

# Об эффективности оптической стыковки световодов в фотополимеризующейся композиции

С.Н.Менсов, Ю.В.Полуштайцев

*Методами численного моделирования и экспериментально исследована эффективность использования нелинейных оптических волновых процессов в фотополимеризующихся средах для стыковки градиентных световодов. Определено влияние модовой структуры стыкуемых световодов, параметров среды и геометрии формируемого непосредственно излучением коннектора на его коэффициент передачи. Экспериментально реализовано оптическое соединение многомодовых волокон на расстоянии до 3 мм и при их осевом смещении до 150 мкм с энергетическими потерями менее 5 %.*

**Ключевые слова:** оптическое соединение световодов, фотополимеризующиеся композиции, нелинейные волновые процессы.

## 1. Введение

К настоящему времени опубликовано значительное число теоретических и экспериментальных работ [1–9], показывающих возможность формирования непосредственно световым излучением оптических волноводящих структур в фотополимеризующихся композициях (ФПК). Требуемые здесь световые потоки не превышают 10 мВт/мм<sup>2</sup>, а время создания полимерного световода длиной в миллиметр составляет несколько десятков секунд. Нелинейные волновые процессы в ФПК также позволяют за счёт взаимодействия световых пучков формировать искривлённые оптические каналы [7, 8] и проводить их объединение в области пересечения [6–9]. Режимы самоканализирования в таких средах реализуются не только для гауссовых пучков – неуширяющийся волноведущий канал можно сформировать и излучением, выходящим из торца даже многомодового волокна [4].

Естественным прикладным применением этих нелинейных оптических эффектов является стыковка стандартных световодов. Действительно, фотополимеры способны после окончания экспонирования сохранять градиентные по показателю преломления структуры. К тому же современные слабопоглощающие фотополимеризующиеся среды имеют «красную» границу фоточувствительности в пределах видимого диапазона. Поэтому волноведущие структуры, формируемые коротковолновым излучением, можно в дальнейшем использовать для передачи инфракрасных световых потоков. При этом возможность стыковки несоосно расположенных световодов позволяет значительно снизить требования к исходному позиционированию их торцов. Однако коэффициент передачи таких, формируемых светом, полимерных стыковочных элементов (коннекторов) будет определяться не только параметрами ФПК, но и зависеть от па-

раметров соединяемых световодов, исходного взаиморасположения их торцов. В данной работе методом численного моделирования оптимизируются эти параметры и приводятся экспериментальные результаты по оптической стыковке градиентных световодов в ФПК.

## 2. Численное моделирование

Процесс оптического соединения двух световодов анализировался в рамках следующей модели. Рассматривалось формирование соединительного элемента в ФПК при воздействии излучения, выходящего из торцов стыкуемых волокон (рис.1) с гауссовым профилем показателя преломления  $\tilde{n}(x, y, z) = \tilde{n}_0 + \Delta\tilde{n}_{\max} \exp\{-(x^2 + y^2)/\tilde{a}^2\}$ , где  $x$  и  $y$  – поперечные координаты;  $z$  – продольная координата;  $\tilde{a}$  – радиусы световодов;  $\Delta\tilde{n}_{\max}$  – максимальное изменение показателя преломления в волокне;  $\tilde{n}_0$  – значение показателя преломления на его периферии. В пространстве между соединяемыми торцами световодов излучение распространялось в исходно однородной ФПК. Под действием света в ФПК происходил необратимый переход от жидкого мономера к твёрдому полимеру, сопровождающийся возрастанием показателя преломления. Зависимость изменения показателя преломления ФПК от интенсивности излучения  $J(x, y, z, t)$  (экспозиционная характеристика) была аппроксимирована модифицированной функцией Рэлея [10]:

$$\Delta n(x, y, z, H) = n(x, y, z, H) - n_0 = \Delta n_{\max} \{1 - \exp[-H(x, y, z, t)^\gamma]\}, \quad (1)$$

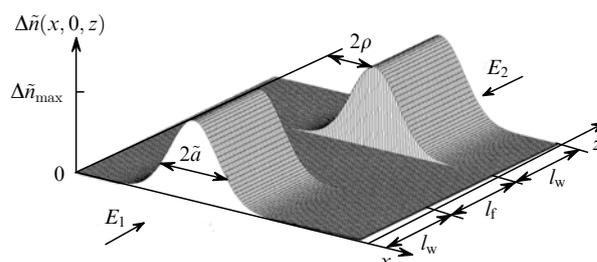


Рис.1. Взаимное расположение соединяемых световодов;  $l_w$  – длины световодов,  $l_f$  – расстояние между их выходными торцами,  $2\rho$  – смещение их осей.

