

УДК 621.378.325 : 535.317

В. Ш. Берикашвили, В. А. Домбровский, С. А. Домбровский,
Г. Н. Кузнецова

(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА
В ОДНОМODOVЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

Экспериментально исследовано распределение интенсивности излучения в анизотропных одномодовых волоконных световодах (АОВС). Показано, что распределение поля в таких световодах вдоль их главных осей хорошо описывается выражением, полученным для изотропных, ступенчатых световодов. Найдены соотношения для оценки параметров АОВС на основе измерений углов первого минимума и полувисоты интенсивности распределения в дальней зоне. Предложена гауссовская аппроксимация основной моды АОВС, позволяющая проводить более точный расчет параметров пучков в волоконной голографической системе.

Одним из направлений совершенствования голографических систем является применение оптических световодов [1—5]. Одномодовые волоконные световоды (ОВС) позволяют резко уменьшить габариты и вес голографической системы, сократить число компонентов, повысить ее стабильность и надежность работы, просто управлять параметрами пучков (форма, размер, расходимость, амплитуда, фаза, поляризация). К достоинствам голографической волоконной системы относятся также ее гибкость, многофункциональность и низкая стоимость.

В обычном круглом одномодовом световоде распространяются две моды со взаимно ортогональными поляризациями с одной и той же постоянной распространения и конфигурацией. Из-за изменения внешних условий (температуры, давления) и от скрутки и изгибов линейно поляризованное излучение в таком световоде за счет наведенного двулучепреломления быстро превращается в эллиптически поляризованное. В голографии желательно работать с линейно поляризованными пучками. Это достигается при использовании анизотропных ОВС с некруговыми сердцевинами, оболочкой или напрягающими элементами [6—8]. В таких световодах зависимость поляризации выходного излучения от внешних воздействий значительно меньше.

Однако широкого распространения волоконная голография пока не получила. Это объясняется тем, что ОВС, сохраняющий поляризацию, является новым элементом, свойства которого недостаточно изучены. В частности, не исследовано распределение интенсивности излучения в основной моде в таких световодах, что необходимо знать для расчета голографической системы.

Цель данной работы — экспериментальное исследование распределения излучения в анизотропном световоде, определение функций, описывающих это распределение, оценка параметров световодов на основе полученных экспериментальных данных.

Световод характеризуется следующими параметрами: a — радиус сердцевины, $\Delta n = n_c - n_{об}$ — разность показателей преломления сердцевины n_c и оболочки $n_{об}$, $NA = \sqrt{n_c^2 - n_{об}^2}$ — числовая апертура световода, $V = \frac{2\pi a NA}{\lambda}$ — волновой параметр волокна, $\lambda_c = \frac{1\lambda}{2,4048}$ — длина волны отсечки (излучение с длиной волны меньше λ_c возбуждает в световоде многомодовый режим),

$B = n_x - n_y$ — показатель двулучепреломления, где n_x и n_y — эффективные показатели преломления вдоль главных осей световода; $L_B = \frac{\lambda}{B}$ — длина биения (длина, на которой повторяется состояние поляризации излучения, распространяющегося в световоде).

Исследование проводилось методом дальнего поля для отечественных световодов: ОВС-35А4 — с эллиптической сердцевиной, ОВС-ST94(2), DСК-7855 — с эллиптическими оболочками, ОВ-96/1 — волокна типа «Панда» с напрягающими элементами*. Структура световодов показана в таблице.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для измерения распределения интенсивности основной моды в дальней зоне световода. Здесь 1 — лазер ЛГ-52-1 ($\lambda = 633$ нм), 2 — полуволновая фазовая пластинка,

