

СВЕТОПРОПУСКАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПОТОКА, ВЫХОДЯЩЕГО ИЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Д. К. Саттаров, Г. Я. Конаева,
И. П. Грязнова и Т. Д. Кульда

Разработана методика измерения светопропускания волоконно-оптическим элементом информационного (полезного) и нерабочих компонентов потока. Приведены результаты измерений.

Одной из основных характеристик волоконно-оптических элементов (ВОЭ) является коэффициент светопропускания τ , определяемый по формуле

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0}, \quad (1)$$

где Φ_0 и Φ — соответственно падающий на входной торец и вышедший из выходного торца ВОЭ потока. Применяемые ныне методики [1-3] измерения светопропускания основаны на измерении всего выходящего из выходного торца ВОЭ потока Φ , для чего в качестве приемника излучения используются интеграторы света, например фотометрический шар. На рис. 1 дана одна из схем измерения светопропускания τ : падающий поток Φ_0 измеряется по схеме рис. 1, а, а выходящий — по схеме рис. 1, б.

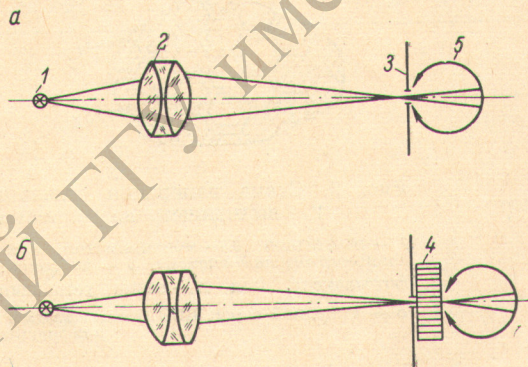


Рис. 1. Схема измерения светопропускания волоконно-оптического элемента.

1 — источник света, 2 — объектив, 3 — диафрагма, 4 — волоконно-оптический элемент, 5 — фотометрический шар; а — измерение падающего потока Φ_0 , б — измерение прошедшего потока Φ .

На основе эффекта трех колец [2, 4-8] известно, что полезный поток $\Phi_{\text{п}}$, несущий информацию, составляет лишь часть выходящего из ВОЭ потока Φ . Внеапертурный $\Phi_{\text{в}}$ и оболочечный $\Phi_{\text{о}}$ потоки являются нерабочими и ухудшают качество изображения, переданного ВОЭ [2]. Применение вышеуказанной методики определения полного светопропускания ВОЭ приводит к недоразумению: к ВОЭ предъявляются противоречивые требования — наличие высокого светопропускания при высоком коэффициенте передачи контраста. Вместе с тем на основе эффекта трех колец [2, 4-8] можно показать, что в волоконной оптике действует объективная закономерность — при прочих равных условиях увеличение коэффициента передачи контраста ВОЭ возможно за счет снижения полного (общего) светопропускания τ при незначительном уменьшении и светопропускания $\tau_{\text{п}}$ полезного потока $\Phi_{\text{п}}$.

В силу сказанного исключительный интерес представляют измерения не общего светопропускания τ , а светопропускания τ_{Π} полезного потока Φ_{Π} , его доли в выходящем из ВОЭ потоке Φ , а также светопропускания нерабочих компонентов $\Phi_{\text{н}}^c$, $\Phi_{\text{н}}^{\text{н}}$, $\Phi_{\text{н}}^{\text{н}}$, $\Phi_{\text{н}}^c$ выходящего потока.

С учетом эффекта трех колец [2, 4^и-8] выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{\Phi_{\Pi} + \Phi_{\text{н}}^{\text{н}} + \Phi_{\text{н}}^c + \Phi_{\text{н}}^{\text{н}} + \Phi_{\text{н}}^c}{\Phi_0} \quad (2)$$

Введем понятие относительного светопропускания отдельных компонентов потока, определив его как отношение выходящего из ВОЭ потока