С.Н.Менсов. Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; e-mail: mensov@rf.unn.ru  
Ю.В.Полуштайцев. Институт металлоорганической химии им. Г.А.Разуваева РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 2 февраля 2007 г., после доработки – 4 апреля 2007 г.

здесь

$$H(x, y, z, t) = \frac{1}{H_0} \int_0^t J(x, y, z, \tau) d\tau \quad (2)$$

– нормированная экспозиция;  $t$  – время экспозиции;  $n_0$  – показатель преломления мономера;  $\Delta n_{\max}$  – максимальное изменение показателя преломления ФПК;  $\gamma$  и  $H_0$  – параметры, характеризующие контраст композиции.

На входных торцах соединяемых световодов распределение поля было задано следующим образом:

$$E_1(x, y, 0, H) = E_0 \exp \left\{ - \left[ (x + \rho)^2 + y^2 \right] / 2a^2 \right\}, \quad (3)$$

$$E_2(x, y, L, H) = E_0 \exp \left\{ - \left[ (x - \rho)^2 + y^2 \right] / 2a^2 \right\},$$

где  $a$  – полуширина пучка по интенсивности, а  $L = 2l_w + l_f$ . Распределение интенсивности каждого из пучков  $J(x, y, z, \tau) = |E(x, y, z, \tau)|^2$  находилось из решения параболического уравнения, которое в безразмерных переменных  $x' = x/a, y' = y/a, z' = z/ka^2$  имеет вид [5, 11]

$$\pm 2i \frac{\partial E'(x', y', z', H)}{\partial z'} = \Delta_{\perp} E'(x', y', z', H) + G^2 \Delta n'(x', y', z', H) E'(x', y', z', H), \quad (4)$$

где  $E' = E/E_0; \Delta n' = \Delta n/\Delta n_{\max}; G = ka(2\Delta n_{\max}/n_0)^{1/2}; k$  – волновое число. Знак «+» в левой части (4) соответствует распространению излучения в прямом направлении, а знак «–» – в обратном. Суммарная интенсивность излучения для двух некогерентных световых пучков находилась путём сложения квадратов амплитуд их полей. Характерные профили распределений показателя преломления в сформированных светом полимерных вставках при экспозиции  $H = 1.5$  и условии  $n_0 = \tilde{n}_0, \Delta n_{\max} = \Delta \tilde{n}_{\max}$  представлены на рис.2. Здесь использованы следующие значения параметров:  $2\pi/k = 0.63$  мкм,  $\Delta n_{\max}/n_0 = 10^{-3}$  и  $\gamma = 3$ .

На следующем этапе моделирования анализировалось распространение излучения в оптически сформированном коннекторе. Исследование энергетических потерь в стыковочном узле проводилось для протяжённых соединяемых волноводов ( $l_w \sim 14ka^2$ ). Такая длина входной области обеспечивала формирование собственных модовых структур излучения на выходных торцах стыкуемых волокон. Коэффициент передачи стыковочного модуля оценивался по формуле

$$K = \frac{S(L)}{S(l_w)}. \quad (5)$$

Здесь

$$S(z) = \frac{1}{\pi b^2} \int_{-b+\rho}^{b+\rho} \int_{-(b^2-x^2)^{1/2}}^{(b^2-x^2)^{1/2}} [n_0 + \Delta n(x, y, z, H)] \times |E(x, y, z, H)|^2 dy dx \quad (6)$$

– усреднённый по апертуре  $2b$  вектор Пойнтинга [11]. Интенсивность излучения, прошедшего через соединение, оценивалась в апертуре  $2b = 6\tilde{a}$ .