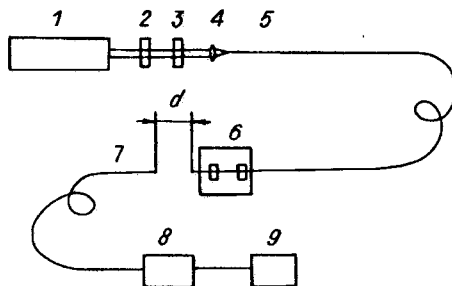
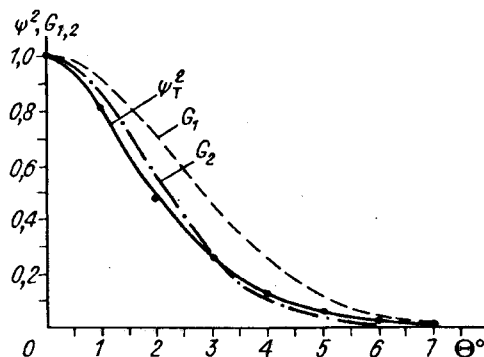


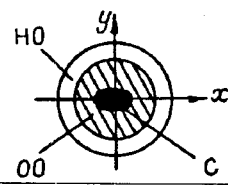
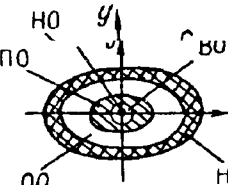
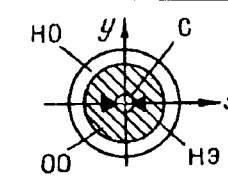
Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследований ОВС



θ°	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ψ_T^2	1	0,82	0,49	0,252	0,122	0,059	0,029	0,014	0,007	0,0034
ψ_3^2	1	0,82	0,48	0,258	0,122	0,059	0,028	0,013	0,006	0,0030
$\Delta, \%$	0	0,6	3	2,4	0	0	3,4	7,1	14,3	11,8
G_1	1	0,92	0,71	0,47	0,26	0,121	0,048	0,016	0,0045	0,0011
G_2	1	0,87	0,56	0,27	0,100	0,028	0,006	0,0009	0,0001	0,00001

Рис. 2. Распределение интенсивности пучка в дальней зоне световода ОВС-35А4 вдоль оси u : экспериментальные значения (точки), расчетная зависимость ψ_T^2 (сплошная кривая), гауссовские функции G_1 ($\omega_{01} = 2,37$ мкм) (штриховая) и G_2 ($\omega_{02} = 3,09$ мкм) (штрихпунктирная)

* В экспериментах использовались анизотропные световоды, изготовленные в НИИЭС и ИОФ РАН (Москва).

Тип ОВС	Параметр			
	Геометрия ОВС	$\alpha_{0h} = \frac{\sin \Theta_0}{\sin \Theta_h}$	$\sin \Theta_h \cdot 10^{-2}$	V ($\lambda = 630 \text{ нм}$)
ОВС-35А4		$\frac{x}{y}$ $\frac{4,82}{8,12}$	$\frac{3,63}{3,45}$	$\frac{2,4}{1,2}$
ДСК-7855		5,07	3,75	2,24
ОВ-96/1 «Панда»		6,40	5,10	1,86

Обозначения: С — сердцевина, ОО — оптическая оболочка, НО — наружная оболочка, η — экспериментальная эффективность ввода

3 — поляриод, 4 — микролинза, $f = 4,45 \text{ мм}$, 5 — исследуемый анизотропный ОВС (АОВС), 6 — трехкоординатный столик с цифровым отсчетом по двум координатам (цена деления отсчета 1 мкм), 7 — многомодовый световод с диаметром сердцевинки 50 мкм, 8 — ФЭУ, 9 — цифровой вольтметр. Поляриод 3 совместно с полуволновой фазовой пластинкой 2 позволял получить линейно поляризованное излучение с заданным азимутом при постоянной интенсивности. Расстояние между торцом исследуемого АОВС и торцом многомодового световода составляло $d = 10 \text{ мм} \pm 10 \text{ мкм}$.

На рис. 2—6 представлены экспериментальные значения (точки) распределений интенсивности дальнего поля для исследованных волокон вдоль их главных осей. Угол с осью Θ определялся как $\text{arctg} \frac{x}{d}$, где x — смещение волоконного фотоприемника (7 — многомодовый световод, 8 — ФЭУ) относительно оси излучения АОВС.