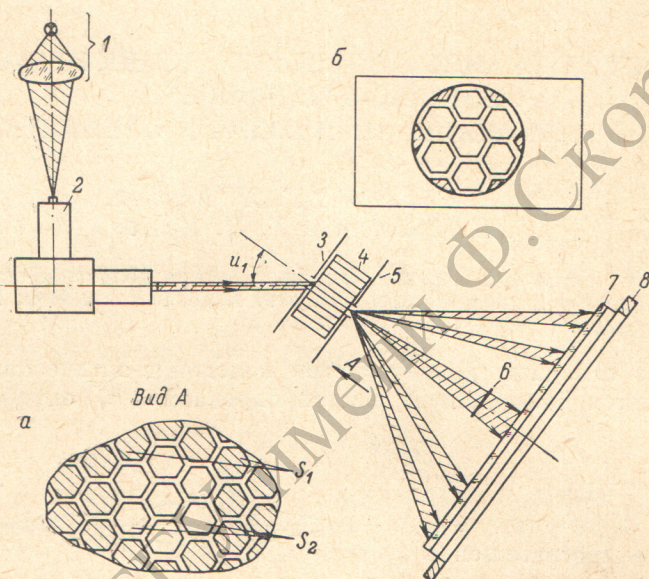


Рис. 2. Схема измерения отдельных компонентов потока, выходящего из волоконного элемента.

1 — осветитель, 2 — монохроматор, 3 и 5 — диафрагмы, 4 — волоконно-оптический элемент, 6 — заслонка, 7 — молочное стекло, 8 — фотоэлемент. Вид А — схема устранения оболочечного потока $\Phi_{\text{н}}^{\text{н}}$: а — выходной торец ВОЭ без диафрагмы 5; б — выходной торец ВОЭ с диафрагмой.

данного компонента к общему потоку Φ_0 , падающему на входной торец ВОЭ. В этом случае выражение (2) примет вид

$$\tau = \tau_{\Pi} + \tau_{\text{н}}^{\text{н}} + \tau_{\text{н}}^c + \tau_{\text{н}}^{\text{н}} + \tau_{\text{н}}^c \quad (3)$$

т. е. относительное светопропускание данного компонента определяет его вклад в выходящем из ВОЭ потоке Φ .

Измерения светопропускания отдельных компонентов потока, выходящего из ВОЭ, производились на установке, оптическая схема которой дана на рис. 2. ВОЭ устанавливается на поворотном столе, ось которого совмещена с входным торцом ВОЭ. Последний освещается через диафрагму 3 монохроматическим светом. При измерениях в широких конических пучках лучи отдельных компонентов перекрываются [2] и разделить основные компоненты потока не удастся. Поэтому измерение светопропускания отдельных компонентов потока проводится при падении на входной торец ВОЭ узкого конического пучка лучей ($u=2^\circ$), в этом случае выходящий из ВОЭ поток разделен в пространстве на полезный и нерабочие компоненты [2, 8]. Светораспределение на выходе каждого из компонентов потока представляет собой кольцевой элемент конуса, а в сечении нормальной плоскостью получают светящиеся кольца, разнесенные в пространстве соответственно для полезного и нерабочих компонентов [8]. Приемником излучения служит фотоэлемент (рис. 2),

Результаты измерений светопропускания волоконно-оптическими элементами отдельных компонентов потока

u_1 , град.	L, мм	Без диафрагмы на выходе					С диафрагмой на выходе		Светопропускание отдельных компонентов						
		τ	$\tau_{II} + \tau_{II}^N$	$\tau_B^N + \tau_B^C + \tau_{II}^C + \tau_{II}^N$	$\tau_B^N + \tau_B^C + \tau_{II}^N$	$\tau_B^C + \tau_{II}^N$	$\tau_B^C + \tau_{II}^C$	τ_{II}^C	τ	τ_{II}	τ_{II}^C	τ_{II}^N	$\tau_B^C + \tau_{II}^N$	τ_B^N	
0	4	0.91	0.70				0.85	0.65	0.91	0.65	0.21	0.05			
	50	0.85	0.62				0.81	0.57	0.85	0.57	0.23	0.05			
	100	0.78	0.55				0.71	0.48	0.78	0.48	0.23	0.07			
20	4	0.82	0.55				0.75	0.48	0.82	0.48	0.27	0.07			
	50	0.78	0.52				0.73	0.46	0.78	0.46	0.26	0.06			
	100	0.68	0.44				0.56	0.34	0.68	0.34	0.25	0.10			
32	4	0.74	0.48				0.66	0.40	0.74	0.40	0.26	0.08			
	50	0.68	0.43				0.60	0.36	0.68	0.36	0.25	0.08			
	100	0.57	0.38				0.43	0.25	0.57	0.25	0.20	0.13			
40	4			0.64	0.47	0.32			0.64		0.16		Определяется совместно	0.32	0.15
	50			0.58	0.38	0.26			0.58		0.20			0.26	0.12
	100			0.42	0.29	0.19			0.42		0.13			0.19	0.12
58	4				0.44	0.28			0.44	Не существует	Испытывает ПВО	с Φ_B^C	0.28	0.16	
	50				0.37	0.14			0.37				0.14	0.23	
	100				0.24	0.09			0.24				0.09	0.15	