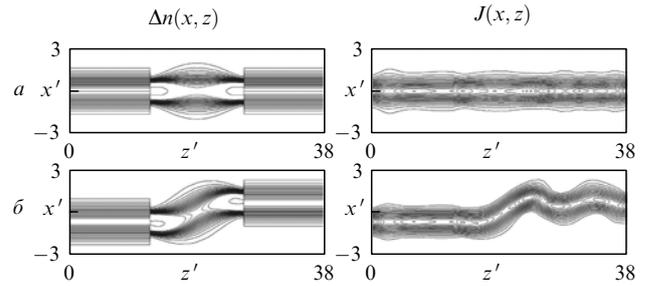


Рис.2. Распределение градиента показателя преломления  $\Delta n(x, z)$  и интенсивности излучения  $J(x, z)$ , вышедшего из левого световода, в сформированном из ФПК волноведущем канале при соосном (а) и несоосном (б) расположении световодов.

Была исследована зависимость коэффициента передачи (5) создаваемого излучением стыковочного модуля от его длины  $l_f$  и от поперечного смещения  $2\rho$  соединяемых световодов. Результаты моделирования показали, что стыковку квазиодномодовых градиентных волокон ( $2\tilde{a} = 7$  мкм,  $G \approx 1.1$ ), для которых наиболее характерны дифракционные потери в однородном по показателю преломления промежутке между их торцами (рис.3,а), можно достаточно эффективно осуществлять в фотополимерах и при значительных расстояниях между их торцами (рис.2,а и 3,б). При этом благодаря возможности формирования из ФПК общего волноведущего канала двумя несоосными пучками допустимо стыковать и волокна с существенным поперечным смещением (рис.2,б и 3,б). Нетрудно заметить, что величина потерь в оптически формируемом полимерном соединении в этом случае не превышает нескольких процентов.

Также исследовалось влияние показателя преломления ФПК на коэффициент передачи  $K(H)$ . В настоящее время существует множество олигомеров, обладающих разнообразными оптическими характеристиками. Возможность полимеризации их комбинаций позволяет обеспечивать в синтезируемом волноводе значения показателя преломления и его градиента, близкие к аналогичным параметрам кварцевых волокон. Именно в этом случае достигается наибольшая эффективность соединительного элемента при  $H \sim 1.5$  (кривая 1 на рис.4), а формируемая светом градиентная волноведущая структура обладает достаточной механической прочностью. Более продолжительная полимеризация за счёт эффекта насыщения в экспозиционной характеристике ФПК (1) приводит к искажению формы синтезируемого световода. Если  $\Delta n_{\max} > \Delta \tilde{n}_{\max}$  (кривая 2 на рис.4), то согласование про-

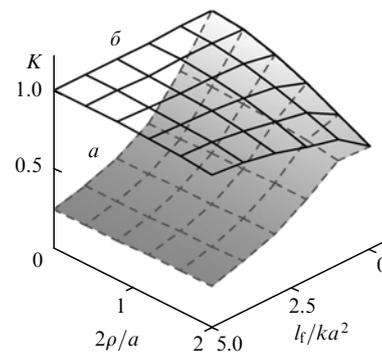


Рис.3. Зависимость коэффициента передачи от поперечного сдвига световодов и расстояния между их торцами в однородном пространстве (а) и в сформированном светом коннекторе из ФПК (б).

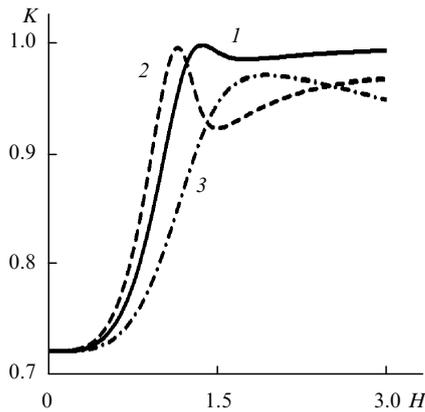


Рис.4. Зависимости коэффициента передачи от экспозиции при различных соотношениях показателей преломления ФПК и световода:  $\Delta n_{\max} = \Delta \tilde{n}_{\max}$  (1),  $\Delta n_{\max} = 1.5\Delta \tilde{n}_{\max}$  (2),  $\Delta n_{\max} = 0.5\Delta \tilde{n}_{\max}$  (3).

