

Соединение одномодовых ИК световодов видимым излучением в фотополимеризующейся композиции

С.Н.Менсов, Ю.В.Полуштайцев, Е.М.Дианов, М.И.Беловолов, В.Б.Махалов

Численно и экспериментально рассмотрены особенности оптического соединения одномодовых волоконных световодов лазерными пучками, распространяющимися навстречу из их торцов. Показано, что эффективная стыковка одномодовых волоконных световодов на длине волны 1.55 мкм возможна при самоканалировании и взаимодействии в фотополимеризующейся среде оптических пучков с длиной волны 0.63 мкм. При этом излишнее продолжительное экспонирование может приводить к снижению коэффициента передачи, особенно при несоосном расположении торцов соединяемых световодов. Экспериментально получено, что при длине полимерного коннектора 1–2 мм и радиальном смещении до 15 мкм эффективность оптической стыковки одномодовых световодов типа SMF-28 в фотополимеризующейся композиции на основе ОКМ-2 может составлять 80%–90%, а для волокна CS-980 – 50%–60%.

Ключевые слова: оптическая стыковка световодов, фотополимеризующаяся композиция, нелинейные волновые процессы.

1. Введение

Оптический синтез протяжённых волноведущих каналов в фотополимеризующихся средах возможен не только для сфокусированных на поверхность фотополимера лазерных пучков [1–3], но и для излучения, выходящего из торцов стандартных световодов [4, 5]. Это позволяет непосредственно светом создавать различные волноведущие структуры, в том числе стыкующие элементы для многомодовых волокон [6]. Высокая эффективность оптической стыковки световодов в современных слабопоглощающих фотополимеризующихся композициях (ФПК), чувствительных к видимому излучению, обусловлена согласованием синтезируемой структуры и самих световодов – поперечный профиль полимерного канала близок к распределению показателя преломления в градиентном световоде [3, 4, 6]. Однако в современных линиях оптической связи и датчиках, как правило, применяются одномодовые волоконные световоды со ступенчатым профилем показателя преломления и различными размерами поля основной моды. Для локализации в них излучения требуются большие градиенты показателя преломления [7]. С другой стороны, оптические пучки с существенной дифракционной расходимостью, распро-

страняющиеся в фотополимеризующихся средах, способны оказывать взаимное влияние на трассах протяжённостью всего несколько миллиметров [8]. В частности, возможно формирование в ФПК единой непрямолинейной волноведущей структуры встречными пучками, имеющими значительное поперечное смещение [9]. Это особенно важно при стыковке одномодовых световодов, когда диаметр сердцевин составляет всего несколько микрометров. Благодаря возможности оптического соединения световодов в ФПК становится реальным снизить требования к точности позиционирования торцов волокон при их стыковке [9]. К тому же фотополимеры обладают красной границей фоточувствительности, которая обычно находится в видимой области спектра [10]. Это обеспечивает устойчивость синтезированных полимерных каналов к обычно используемому для передачи информации ИК излучению, хотя коэффициент передачи диэлектрической волноведущей структуры зависит от длины волны [7].

В данной работе численно и экспериментально исследуется способность созданной видимым излучением полимерной структуры эффективно направлять во встречное волокно более длинноволновое ИК излучение. Анализ эффективности оптической стыковки световодов в ФПК был проведён для стандартных телекоммуникационных одномодовых волокон марок SMF-28 и CS-980, имеющих существенно различные (10 и 3.5 мкм) размеры поля основной моды.

