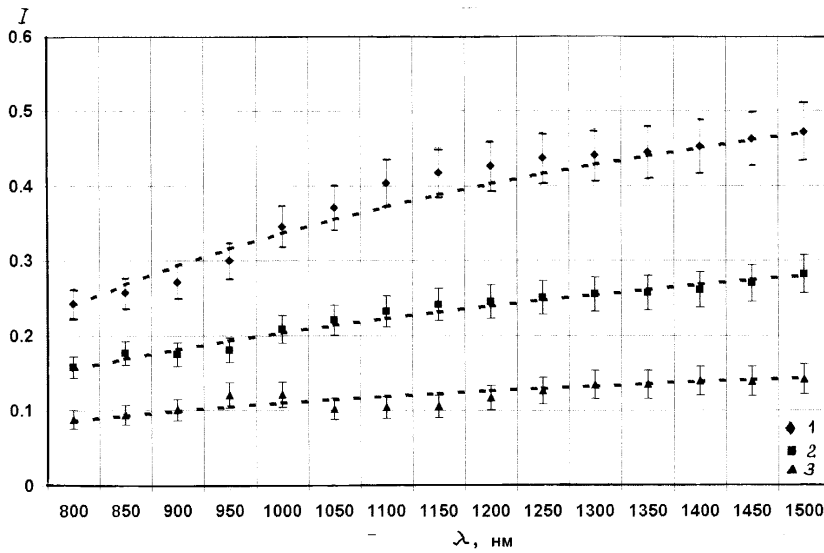
**Рис. 1.** Схема измерительного стенда для спектрополяризметрических исследований волоконных световодов: 1 — источник света; 2 — монохроматор; 3 — модулятор светового потока; 4 — коллимирующая линза; 5 — "отрезающий" второй порядок ИК-светофильтр; 6 — линейный поляризатор (Глана); 7 — микрообъектив (ввод излучения); 8 — адаптер (установленный на микропозиционере); 9 — волоконный световод; 10 — адаптер; 11 — микрообъектив; 12 — анализатор (призма Глана); 13 — фокусирующая линза; 14 — фотоприемник (германиевый фотодиод с электронным предусилителем); 15 — измеритель уровня выходного сигнала.

Схема экспериментальной установки для спектрополяризметрических исследований многомодовых ВС показана на рис. 1. Линейно-поляризованное ИК-излучение вводится в ВС посредством микрообъектива 7. Степень поляризации излучения на выходе световода измеряется по обычной методике при вращении анализатора 12. В качестве исследуемых образцов были выбраны кварцевые многомодовые ВС со ступенчатым профилем показателя преломления длиной от 16.4 до

1098 см. Сердцевина ВС диаметром от 65 до 400  $\mu\text{m}$  выполнена на основе боросиликатного стекла, относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки ВС составила 0.3–0.5%, числовая апертура световодов находилась в пределах 0.30–0.55.

Положение азимута преимущественной линейной поляризации частично-поляризованного света на выходе ВС, как подтвердили эксперименты, однозначно определяется азимутом поляризации вводимого излучения. В экспериментах фактически измерялась интегральная степень  $P$  поляризации излучения на выходе ВС, полученная при усреднении поляризационных параметров мод световода по его полному сечению. Поляризация света в каждой точке поперечного сечения многомодового ВС является результатом суперпозиции большого числа (нескольких сотен) направляемых векторных мод световода. Строгое теоретическое описание таких сложных волновых полей требует использования формализма случайных функций, характеризующих параметры Стокса излучения в разных областях сечения световода. В настоящей работе при анализе степени  $P$  поляризации мы исходили из экспериментально установленного факта, что при возбуждении многомодового световода линейно-поляризованным светом преобладающее число мод излучения на выходе световода характеризуется именно линейной частичной поляризацией [3]. Если поляризованная компонента излучения в пределах отдельной моды имеет эллиптическую поляризацию с параметром эллиптичности  $\gamma = (1 - e^2)/(1 + e^2)$  ( $e$  — отношение малой и большой полуосей эллипса поляризации), измеряемая величина  $P = \gamma \cdot P_R$ , где  $P_R$  — действительная степень поляризации света. Согласно [4], в многомодовых ВС величина  $\gamma \approx 1$ , следовательно, экспериментально измеряемая величина  $P$  определяет по крайней мере нижний предел действительного значения степени поляризации  $P_R$ .

Экспериментальные спектральные зависимости степени поляризации излучения на выходе многомодовых ВС различных типов (длина 165 mm) при возбуждении их линейно-поляризованным светом от теплового источника показаны на рис. 2. При повторных измерениях данные экспериментов отличались хорошей воспроизводимостью. Для большинства исследованных образцов ВС характерна тенденция возрастания степени поляризации излучения на выходе ВС по мере увеличения длины волны. Не строго монотонный характер зависимости  $P(\lambda)$  свидетельствует о сложном процессе формирования поляризационной структуры излучения в многомодовых световодах, при котором важ-



**Рис. 2.** Экспериментальные и расчетные зависимости степени поляризации  $I$  от длины волны для волокон различного диаметра длиной 165 мм. Расчетные кривые представлены пунктирными линиями. Экспериментальным данным соответствуют обозначения: 1 — 65  $\mu\text{m}$ , 2 — 187  $\mu\text{m}$ , 3 — 318  $\mu\text{m}$ .