исходит при меньших экспозициях, когда изменение показателя преломления в канале достигает  $\Delta \tilde{n}_{\max}$ . Следовательно, дальнейшее экспонирование приводит к снижению значения коэффициента передачи. При  $\Delta n_{\max} < \Delta \tilde{n}_{\max}$  качество коннектора при любом значении  $H$  фотополимеризующейся среды будет заведомо ниже (кривая 3 на рис.4).

Если в одномодовых световодах продольное распределение интенсивности модулировано слабо (см. рис.2), то в волноведущих структурах с большим значением волнового параметра  $G$  оно существенно неоднородно, что будет влиять на качество синтезируемого светом фотополимерного коннектора. Например, для одномодовых волокон ( $2\tilde{a} = 40$  мкм,  $G \approx 6.3$ ) эффективное соединение достигается тогда, когда излучение, формирующее полимерный канал, имеет максимум интенсивности на границе полимеризующейся области (рис.5,а и 6,а). В противном случае формируется сильно неоднородный волноведущий канал, излучение в нём локализуется слабо и, следовательно, коэффициент передачи  $K(H)$  при  $H \sim 1.5$  становится существенно меньше (рис.5,б и 6,б). Это, в свою очередь, накладывает дополнительные и зачастую трудно реализуемые на практике условия на длину соединяемых многомодовых волокон.

Исключить данную зависимость и снизить величину возможных потерь можно несколькими способами. Наиболее простой из них – увеличить продолжительность экспонирования ФПК. Действительно, в результате эффекта насыщения, характерного для фотополимеризующихся сред (1), дальнейшая полимеризация канала приводит к его зарастанию (рис.5,в) и к увеличению коэффициента передачи (рис.6,в).

Положительный эффект даёт здесь и увеличение углового спектра излучения, распространяющегося в соединяемых световодах. Так, при уменьшении ширины воздействующего пучка всего на 20%, волноведущий канал становится более однородным (рис.5,з), а его коэффициент передачи увеличивается (рис.6,з). Тем не менее, указанные способы недостаточно эффективны, поскольку требуется строго выдерживать режимы экспонирования ФПК и контролировать процесс формирования волноведущего канала.

Проблему зависимости коэффициента передачи полимерного коннектора от структуры поля на торцах стыкуемых световодов более радикально можно решить, используя для оптического формирования волноведу-

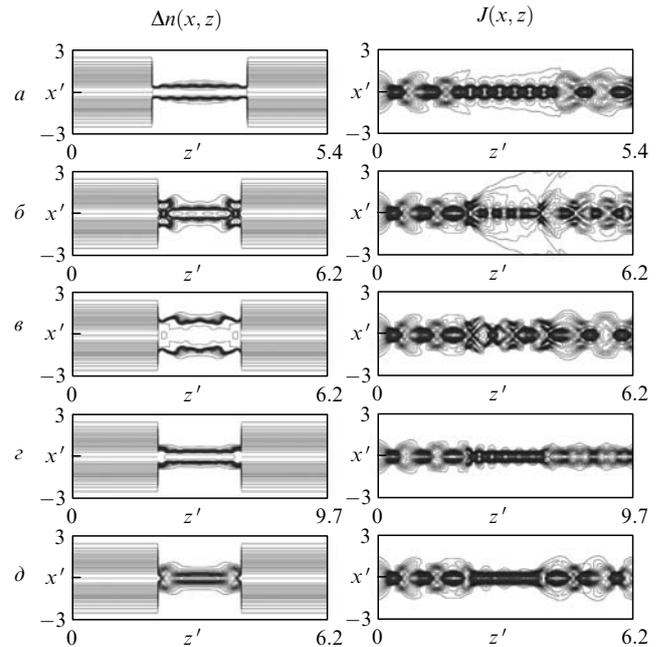


Рис.5. Распределения градиента показателя преломления  $\Delta n(x, z)$  и интенсивности излучения  $J(x, z)$ , вышедшего из левого световода, в сформированном из ФПК волноведущем канале для различных распределений интенсивности поля в стыкуемых световодах при расположении максимума интенсивности на выходном торце световода (а), в случае, если распределение интенсивности на торце не максимально (б), при глубоком «насыщении» канала (в), при воздействии излучения с широким угловым спектром (г) и при использовании монохроматического излучения (д).

