

06;07

## Боковой захват оптического излучения волоконным световодом

© Ю.П. Казачков

Федеральное государственное унитарное предприятие  
„Научно-исследовательский институт импульсной техники“, Москва  
E-mail: kazachkov@niit.ru

Поступило в Редакцию 12 марта 2008 г.

Исследован механизм захвата оптического излучения падающего на боковую поверхность волоконного световода через процесс рассеяния. Приведена математическая модель и результаты экспериментальных исследований с оптическим волокном из полиметилметакрилата (PMMA).

PACS 42.81.Cn

В последнее время в электроэнергетике получило распространение нетрадиционное использование волоконных световодов в качестве датчиков освещенности в устройствах дуговой защиты [1], в которых оптическое излучение электрической дуги падает на боковую поверхность световода, захватывается в нем и по нему же передается для дальнейшего преобразования и регистрации. Такие датчики реализуются на основе процессов переизлучения вследствие люминесценции [2] или рассеяния [3].

Целью данной работы является построение математической модели процессов захвата и распространения оптической мощности в волоконном световоде за счет эффектов рассеяния, позволяющей качественно и количественно описывать это явление.

Простейший волоконный световод состоит из оболочки и светопроводящей сердцевины, которые выполнены из прозрачных материалов. Канализация оптической мощности внутри сердцевины обеспечивается полным внутренним отражением на границе сердцевина/оболочка за счет того, что показатель преломления оболочки сделан меньше показателя преломления сердцевины. Это не позволяет захватывать сердцевиной световые лучи, падающие на боковую поверхность оболочки и пронизывающие его сердцевину. Для захвата излучения необходимо

изменение его направления распространения в сердцевине, например за счет рассеяния, которое положено в основу разрабатываемой математической модели.

При облучении боковой поверхности цилиндрического световода коллимированным пучком и изотропного рассеяния перенос оптической мощности вдоль световода в стационарном случае может быть описан в виде линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dP}{ds} = -a \cdot P(s) + k_s a \cdot \left( \frac{NA}{2n_{co}} \right) \cdot S \cdot E(s),$$

где  $P(s)$  — оптическая мощность, проходящая через поперечное сечение световода в направлении возрастания координаты длины световода  $s$ ;  $a$  — коэффициент экстинкции оптической мощности;  $k_s$  — доля коэффициента экстинкции, идущая на рассеяние;  $NA$  — числовая апертура световода;  $n_{co}$  — коэффициент преломления сердцевины;  $E$  — плотность потока коллимированного пучка;  $S$  — площадь поперечного сечения сердцевины.

При нулевом начальном условии  $P(0) = 0$ , на противоположном конце световода  $s = L$ , где  $L$  — длина световода, это уравнение имеет квадратное решение  $P(L)$ :

$$P(L) = k_s a \cdot \left( \frac{NA}{2n_{co}} \right)^2 \cdot S \cdot \exp(-aL) \cdot \int_0^L E(s) \cdot \exp(as) ds.$$

При облучении небольшого участка световода  $[s_0 - \Delta s/2; s_0 + \Delta s/2]$ , вдоль которого плотность потока постоянна  $E = E_0$ :

$$P(L) = k_s a \exp(-a(L - s_0)) \cdot \left( \frac{NA}{2n_{co}} \right)^2 \cdot S \Delta s \cdot E_0, \quad (1)$$

где  $s_0$  — позиция источника облучения вдоль световода;  $\Delta s$  — длина облученного участка.

Параметры  $k_s$  и  $a$  вполне определяют способность волоконного световода захватывать и передавать оптическое излучение, падающее на его боковую поверхность.

Коэффициент экстинкции  $a$  удобно определять по оптическим мощностям, измеренным на противоположных концах световода, т.к.

при этом отсутствует зависимость от  $k_s$ . Действительно, оптическая мощность  $P_-(0)$ , приходящая на противоположный конец световода, может быть описана как:

$$P_-(0) = k_s a \exp(-as_0) \cdot \left( \frac{NA}{2n_{co}} \right) \cdot S \Delta s \cdot E_0. \quad (2)$$

Разделив (1) на (2) и сделав необходимые преобразования, легко получить:

$$a = \frac{1}{L - 2s_0} \ln \frac{P(L)}{P_-(0)}.$$

Зная коэффициент экстинкции, можно определить  $k_s$ :

$$k_s = \frac{\sqrt{P(L) \cdot P_-(0)}}{S \left( \frac{NA}{n_{co}} \right)^2 \cdot E} \cdot \frac{\exp(aL/2)}{a \Delta s}.$$