2. Модель численного исследования

Существует ряд работ [4–6], в которых изучены особенности формирования волноведущих структур излучением, распространяющимся в ФПК из торцов градиентных световодов. Предложенная модель численного анализа процесса взаимодействия оптического излучения с фотополимеризующейся средой [6] применима и для рассматриваемой задачи (рис.1). Согласно этой модели

С.Н.Менсов. Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23а, корп. 4; Институт металлоорганической химии им. Г.А.Разуваева РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: mensov@gf.unn.ru

Ю.В.Полуштайцев. Институт металлоорганической химии им. Г.А.Разуваева РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49

Е.М.Дианов, М.И.Беловолов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

В.Б.Махалов. Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23а, корп. 4

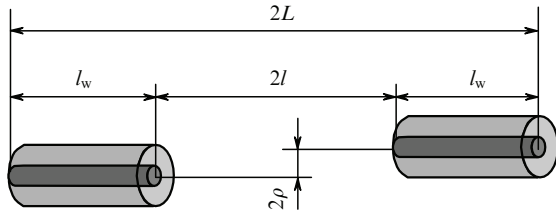


Рис.1. Взаимное расположение световодов.

распределение интенсивности каждого из пучков $J_{1,2}(x, y, z, \tau) = |E_{1,2}(x, y, z, \tau)|^2$ находилось из решения параболического уравнения

$$\begin{aligned} \pm 2ik \frac{\partial E(x, y, z, H)}{\partial z} &= \Delta_{\perp} E(x, y, z, H) \\ &+ 2k \frac{\Delta n(x, y, z, H)}{n_0} E(x, y, z, H) \end{aligned} \quad (1)$$

со стационарными граничными условиями на входных торцах соединяемых одномодовых световодов:

$$E_{1,2}(x, y, \mp L, H) = E_0 \exp \left\{ -\frac{(x \pm \rho)^2 + y^2}{2a^2} \right\}. \quad (2)$$

Поперечный профиль этих световодов задавался экспоненциально спадающей функцией с аргументом высокого порядка. Между торцами световодов нелинейная добавка к показателю преломления вычислялась в соответствии с экспозиционной характеристикой среды, где в выражении для экспозиции H использовалась суммарная интенсивность двух некогерентных пучков:

$$H(x, y, z, t) = \frac{1}{H_0} \int_0^t [J_1(x, y, z, \tau) + J_2(x, y, z, \tau)] d\tau. \quad (3)$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \Delta n(x, y, z, H) &= \begin{cases} \Delta n_{\max} \{1 - \exp[-H(x, y, z, t)^\gamma]\}, & |z| \leq l, \\ \Delta n_{\max}^c \exp \left\{ -\frac{[(x \pm \rho)^2 + y^2]^{16}}{a_c^{32}} \right\}, & |z| > l, \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

где a – полуширина пучка; $2a_c$ – диаметр сердцевины волокна; k – волновое число; t – время экспозиции; Δn_{\max}^c – максимальное изменение показателя преломления сердцевины световода; n_0 – показатель преломления мономера; Δn_{\max} – максимальное изменение показателя преломления ФПК; γ и H_0 – параметры, характеризующие контраст композиции. Знак плюс в левой части уравнения (1) соответствует распространению излучения в прямом направлении, а знак минус – в обратном.

Поскольку синтезируемые полимерные структуры предлагается использовать для оптического соединения одномодовых световодов, то при численном моделировании параллельно исследовалась и эффективность прохождения через них ИК излучения на телекоммуникационной длине волны ($\lambda = 1.55$ мкм). Оценка коэффициента передачи стыковочного модуля вычислялась по формуле

$$K = S(L)/S(l_w), \quad (5)$$

где

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

– значение усреднённого по апертуре $2b$ вектора Пойнтинга.

Интенсивность излучения, прошедшего через соединение, оценивалась в апертуре волокна $2b = 6a_c$.

3. Анализ эффективности оптического соединения световодов

В качестве параметров стыкуемых волокон были выбраны значения, соответствующие стандартным телекоммуникационным одномодовым световодам SMF-28 с диаметром сердцевины $2a_c = 10$ мкм и максимальным изменением показателя преломления сердцевины $\Delta n_{\max}^c = 0.36\%$. Для ФПК были использованы следующие значения параметров: $\Delta n_{\max} = 0.2\%$ и $\gamma = 3$. Согласно рис.2, градиентный полимерный канал возможно сформировать излучением, распространяющимся из торца одномодового световода. Поперечное распределение показателя преломления в синтезированном канале отличается от прямоугольного и соответствует распределению интенсивности воздействующего излучения с учётом экспо-