Для практического применения этих результатов необходимо найти аппроксимационные функции, описывающие эти распределения через параметры световодов. Известно [9], что нормализованное распределение дальнего поля HE_{11} -моды изотропного ОВС со ступенчатым профилем показателя преломления хорошо описывается выражением

Параметр								
α_h	a , МКМ	$\Delta_1 \cdot 10^{-3}$	NA	λ_c , нм	ω_{01} , МКМ	ω_{02} , МКМ	L_B , мм	η , %
$\frac{0,897}{0,510}$	$\frac{2,49}{1,49}$	$\frac{3,10}{4,11}$	$\frac{0,095}{0,11}$	$\frac{617}{430}$	$\frac{2,78}{2,37}$	$\frac{3,12}{3,09}$	16	70
0,847	2,28	3,4	0,10	590	2,63	3,0	4,3	70
0,650	1,28	7,3	0,146	490	1,75	2,15	5,3	60

ПО — промежуточная оболочка, ВО — внутренняя оболочка, НЭ — направляющие элементы, излучения He—Ne-лазера в ОВС

$$|\psi|^2 = \begin{cases} \left[\frac{U^2 W^2}{(U^2 - \alpha^2)(W^2 - \alpha^2)} \left\{ J_0(\alpha) - \alpha J_1(\alpha) \frac{J_0 U}{U J_1(U)} \right\} \right]^2 & \text{для } U \neq \alpha, \\ \left[\frac{U^2 W^2}{2V^2} \frac{1}{U J_1(U)} \left\{ J_0^2(\alpha) + J_1^2(\alpha) \right\} \right]^2 & \text{для } U = \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где V — параметр световода, $U = \{(1 + \sqrt{2})V\} / \{1 + [4 + V^4]^{1/4}\}$ [10], $W = \sqrt{V^2 - U^2}$, $\alpha = k a \sin \Theta$ — нормализованный угол, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны света, Θ — угол с осью, a — радиус сердцевины волокна, $J_0(\cdot)$, $J_1(\cdot)$ — функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно.

Нами аппроксимировались экспериментальные результаты, полученные для анизотропных световодов, этим выражением. Для этого измерялись углы Θ_0 — первого минимума — и Θ_h — полувысоты интенсивности распределения в дальнем поле вдоль двух главных направлений световода. Затем численно решалась система уравнений

$$0 = \frac{U^2 W^2}{(U^2 - \alpha_0^2)(W^2 - \alpha_0^2)} \left\{ J_0(\alpha_0) - \alpha_0 J_1(\alpha_0) \frac{J_0(U)}{U J_1(U)} \right\},$$

$$\frac{1}{2} = \left[\frac{U^2 W^2}{(U^2 - \alpha_h^2)(W^2 - \alpha_h^2)} \left\{ J_0(\alpha_h) - \alpha_h J_1(\alpha_h) \frac{J_0(U)}{U J_1(U)} \right\} \right]^2, \quad (2)$$

$$U = \{(1 + \sqrt{2})V\} / \{1 + [4 + V^4]^{1/4}\},$$

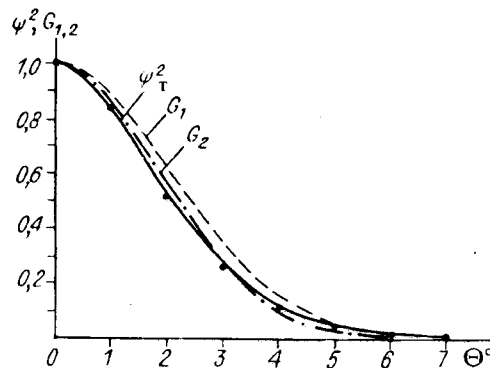
$$W = \sqrt{V^2 - U^2},$$

где $\alpha_0 = k \sin \Theta_0$; $\alpha_h = k \sin \Theta_h$. По найденным значениям a и V на основе выражения (1) строились аппроксимационные зависимости. На рис. 2—6 они показаны сплошными линиями. Под рисунками приведены также численные значения интенсивности от угла Θ , полученные экспериментально и из выражения (1), а также относительное отклонение $\Delta = |\psi_T^2 - \psi_3^2| / \psi_T^2$ этих результатов. Видно, что экспериментальные данные хорошо описываются выражением (1). Максимальное отклонение в диапазоне интенсивностей $1,0 \div 0,02$ не превышает 7 % и лежит в пределах ошибки измерений (8 % при $\psi^2 > 0,02$).