ную роль должно играть взаимодействие направляемых мод световода, обусловленное дефектами его структуры и рассеянием излучения в объеме сердцевины волокна.

Возрастание степени поляризации излучения при увеличении длины волны в первом приближении можно объяснить на основе следующей простой физической модели деполаризации света в ВС. Изменение  $dI$  мощности полностью поляризованной составляющей излучения на длине  $dL$  световода пропорционально величине  $\Delta N$  флуктуаций числа направляемых мод световода:

$$dI \sim -I \cdot \Delta N \cdot dL. \quad (1)$$

Полагая, что для теплового излучения выполняется известное соотношение  $\Delta N \equiv \sqrt{N}$ , где число мод  $N = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} (NA)^2$  ( $NA$  — числовая апертура

волокна,  $a$  — радиус сердцевины,  $\lambda$  — длина волны света), степень  $P$  поляризации света на выходе световода длиной  $L$  равна

$$P = C_1 \exp \left\{ -C_2 \frac{\pi a \sqrt{2}}{\lambda} (NA) \right\} + C_3, \quad (2)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  — постоянные. Расчетные функции  $P(\lambda)$ , согласно (2), построенные для экспериментальных значений  $a, NA$  и  $I$ , показаны на рис. 2 штриховыми линиями. Постоянные  $C_1, C_2, C_3$  приведены в табл. 1. Очевидно, формула (2) правильно описывает тенденцию возрастания степени поляризации света по мере роста длин волн  $\lambda$ . Более детальный теоретический анализ деполяризации света в многомодовых световодах позволит определить в более точном приближении зависимости коэффициентов  $C_1, C_2, C_3$  от геометрических параметров ВС, а также от длины волны излучения, что должно обеспечить лучшее соответствие экспериментальных и расчетных данных.

Представляет интерес вопрос о влиянии степени когерентности источника света на деполяризацию излучения в многомодовом ВС. Были выполнены измерения степени поляризации излучения на выходе

**Таблица 1.** Значения коэффициентов  $C_1, C_2, C_3$  для различных типов оптических волокон

|       | 65 $\mu\text{m}$ | 187 $\mu\text{m}$ | 318 $\mu\text{m}$ |
|-------|------------------|-------------------|-------------------|
| $C_1$ | 3.15             | 0.64              | 0.5               |
| $C_2$ | 0.002            | 0.002             | 0.00039           |
| $C_3$ | -2.39            | -0.154            | -0.280            |

**Таблица 2.** Степень поляризации света на выходе многомодовых волоконных световодов при их возбуждении излучением полупроводниковых лазеров (длина ВС 16.5 см)

| Длина волны,<br>$\mu\text{m}$ | Диаметр сердцевины волоконного световода, $\mu\text{m}$ |      |      |      |
|-------------------------------|---|------|------|------|
|                               | 65  | 187  | 318  | 404  |
| 0.85                          | 0.26  | 0.18 | 0.04 | 0.03 |
| 1.32                          | 0.54  | 0.54 | 0.31 | 0.21 |
| 1.53                          | 0.47  | 0.48 | 0.05 | 0.20 |

ВС при их возбуждении линейно-поляризованным светом от полупроводниковых лазеров на длинах волн 0.85, 1.32 и 1.52  $\mu\text{m}$ ; относительная ширина спектральной линии источников лежала в пределах  $10^{-2}$ – $10^{-3}$ . Соответствующие экспериментальные данные для волокна длиной 16.5 см приведены в табл. 2. Как правило, степень поляризации света на выходе многомодовых ВС при возбуждении узкополосным лазерным источником оказывается выше, чем при действии тепловым источником с той же длиной волны. Различия в величинах степени поляризации сильнее выражены у световода со сравнительно большим диаметром сердцевины. При этом возрастание степени поляризации при увеличении длины волны наблюдается при относительно малых длинах волн (0.85–1.35  $\mu\text{m}$ ). Возможной причиной этого является спектральная зависимость параметра эллиптичности для различных мод световода.

Подробный анализ влияния когерентности источников света на деполяризацию света в многомодовых ВС заслуживает самостоятельных исследований. Исследования преобразования поляризации излучения в многомодовых волоконных световодах в широком диапазоне длин волн расширяют области применения этого типа световодов в устройствах передачи и обработки информации и в измерителях параметров физических полей.

## Список литературы

- [1] *Снайдер А., Лав Дж.* Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987.
- [2] *Шерклифф У.* Поляризованный свет. М.: Мир, 1965. 64 с.
- [3] *Быков А.М., Волков И.С., Воляр А.В.* и др. // Опт. и спектр. 1986. Т. 61. В. 1. С. 190–191.
- [4] *Снопко В.Н.* Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения. Минск: Наука и техника. 1992. С. 336.
- [5] *Котов О.И., Марусов О.Л.* и др. // Опт. и спектр. 1991. Т. 70. В. 4. С. 924–927.
- [6] *Кучикян Л.М., Воляр А.В.* // УФЖ. 1977. Т. 22. С. 1658.
- [7] *Быков А.М., Воляр А.В.* и др. // Опт. и спектр. 1982. Т. 53. В. 3. С. 517–521.
- [8] *Аззам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.