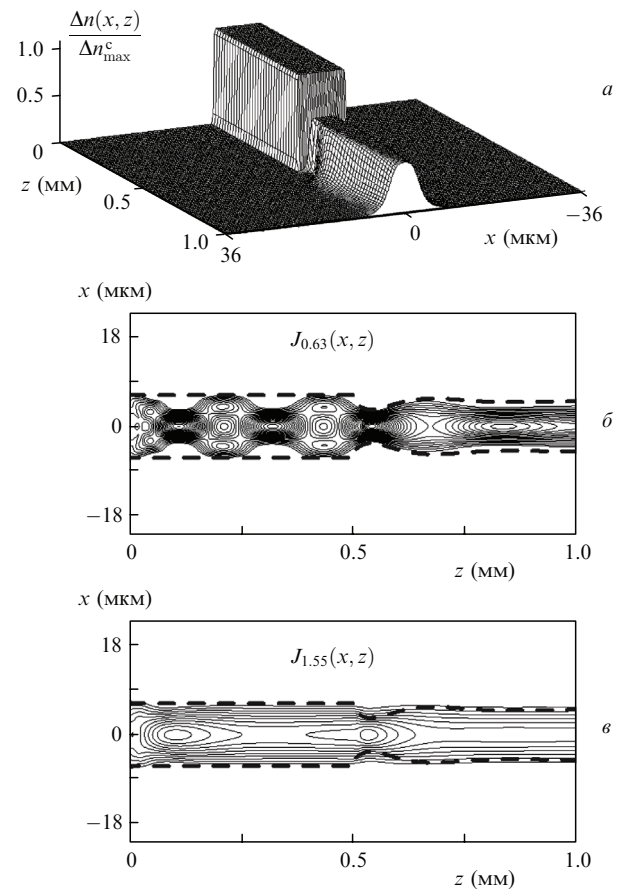


Рис.2. Распределение показателя преломления сформированного видимым светом ($\lambda = 0.63$ мкм) полимерного канала (а), а также распределения интенсивностей видимого света (б) и распространяющегося по каналу ИК излучения ($\lambda = 1.55$ мкм) (в).

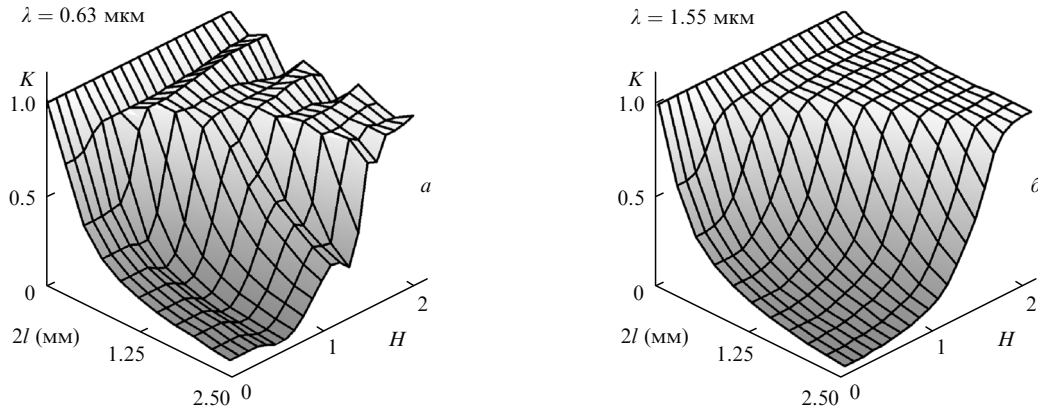


Рис.3. Зависимости коэффициента передачи коннектора от экспозиции и расстояния между торцами световодов для излучения с $\lambda = 0.63$ (а) и 1.55 мкм (б).

зиционной характеристики ФПК. Это создаёт предпосылки для получения высокой эффективности оптической стыковки одномодовых световодов.