перед окошком которого поставлено молочное стекло для усреднения потока по светочувствительной площадке фотоэлемента.

Исследования проводились на спеченных образцах ВОЭ диаметром 28 мм с параллельной укладкой волокон, с длиной световедущей жилы 4, 50 и 100 мм и коэффициентом заполнения 0.7. Номинальная числовая апертура световодов $\sin u_0 = 0.54$. Измерения проводились для пяти значений углов u_1 падения света на входной торец ВОЭ: 0, 20°; $u_0 = 32^\circ 15'$, 40° и 90° — $u_0 = 58^\circ$. Физический смысл выбранных пяти углов u_1 падения лучей на входной торец ВОЭ дан в работе [8].

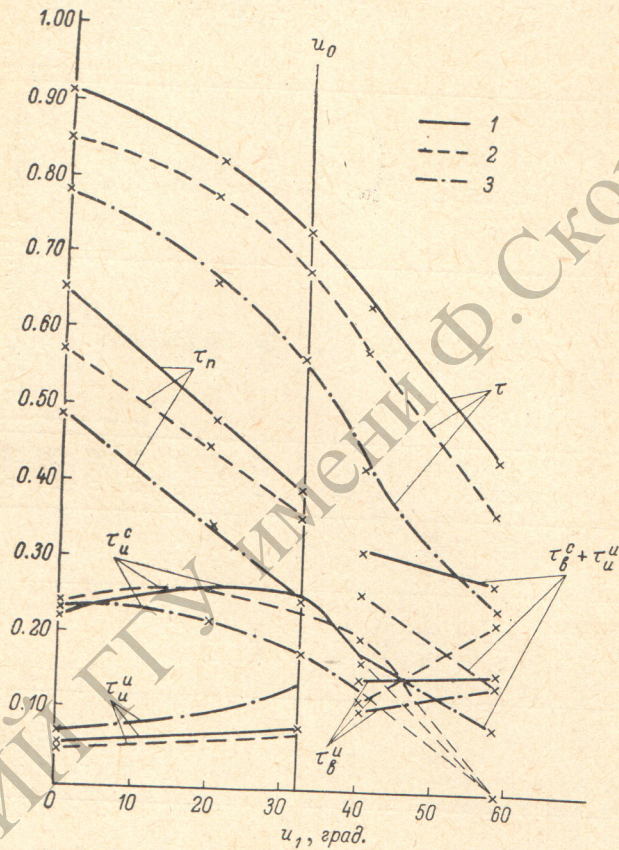


Рис. 3. Зависимость полного светопропускания и светопропускания отдельных компонентов излучения от угла u_1 падения света на входной торец волоконно-оптического элемента.

1 — ВОЭ длиной 4 мм, 2 — ВОЭ длиной 50 мм, 3 — ВОЭ длиной 100 мм.

Методика основана на измерении всего выходящего из ВОЭ потока, а также потоков каждого светящегося кольца ($\Phi_n + \Phi_n^c$, Φ_n^c , Φ_n^u , $\Phi_n^c + \Phi_n^u$), выделение которых производится с помощью ввода диафрагмы. Поток, падающий на входной торец ВОЭ, измеряется при подведении фотоэлемента к диафрагме 3 (рис. 2). Таким образом, измеряются полное светопропускание τ , светопропускание компонентов Φ_n^c и Φ_n^u и суммарное светопропускание компонентов $\Phi_n^c + \Phi_n^u$ и $\Phi_n^c + \Phi_n^u$. Результаты измерений приведены в таблице.