щей структуры немонахроматическое излучение. Современные ФПК чувствительны к излучению в достаточно широком спектральном диапазоне, что позволяет проводить полимеризацию, воздействуя на ФПК излучением двух длин волн (например,  $2\pi/k_1 = 0.63$  мкм и  $2\pi/k_2 = 0.53$  мкм). Для разных значений волнового числа распределения поля и, следовательно, положения локальных максимумов интенсивности различны. Тогда становится несущественным продольное распределение интенсивности воздействующего излучения. Поэтому формирование полимерной вставки немонахроматическим излучением позволяет значительно повысить эффективность соединения (рис.5,д и 6,д). Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что нелинейные оптические волновые процессы в фотополимеризующих-

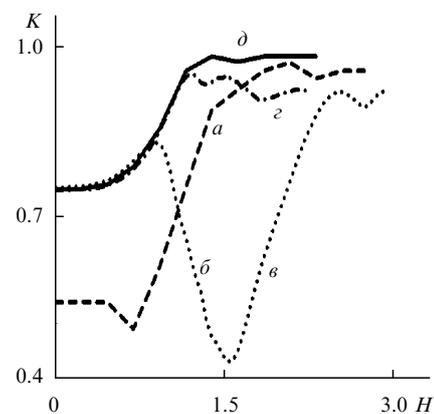


Рис.6. Зависимости коэффициента передачи полимерных структур, представленных на рис.5, от экспозиции воздействующего излучения. Обозначения кривых соответствуют обозначениям рис.5.

ся средах можно эффективно использовать для соединения и многомодовых световодов.

### 3. Экспериментальное исследование

Экспериментальные исследования оптического соединения световодов проводились в ФПК на основе олигомера ОКМ-2 с хинонным фотоиницирующим комплексом [12]. Красная граница её светочувствительности составляет 0.65 мкм. Для данной ФПК характерно малое поглощение излучения в видимом и инфракрасном диапазонах, и, следовательно, в ней эффективно реализуются нелинейные оптические волновые процессы на достаточно протяжённых трассах [2, 8].

Схема проведения эксперимента представлена на рис.7. Излучение полупроводниковых лазерных модулей 1 (длина волны 0.63 мкм), обеспечивающих в световодах интенсивность порядка 3 мВт/мм<sup>2</sup>, фокусировалось с помощью короткофокусных линз 2 на торцы оптических волокон 3, свободные концы которых помещались в реактор 4 с фотополимером (реактор представлял собой две стеклянные пластинки, поперечно ограничивающие слой ФПК). Слой создавался достаточно толстым (~200 мкм), чтобы исключить возможное влияние границ реактора. Динамика процессов формирования градиентных структур регистрировалась видеокамерой 5 при боковой подсветке инфракрасным излучением лазера 6, не вызывающим реакции полимеризации. Взаимное положение торцов световодов задавалось микроманипуляторами, которые позволяли независимо менять взаимный наклон волокон, поперечное смещение и расстояние между торцами. Схема измерения коэффициента пропускания синтезируемого коннектора состояла из ИК лазера 7 (длина волны 0.85 мкм, интенсивность в волокне ~0.1 Вт/мм<sup>2</sup>), сумматора 8, разветвителя 9 и фотодиода 10, входное окно которого было закрыто ИК фильтром (КС17). При проведении эксперимента исследовалось качество синтезируемого полимерного коннектора при различном расположении торцов стыкуемых волокон. На рис.8 представлены результаты исследования процесса оптической стыковки в ФПК стандартных многомодовых градиентных волокон с диаметром сердцевины 50 мкм и размером рабочей оболочки 125 мкм. Значение волноводного параметра  $G$  для них эквивалентно используемому при численном моделировании.