В соответствии с результатами численного моделирования (рис.3) при наличии даже небольшого зазора между торцами передача энергии во встречное волокно до начала полимеризации (в изначально однородной среде) происходит с существенными потерями. Для ИК излучения, обладающего большей дифракционной расходимостью, потери на этом же зазоре выше, чем для инициирующего полимеризацию красного света. При экспонировании происходит рост полимерного канала в зазоре между торцами световодов, сопровождающийся

увеличением коэффициента передачи, значение которого для видимого света немонотонно зависит как от экспозиции, так и от величины зазора. Для ИК излучения волноводный параметр в полимерном соединении $G = ka \times (2n_{\max}/n_0)^{0.5}$ близок к единице – распределение поля слабо модулировано вдоль оси распространения [6, 7]. Поэтому зависимость $K(H, l)$ более гладкая. При этом для формирования более протяжённого канала требуется большее экспонирование среды.

Синтезируемые в ФПК градиентные полимерные волноводные структуры могут быть и непрямолинейными – допускается существенное осевое смещение стыкуемых волокон [8, 9]. На рис.4 приведена зависимость

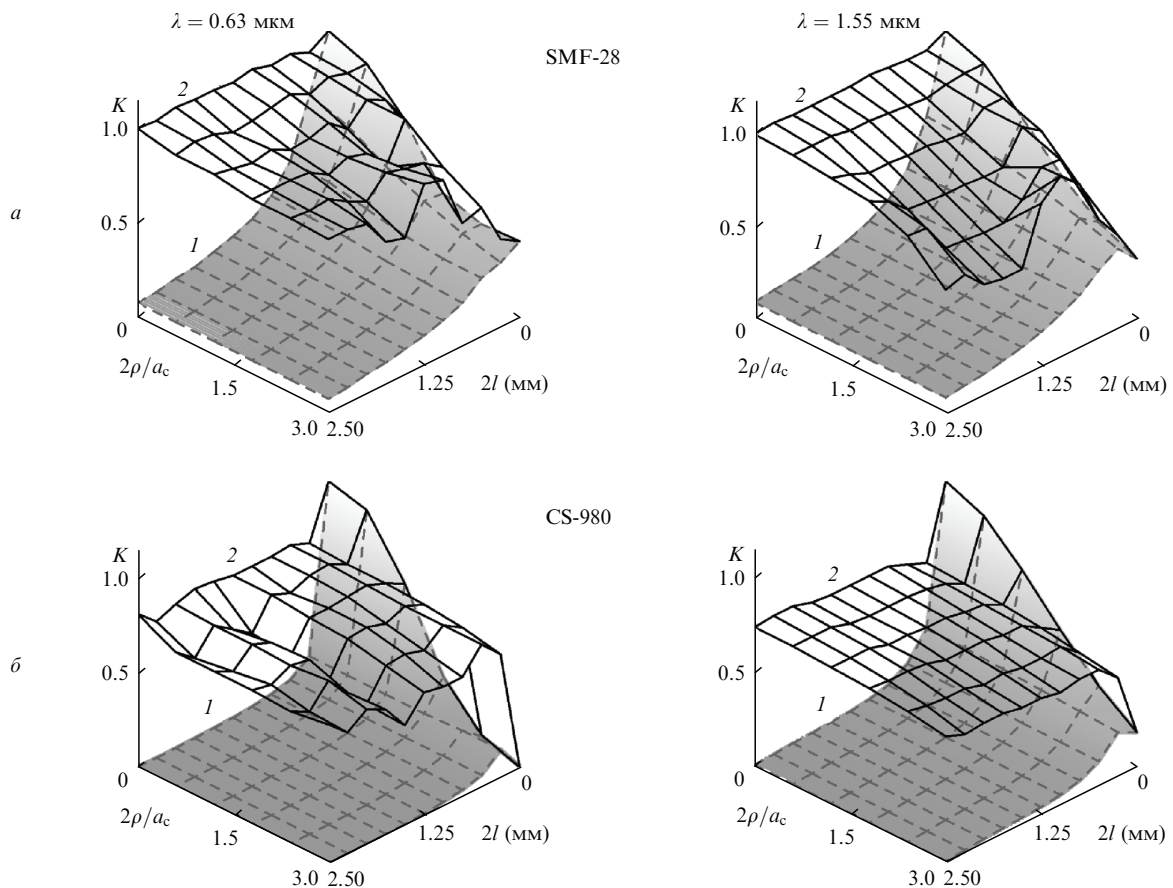


Рис.4. Зависимости коэффициента передачи от поперечного сдвига волокон SMF-28 (а) и волокон CS-980 (б) и от расстояния между их торцами: распределения до начала полимеризации (1) и после окончания формирования оптического соединения (2).

коэффициента передачи (5) создаваемого стыковочного модуля от его длины $2l$ и поперечного смещения 2ρ соединяемых световодов. Расчёт был проведён для параметров взаимного расположения торцов световодов, соответствующих условиям «взаимозахвата» встречных пучков (формирования единого волноведущего канала) [9]. Если расстояние между торцами превышает протяжённость трассы наиболее эффективного взаимодействия (две дифракционные длины), то максимальный коэффициент передачи стыковочного модуля не имеет выраженной зависимости от поперечного смещения торцов волокон (рис.4,а).

Аналогичным образом было осуществлено моделирование процесса стыковки двух световодов с меньшим диаметром сердцевин $2a_c = 3.5$ мкм (волокна марки CS-980, для которых $\Delta n_{\text{max}}^c = 1\%$). Согласно результатам выполненных расчётов (рис.4,б) трассы протяжённостью всего в 0.5 мм достаточно для формирования единого волноведущего канала. Поэтому и полученная зависимость $K(\rho, l)$ более гладкая. Однако стоит отметить, что при одинаковых относительных смещениях торцов волокон ρ/a_c физическое расстояние между осями для CS-980 будет существенно меньше, чем для SMF-28.