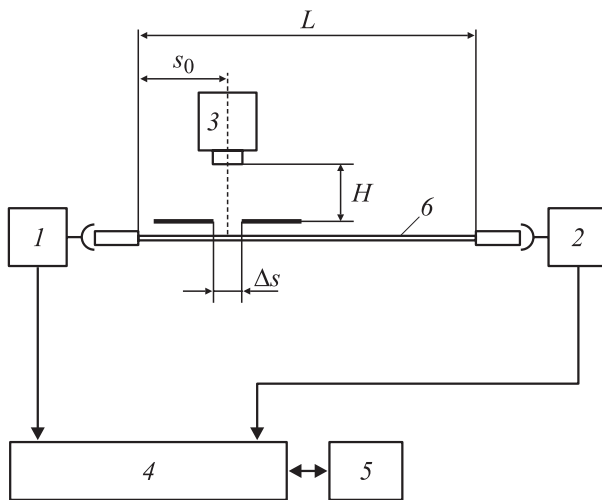
Для экспериментальной оценки параметров световода была проведена серия экспериментов с волоконным световодом из PMMA (ТУ 6-13-84-94) в силиконовой оболочке.

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1.

Облучение производилось импульсной лампой ФПС-0.045 3 с энергией вспышки 8 J и длительностью импульса по полувисоте 0.4 ns. В процессе экспериментов исследуемый световод 6 облучался в нескольких точках импульсным источником 3 на длине  $\Delta s = 30$  см с высоты  $H = 30$  см. Экспериментально определенное среднее значение энергетической освещенности составляло  $E \approx 6$  kW/m<sup>2</sup> в области спектральной чувствительности кремниевого фотодиода 0.4–1.1 μm.

Оптическая мощность, захваченная световодом, измерялась на его противоположных концах с помощью фотоприемников 1, 2 на основе кремниевых pin-фотодиодов с трансимпедансным усилителем.

Электрические импульсы с фотоприемником регистрировались на компьютерной аналого-цифровой 12-разрядной приставке 4 типа ADC212 с временем выборки 1.3 μs. Зарегистрированные сигналы вводились в персональный компьютер 5, где проводилась их обработка — определение средней за импульс оптической мощности, пришедшие на каждый из фотоприемников в выбранных точках световода. По этим значениям определялись коэффициент экстинкции  $a$  и коэффициент  $k_s$ .

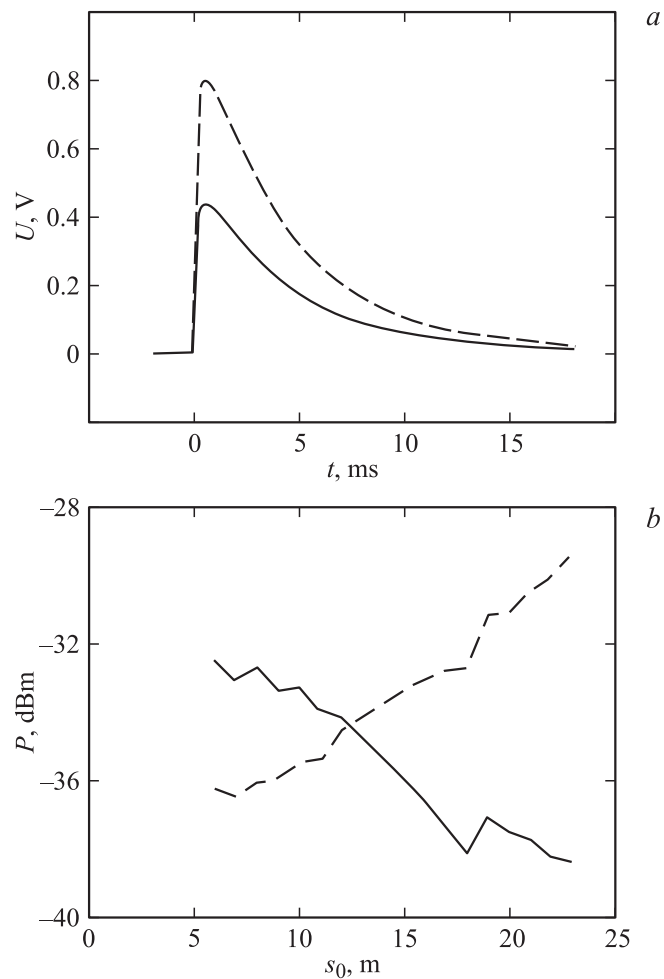


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки по определению параметров волоконного световода.