Таким образом, можно сделать вывод, что для описания поля анизотропных световодов вдоль их главных осей следует использовать выражение, полученное для изотропных световодов.

На основе этих результатов и работы [9] параметры анизотропных световодов можно находить следующим образом. По измеренным значениям углов Θ_0 — первого минимума — и Θ_h — полувысоты интенсивности — вычисляются волновой параметр V и параметр $\alpha_h = k \sin \Theta_h$ из системы уравнений (2) или приближенных выражений:

$$V = 1,225 + 26,05/\alpha_{0h}^2, \quad (3)$$



Θ°	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ψ_T^2	1	0,84	0,53	0,268	0,118	0,047	0,017	0,0052	0,0013	0,00018
ψ_3^2	1	0,84	0,51	0,258	0,112	0,045	0,016	0,0045	0,0010	
$\Delta, \%$	0	0,95	2,5	3,7	5,1	4,5	4,8	13,5	23	
G_1	1	0,89	0,63	0,35	0,156	0,055	0,015	0,0034	0,00089	0,00008
G_2	1	0,86	0,56	0,268	0,096	0,026	0,005	0,0008	0,00008	

Рис. 3. Распределение интенсивности пучка в дальней зоне световода ОВС-35А4 вдоль оси x : экспериментальные значения (точки), расчетная зависимость ψ_T^2 (сплошная кривая), гауссовские функции G_1 ($\omega_{01} = 2,78$ мкм) (штриховая) и G_2 ($\omega_{02} = 3,12$ мкм) (штрихпунктирная)

$\lambda_c = \frac{\lambda}{2,4048}$ — длина волны отсечки; $N_A = \frac{\sqrt{\sin \Theta_n}}{\alpha_h}$ — числовая апертура световода, где λ — длина волны излучения, при котором проводилось измерение; n_c — показатель преломления сердцевины световода.

В таблице приведены параметры различных типов анизотропных световодов, найденные из формул (3)—(5).

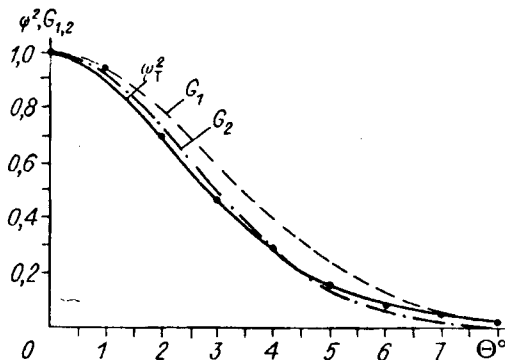
Расчет пучков в волоконной голографии удобно проводить в гауссовском приближении. Гауссовская аппроксимация основной моды изотропного световода предложена Маркузе [11]. Радиус гауссовского пучка вычисляется из выражения

$$\omega_{01} = a(0,65 + 1,619/V^{3/2} + 2,879/V^6) \quad (6)$$

и найден из условия минимальных потерь при вводе излучения в световод.

На рис. 2—6 штриховыми линиями показаны гауссовские функции

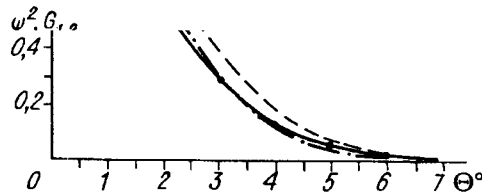
$$G_1(\Theta) = \exp(-\Theta^2/\Theta_1^2),$$