4. Экспериментальное исследование

Для экспериментального исследования процессов оптического соединения одномодовых световодов в фотополимеризующейся среде была использована установка [6], позволяющая позиционировать торцы волокон, создавать волноведущие структуры, а также измерять коэффициент передачи пропускания сформированных светом полимерных каналов. В оптической схеме установки были использованы одномодовые световоды SMF-28 или CS-980 и соответствующие им мультиплексоры. Для измерения коэффициента передачи синтезируемых полимерных структур был применён стабилизированный ИК лазер ($\lambda = 1.55$ мкм). Его излучение передавалось через оптическое соединение одновременно с красным излучением ($\lambda = 0.63$ мкм), формирующим световедущий канал

в ФПК. Экспериментальные исследования проводились для ФПК на основе ОКМ-2 с хинонным фотоиницирующим комплексом [10].

Экспериментально полученные зависимости изменения коэффициента передачи во времени подтверждают результаты численного моделирования – в ФПК можно оптически создавать соединительные модули для передачи ИК излучения. Как видно из рис.5, при малых зазорах между торцами соосно расположенных стыкуемых световодов возрастание коэффициента передачи $K(t)$ не монотонно. Появление первого максимума соответствует моменту согласования световода и образующегося полимерного канала, когда относительное изменение показателя преломления δn в нём становится $\sim 50\%$. С дальнейшим увеличением показателя преломления ФПК согласование волноводов может нарушаться из-за неоднородной полимеризации вдоль трассы распространения излучения – наблюдается «провал» передаточного коэффициента.

Подобное поведение коэффициента передачи объясняется особенностями формирования канала на коротких трассах при одновременном воздействии двух пучков. Волноводные свойства создаваемой полимерной структуры зависят от распределения иницирующего излучения в объёме ФПК, которое, в свою очередь, определяется начальным расстоянием между торцами световодов. Если расстояние между входными плоскостями сравнимо с дифракционной длиной пучка или меньше неё, то в центральной области ($z = 0$), где суммарная интенсивность максимальна, скорость модификации среды, а следовательно и скорость роста канала, выше. В этом случае изменение показателя преломления начинается не только вблизи входа излучения в полимеризующуюся среду, но и в этой центральной области. Такой неравномерный по трассе распространения излучения характер формирования волноведущего канала обуславливает немонотонность зависимости коэффициента передачи от экспозиции.