Оболочечный поток Φ_n^c распространяется через ВОЭ за счет многократных преломлений и френелевских отражений на границах жила—оболочка и оболочка—жила [2] и на выходе распределяется на некоторую площадь S_1 , значительно превосходящую площадь S_2 световедущих жил, по которым распространяется полезный поток Φ_n (незаштрихованные жилы на рис. 2). Это позволяет практически полностью исключить поток

Φ_n^u установкой на выходном торце ВОЭ диафрагмы 5, сцентрированной с диафрагмой 3 и равной ей по площади, т. е. разделить компоненты Φ_n^c и Φ_n^u . Измерения проводятся для трех углов u_1 падения лучей на ВОЭ: $0, 20^\circ$ и $u_0 = 32^\circ 15'$. Данная методика позволяет измерить полное светопропускание, светопропускание полезного потока и светопропускание нерабочих компонентов потока (см. таблицу). Неразделенными при этом остаются два нерабочих компонента $\Phi_n^c + \Phi_n^u$, светопропускание которых определяется в сумме. На рис. 3 приведены зависимости полного светопропускания τ и светопропускания отдельных компонентов от угла u_1 падения света на входной торец ВОЭ.

Как видно из рис. 3, приведенное светопропускание полезного потока, равное отношению τ_n^u / τ для исследованных ВОЭ, уменьшается с длиной и составляет 0,71, 0,67; 0,61 для $u_1 = 0$ и 0,54, 0,52, 0,44 для $u_1 = 32^\circ$ для образцов с длиной по оси жилы 4, 50 и 100 мм соответственно. Уменьшение с длиной приведенного светопропускания полезного потока связано с рассеянием света внутри ВОЭ, происходящем на микродефектах в материалах жилы и оболочки, на границах жила—оболочка и оболочка—жила—оболочка, дающего практически равномерную засветку пространства между кольцами. С увеличением длины ВОЭ величина рассеянного потока увеличивается за счет уменьшения величин потоков основных компонентов излучения.

Светопропускание потоков, выходящих из жил ($\tau_n^c, \tau_n^c + \tau_n^u, \tau_n^c$), уменьшается с увеличением углов падения лучей на ВОЭ, а светопропускание потоков, выходящих из светоизолирующих оболочек (τ_n^u, τ_n^u), имеет тенденцию к росту с увеличением угла u_1 .

Некоторое увеличение светопропускания потоков, выходящих из светоизолирующих оболочек ($\tau_n^u; \tau_n^u$), связано с методикой выделения этих потоков, а именно при измерении светопропускания потока τ_n^u выделением его с помощью сцентрированных диафрагм часть потока Φ_n^u попадает в приемник. При малых углах u_1 эта часть больше, чем при больших, когда Φ_n^u распространяется на большую площадь ВОЭ. В измеренном светопропускании τ_n^u присутствует часть рассеянного в ВОЭ потока, величина которого растет с увеличением u_1 .

Светопропускание τ_n^c при 58° равно нулю, так как поток Φ_n^c при этом угле претерпевает полное отражение от границы жила—воздух на выходном торце ВОЭ [8]. Штриховые линии τ_n^c — экстрополяция кривых от 40 до 58° (рис. 3).

Из полученных экспериментальных результатов следует, что увеличение τ_n^u полезного потока в выходящем из ВОЭ потоке, а значит, и улучшение качества изображения [9] может быть достигнуто несколькими методами, в том числе:

а) увеличением числовой апертуры световодов до единицы и выше, так как при этом отсутствуют внеапертурные компоненты Φ_n^c, Φ_n^u и поток Φ_n^c , остаются только компоненты Φ_n^c и Φ_n^u ;