Θ°	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ψ_T^2	1	0,91	0,69	0,462	0,280	0,160	0,088	0,047	0,024	0,0118	0,0056
ψ_S^2	1	0,94	0,70	0,465	0,29	0,15	0,085	0,048	0,023	0,012	0,006
$\Delta, \%$	0	3,2	0,7	0,65	3,6	6,3	3,4	2,1	4,2	1,7	7,1
G_1	1	0,94	0,80	0,598	0,401	0,240	0,128	0,061	0,026	0,0098	0,0033
G_2	1	0,92	0,73	0,496	0,287	0,143	0,0610	0,022	0,007	0,0018	0,0004

Рис. 4. Распределение интенсивности пучка в дальней зоне световода ОВС-ST94(2):

экспериментальные значения (точки), расчетная зависимость ψ_T^2 (сплошная кривая), гауссовские функции G_1 ($\omega_{01} = 1,95$ мкм) (штриховая) и G_2 ($\omega_{02} = 2,28$ мкм) (штрихпунктирная)



Θ°	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ψ_T^2	1,0	0,851	0,548	0,290	0,136	0,059	0,023	0,0085	0,00265
ψ_3^2	1,0	0,856	0,553	0,292	0,134	0,057	0,022	0,0082	0,0026
$\Delta, \%$	0	0,6	0,91	0,7	1,5	3,4	2,6	3,5	1,9
G_1	1,0	0,902	0,661	0,393	0,190	0,075	0,024	0,0062	0,0013
G_2	1,0	0,873	0,582	0,296	0,115	0,034	0,008	0,0013	0,00017

Рис. 5. Распределение интенсивности пучка в дальней зоне световода DCK-7855: экспериментальные значения (точки), расчетная зависимость ψ_T^2 (сплошная кривая), гауссовские функции G_1 ($\omega_{01} = 2,63$ мкм) (штриховая) и G_2 ($\omega_{02} = 3,0$ мкм) (штрихпунктирная)

где $\Theta_{f1} = \frac{\lambda}{\pi\omega_{01}}$; ω_{01} — радиус основной моды, вычисленной из выражения (6).

Из рисунков видно, что в отдельных точках гауссовское распределение, предложенное Маркузе, отличается от экспериментального распределения почти в 2 раза. Поэтому такая аппроксимация может давать большие ошибки при расчете голографической системы.

Предлагается описывать поле на выходе световода гауссовским пучком с радиусом

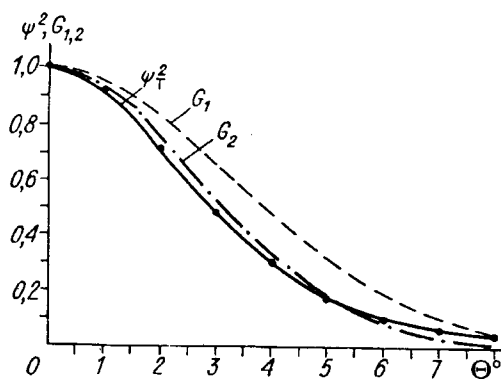
$$\omega_{02} = a(0,459 + 2,75/V^{3/2} + 5,215/V^6). \quad (7)$$

Этот радиус найден из условия равенства площадей, ограниченных экспериментально полученным $|\psi(\Theta)|^2$ и гауссовским $G_2(\Theta) = \exp(-\Theta^2/\Theta_{f2}^2)$ ($\Theta_{f2} = \lambda/(\pi\omega_{02})$) распределениями:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\Theta)|^2 d\Theta = \int_{-\infty}^{\infty} G_2(\Theta) d\Theta.$$

На рис. 2—6 штрихпунктирными линиями показаны гауссовские функции $G_2(\Theta)$. Видно, что в диапазоне интенсивностей от 1 до 0,1 такая аппроксимация лучше согласуется с экспериментальным распределением поля анизотропного световода.