На более протяжённых трассах взаимное влияние пучков незначительно, и каналы формируются последо-

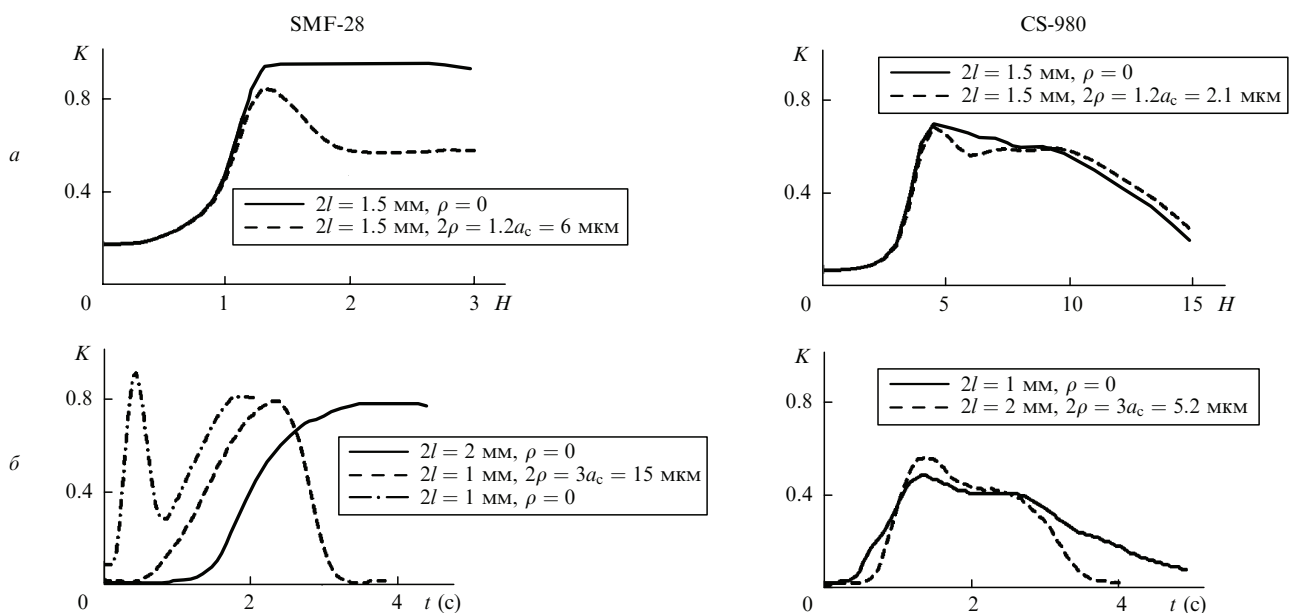


Рис.5. Динамика коэффициента передачи полимерного коннектора на $\lambda = 1.55$ мкм: результаты численного моделирования (а) и экспериментально полученные зависимости (б).

вательно [9] навстречу от торцов световодов. В этом случае эффективность передачи излучения монотонно возрастает с увеличением экспозиции. Промежуточное согласование не наблюдается и при формировании непрямолинейных волноведущих структур, когда изначально оптические оси световодов смещены по поперечной координате (см. рис.5).

Поскольку воздействующее на ФПК излучение не может быть полностью локализовано в сформированной градиентной структуре, то излишне продолжительное экспонирование приводит к полимеризации и на периферии. Как результат, канал увеличивается по ширине, становится более жёстким, но утрачивает необходимые волноводные параметры. Следствием утолщения канала является увеличение ширины светового распределения, что приводит к возрастанию потерь при переходе излучения из полимерного канала в одномодовый волоконный световод. Чрезмерная экспозиция крайне негативна, если соединяемые световоды имели начальное поперечное смещение (см. рис.5).