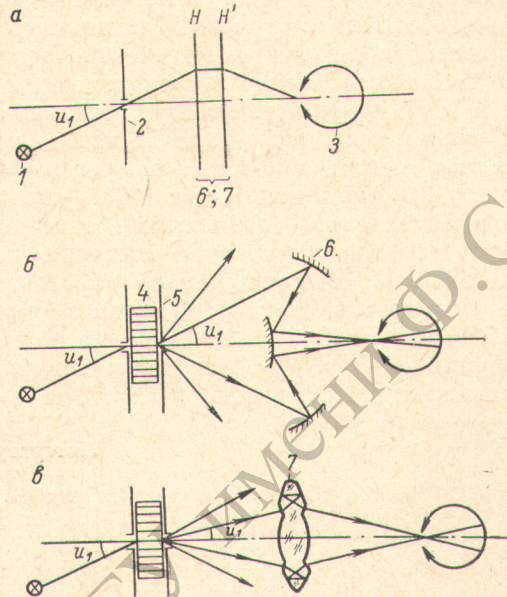


Рис. 4. Схемы измерения светопропускания полезного потока волоконно-оптического элемента.

1 — источник света, 2 и 5 — диафрагмы, 3 — фотометрический шар, 4 — волоконно-оптический элемент, 6 — концентрическая зеркальная отражающая система, 7 — концентрическая зеркально-линзовая система. а — измерение падающего потока Φ_n^c , б, в — измерение полезного потока Φ_n^u .

б) применением полупрозрачных светоизолирующих оболочек, так как это ослабляет поток $\Phi_{\text{н}}$;

в) использованием световодов с минимально допустимой (оптимальной) толщиной светоизолирующих оболочек.

Для экспериментальной проверки этих выводов по описанной методике измерены τ и $\tau_{\text{н}}$ спеченной волоконной детали с параллельной укладкой волокон, с номинальной числовой апертурой $A_0 > 1$, с коэффициентом заполнения 0.70 и полупрозрачными светоизолирующими оболочками. Получены следующие результаты: $\tau=0.66$, $\tau_{\text{н}}=0.61$, $\tau_{\text{н}}^{\text{н}}=0.05$; в то время как по расчету [2, 6] с учетом френелевских потерь от торцов при прозрачных оболочках $\tau_{\text{н}}^{\text{н}}$ должен составлять 0.08, а $\tau_{\text{н}}=0.58$. Таким образом, применение полупрозрачной оболочки уменьшило оболочечный поток $\Phi_{\text{н}}$ в 1.6 раза, а поток $\Phi_{\text{н}}$ практически не изменился.

Для измерения светопропускания $\tau_{\text{н}}$ полезного потока $\Phi_{\text{н}}$ и его доли в общем выходящем из ВОЭ потоке также применима следующая оптическая схема: измерение падающего потока Φ производится по схеме рис. 4, а, полезного потока $\Phi_{\text{н}}$ — по схеме рис. 4, б, здесь с помощью concentрической зеркальной отражающей системы на фотоприемник направляется внутреннее светящееся кольцо, образованное полезным потоком $\Phi_{\text{н}}$. Внешнее кольцо, образованное потоком $\Phi_{\text{н}}^{\text{н}}$, на фотоприемник не попадает. Оболочечный поток $\Phi_{\text{н}}^{\text{н}}$ устраняется с помощью двух сцентрированных диафрагм 2 и 5 равного диаметра. Аналогичная схема изображена на рис. 4, в, где вместо зеркальной отражающей применена зеркально-линзовая система.

Литература

- [1] Н. С. Капани. Волоконная оптика. Изд. «Мир», М., 1969.
- [2] В. Б. Вейнберг, Д. К. Саттаров. Оптика световодов. Изд. «Машиностроение», Л., 1969.
- [3] Д. К. Саттаров, Г. Я. Конаева, Л. С. Трофимова, К. П. Печерская, А. Н. Кормилицина. Опт. и спектр., 27, 151, 1969.
- [4] Д. К. Саттаров. Опт.-мех. промышл., № 5, 9, 1968.
- [5] Д. К. Саттаров. Опт.-мех. промышл., № 6, 18, 1968.
- [6] Д. К. Саттаров. Опт.-мех. промышл., № 8, 5, 1968.
- [7] Д. К. Саттаров. Опт.-мех. промышл., № 9, 3, 1968.
- [8] Д. К. Саттаров, Г. Я. Конаева, И. П. Грязнова, Т. Д. Кульда. Опт. и спектр., 28, 561, 1970.
- [9] Г. Я. Конаева, Д. К. Саттаров, Л. С. Трофимова. Опт. и спектр., 25, 922, 1968.

Поступило в Редакцию 12 октября 1970 г.