Важной характеристикой ОВС, сохраняющих поляризацию, является длина биения. В таких световодах «паразитное» двулучепреломление мало влияет на состояние поляризации до тех пор, пока характерный размер внешнего возмущения больше длины биения. Для исследованных волокон длина биения определялась методом рэлеевского рассеяния [12]. В световод вводился пучок лазера, плоскость поляризации которого составляла 45° с его главными осями. В плоскости, ориентированной под углом 45° к этим осям вдоль свето-



θ°	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ψ_T^2	1	0,91	0,71	0,484	0,307	0,186	0,110	0,064	0,037	0,021	0,0118
ψ_S^2	1	0,92	0,72	0,475	0,295	0,175	0,105	0,060	0,036	0,0225	0,0155
$\Delta, \%$	0	0,8	1,1	1,9	3,9	5,9	4,1	6,3	2,7	7,1	31,3
G_1	1	0,96	0,83	0,663	0,481	0,319	0,193	0,106	0,054	0,025	0,0103
G_2	1	0,93	0,76	0,537	0,331	0,179	0,083	0,034	0,012	0,0037	0,001

Рис. 6. Распределение интенсивности пучка в дальней зоне световода ОВС-96/1: экспериментальные значения (точки), расчетная зависимость ψ_T^2 (сплошная кривая), гауссовские функции G_1 ($\omega_{01} = 1,75$ мкм) (штриховая) и G_2 ($\omega_{02} = 2,15$ мкм) (штрихпунктирная)

вода, наблюдается чередование темных и светлых полос. Период чередования определяет длину биения. Измеренные значения длины биений составили (мм): 5,3 для ОВ-96/1, 55 для ОВ-ST94(2), 16 для ОВС-35А4, 4,3 для ДСК-7855.

Таким образом, экспериментально исследовано распределение интенсивности излучения в анизотропных ОВС. Показано, что распределение поля в таких световодах вдоль их главных осей хорошо описывается выражением, полученным для изотропных, ступенчатых световодов. Найдены соотношения для оценки параметров АОВС на основе измерения углов первого минимума и полувысоты интенсивности распределения в дальней зоне. Предложена гауссовская аппроксимация основной моды АОВС, которая позволяет проводить более точный расчет параметров пучков в волоконной голографической системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leite A. M. P. P. Optical fiber illuminators for holography // Opt. Communs.—1979.—28.—P. 303.
2. Dudderar T. D., Gilbert J. A., Boehnlein A. J. Achieving stability in remote holography using flexible multimode image bundles // Appl. Opt.—1983.—22.—P. 1000.
3. Bjelkhagen A. I. Pulsed fiber holography: A new technique for hologram interferometry // Opt. Eng.—1985.—24.—P. 245.
4. Jones J. D. C., Corke M., Kersey A. D., Jackson D. A. Single mode fiber optic holography // J. Phys. E: Sci. Instrum.—1984.—17.—P. 271.
5. Muhs J. D., Leelabady P. A., Corke M. Fiber-optic holography employing multiple beam fringe stabilization and object reference beam intensity variability // Appl. Opt.—1988.—27, N 17.—P. 3723.
6. Ramaswamy V., Frenh W. G., Staudley R. D. Polarization characteristics of noncircular core single-mode fibers // Appl. Opt.—1978.—17, N 18.—P. 3014.

7. Ramaswamy V., Stollen R. A., Divino M. D., Pleibel W. Birefringence in elliptically clad berosilicate single-mode fibers // Appl. Opt.—1979.—18, N 24.—P. 4080.
8. Грудинин А. Б., Дианов Е. М., Данков Г. Л., Неустроев В. Б. Влияние структуры анизотропных ОВС на сохранение линейной поляризации излучения // Радиотехника.—1988.—№ 8.
9. Gambling W. A., Payne D. N., Matsumura A., Dyott R. V. Routine characterization of single-mode fiber // Electron. Lett.—1976.—12, N 21.—P. 546.
10. Бутусов М. М., Галкин С. Л., Орбинский С. П., Пал Б. П. Волоконная оптика и приборостроение.—Л.: Машиностроение, 1987.
11. Marcuse D. Loss analysis of single-mode fiber splices // Bell Syst. Techn. J.—1977.—56, N 5.—P. 705.
12. Dyott R. V., Cozens J. R., Morris D. R. Preservation of polarizations of optical fiber-waveguides with elliptical cores // Electron. Lett.—1979.—15, N 13.—P. 380.

Поступила в редакцию 6 июля 1992 г.