На практике чем меньше диаметр сердцевин световода, тем сложнее добиться точного позиционирования торцов при наличии значительного промежутка между ними. Обычно и в механических коннекторах, и при визуальном позиционировании торцов с помощью микроскопа ориентация осуществляется по внешнему диаметру оболочки волокна, который для одномодовых световодов значительно больше диаметра сердцевин. Например, относительное поперечное смещение волокна CS-980 всего на 1 % (по отношению к диаметру оболочки 125 мкм) соответствует смещению почти на половину диаметра поля основной моды. При проведении эксперимента, изменяя поперечное смещение торцов при фиксированном продольном расстоянии между ними, мы ориентировались на максимум коэффициента передачи ИК излучения, распространяющегося в однородной среде между торцами. Поперечное смещение находилось по половине спада этого коэффициента (распределение поля вне торцов световодов считалось близким к гауссову). Было получено, что для волокна CS-980 даже при самой точной настройке максимальное значение коэффициента передачи синтезируемого из ФПК коннектора не превышало 60 % (см. рис.5). Формирующиеся при самоканалировании видимого света градиенты показателя преломления (параметр $G \approx 1.7$) недостаточны для волноводного распространения в полимерном канале более длинноволнового ИК излучения с узким поперечным распределением интенсивности ($G \approx 0.7$). Минимальное значение диаметра световода для создания высокоэффективного коннектора в используемой ФПК составляет 4 мкм

($G \approx 1$) и зависит от состава фотополимеризующейся композиции, а именно, от того, каким будет максимальное изменение показателя преломления в формируемой градиентной волноведущей структуре.

Экспериментальные данные на рис.5 показывают, что эффективность оптической стыковки одномодовых волокон типа SMF-28 в фотополимеризующейся композиции может составлять 80 %–90 % при расстояниях между торцами 1–2 мм и радиальных рассогласованиях до 15 мкм. Полученные данные по оптическим потерям величиной всего 0.5–1 дБ при указанной свободе в расположении стыкуемых торцов могут оказаться приемлемыми для многих практических применений. Для волокна CS-980 потери не превышают 3 дБ (эффективность 50 %–60 %), что можно считать неплохим практическим результатом для диаметра поля основной моды 3.5 мкм.

5. Заключение

Эффективное оптическое соединение одномодовых волоконных световодов на длине волны 1.55 мкм возможно при одновременном самоканалировании и взаимодействии в фотополимеризующейся среде встречных оптических пучков с длиной волны 0.63 мкм. При этом чрезмерное экспонирование может приводить к снижению коэффициента передачи, что особенно проявляется при несоосном расположении торцов соединяемых световодов. Синтезируемая видимым излучением волноведущая полимерная структура способна с малыми потерями направлять ИК излучение во встречное волокно. Минимальный диаметр соединяемых световодов соответствует размерам самоканализирующегося пучка и определяется составом ФПК.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-03-97055-р_поволжье_а и № 07-02-90817-моб_ст).

1. Kagami M., Yamashita T., Ito H. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1079 (2001).
2. Monro T.M., de Sterke C.M., Poladian L. *J. Mod. Opt.*, **48** (2), 191 (2001).
3. Вдовин В.А., Лонин А.Л., Менсов С.Н. *ЖТФ*, **71** (7), 67 (2001).
4. Лонин А.Л., Менсов С.Н. *Письма в ЖТФ*, **28** (13), 15 (2002).
5. Yamashita T., Kagami M., Ito H. *J. Lightwave Technol.*, **20** (8), 1556 (2002).
6. Менсов С.Н., Полуштайцев Ю.В. *Квантовая электроника*, **37** (9), 881 (2007).
7. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. *Теория волн* (М.: Наука, 1979).
8. Mensov S.N., Polushtaytsev Yu.V. *Adv. Opt. Technol.*, doi:10.1155/2008/719632 (2008).
9. Mensov S.N., Polushtaytsev Yu.V. *Laser Phys.*, **18** (4), 424 (2008).
10. Абакумов Г.А., Мамышева О.Н., Мураев В.А. и др. Патент РФ RU 2138070 (1999).