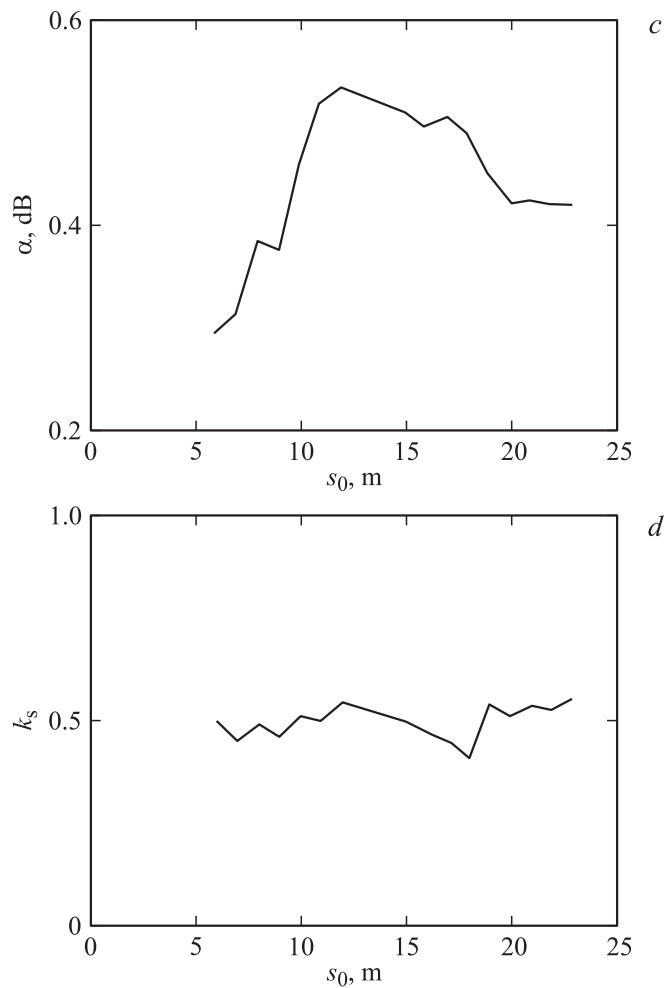
Полимерные оптические волокна из РММА имеют коэффициент экстинкции порядка  $\alpha = 300\text{--}700$  dB/km на длине волны  $\lambda = 0.68$   $\mu\text{m}$ , при этом потери на рассеяние составляют до  $k_s = 0.5$  и более, коэффициент преломления  $n_{co} = 1.5$ . У взятого для исследований световода радиус светопроводящей сердцевины был равен  $R = 0.5$  mm, числовая апертура  $NA = 0.45$ , длина  $L = 25$  m.

На рис. 2 приведены результаты экспериментов. На рис. 2, *a* приведены осциллограммы зарегистрированных сигналов  $P(L)$  и  $P_-(0)$  для  $s_0 = 11$  m. На рис. 2, *b* приведены средние значения оптических мощностей  $P(L)$  и  $P_-(0)$ . На рис. 2, *c* и *d* приведены величины  $\alpha$  и  $k_s$  в зависимости от  $s_0$ .

Измеренное значение коэффициента экстинкции по экспериментальным данным оказалось равным  $\alpha = 0.44$  dB/m со среднеквадратичным отклонением  $\pm 0.07$  dB/m, а коэффициент  $k_s = 0.49$  со среднеквадратичным отклонением  $\pm 0.04$ , что соответствовало ожидаемым значениям в соответствии с полученной математической моделью и параметрами световода.



**Рис. 2.** Результаты экспериментальных исследований по определению параметров волоконного световода. а) Осциллограмма сигналов с фотоприемником 1,2 при  $s_0 = 12$  м. Сплошная линия соответствует  $P_-(0)$ , пунктирная —  $P(L)$ . б) Зависимость средних оптических мощностей, приходящих на концы световода, от координаты облучения  $s_0$ . Сплошная линия соответствует  $P_-(0)$ , пунктирная —  $P(L)$ . в) Зависимость коэффициента экстинкции  $\alpha$  от координаты облучения  $s_0$ . д) Зависимость коэффициента  $k_s$  от координаты облучения  $s_0$ .



**Рис. 2** (продолжение).

При применении волоконного световода в качестве распределенного датчика оптического излучения критерием его качества будет коэффициент экстинкции  $a$ , который, как следует из экстремальной зависимости  $P(L)$  от  $a$  формулы (1), должен быть обратно пропорционален

требуемой длине датчика, чтобы добиться максимального сигнала с дальнего по отношению к фотоприемнику конца. Для этой же цели необходимо, чтобы доля рассеяния  $k_s$  стремилась к единице, что имеет место во всех световодах с большим коэффициентом экстинкции.

Полученные здесь результаты можно будет использовать при проектировании датчиков оптического излучения мощных световых потоков.

Работа была выполнена в рамках Проекта МНТЦ № 2969.

## Список литературы

- [1] Демьянович М.В. и др. // Энергетик. № 5. 2001. С. 24.
- [2] Katsutoshi Muto // Journal of Lightwave Technology. 1989. V. 7. N 7. P. 1029.
- [3] Казачков Ю.П. // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 3. С. 107.