Установлено, что энергетическая эффективность оптической стыковки не имеет выраженной зависимости от увеличения промежутка между торцами волокон при их соосном расположении (рис.8,а,б). Благодаря взаимодей-

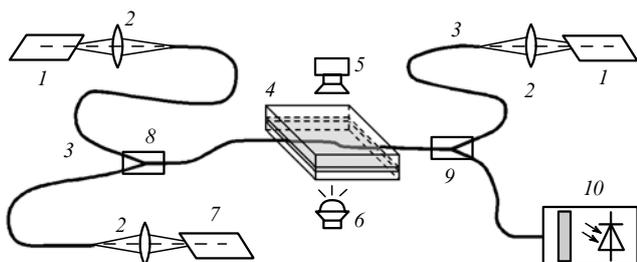


Рис.7. Оптическая схема установки:

1 – полупроводниковые лазеры; 2 – линзы; 3 – световоды; 4 – реактор с ФПК; 5 – видеокамера; 6 – источник ИК подсветки; 7 – ИК лазер; 8 – сумматор; 9 – разветвитель, 10 – фотодиод с ИК фильтром.

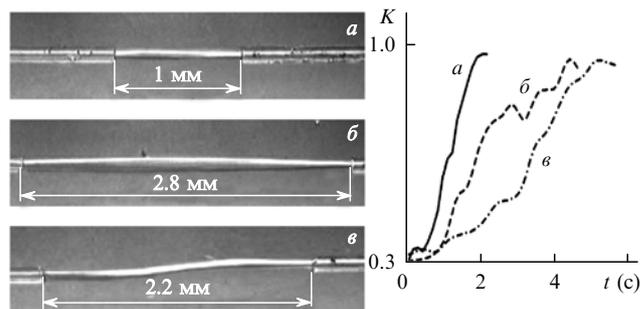


Рис.8. Результаты эксперимента: фотографии синтезированных светом полимерных структур и соответствующие графики зависимости их коэффициента передачи от продолжительности воздействия инициирующего полимеризацию излучения.

ствию световых пучков в ФПК возможно формирование общего волноведущего канала и для поперечно смещённых волокон (рис.8,в), где  $2\rho = 150$  мкм. После окончания экспонирования сформированная из ФПК градиентная структура сохраняется – дальше коэффициент передачи не изменяется даже при распространении через неё сравнительно мощного ИК излучения.

### 4. Заключение

Таким образом, используя нелинейные оптические волновые процессы в прозрачных фотополимеризующихся средах, можно достаточно эффективно проводить их соединение даже на значительном расстоянии непосредственно излучением, выходящим из торцов световодов. Формируемые при этом градиентные полимерные волноведущие структуры могут быть и непрямолинейными – допускается существенное осевое смещение стыкуемых волокон. Наличие красной границы фотоочувствительности ФПК позволяет в дальнейшем без изменения свойств коннекторов пропускать по ним стандартно используемое в волоконной оптике ИК излучение. При необходимости также сделать полимерный коннектор нечувствительным и к видимому излучению за счёт применения в фотополимеризующихся средах короткоживущих фотоинициаторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-03-32706-а и № – 06-03-08186-офи).

1. Monro T.M., Poladian L., de Sterke C.M. *Phys. Rev. E*, **57**, 1104 (1998).
2. Вдовин В.А., Лонин А.Л., Менсов С.Н. *ЖТФ*, **71** (7), 67 (2001).
3. Kagami M., Yamashita T., Ito H. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1079 (2001).
4. Лонин А.Л., Менсов С.Н. *Письма в ЖТФ*, **28** (13), 15 (2002).
5. Лонин А.Л., Менсов С.Н., Полуштайцев Ю.В. *Письма в ЖЭТФ*, **79** (11), 643 (2004).
6. Лонин А.Л., Менсов С.Н. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **46** (2), 1 (2003).
7. Shoji S., Kawata S., Sukhorukov A.A., et al. *Opt. Lett.*, **27**, 185 (2002).
8. Менсов С.Н., Полуштайцев Ю.В. *Оптика и спектроскопия*, **100** (1), 136 (2006).
9. Менсов С.Н., Полуштайцев Ю.В. *Физика волн. проц. и радиотех. сист.*, **8** (1), 51 (2005).
10. Рошупкин В.П., Озерковский Б.В., Карапетян З.А. *Высокомол. соединения А*, **19**, 2239 (1977).
11. Виноградов М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. *Теория волн* (М.: Наука, 1979).
12. Абакумов Г.А., Мамышева О.Н., Мураев В.А. и др. Патент РФ RU 2138070 (1999).