

Д. т. н. Я. В. БОБИЦКИЙ, А. П. ЛАБА

Украина, г. Львов, Гос. ун-т "Львовская политехника"

Дата поступления в редакцию
07.09 1999 г.

Оппонент к. ф.-м. н. И. В. ПЕТРОВИЧ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛИМЕРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ МИКРОЛИНЗ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В обзоре проведен анализ применения полимерных сферических микролинз, методов их изготовления, усовершенствование технологий создания таких микроэлементов.

Интенсивное развитие волоконной оптики обозначило круг проблем, связанных с созданием фокусирующих и коллимирующих элементов для введения излучения в системах "оптическое волокно — оптическое волокно", "эмиттер — оптическое волокно — детектор". Требования к этим линзам существенным образом отличаются от требований к линзам, предназначенным для обычной оптики — микроскопов, фотоаппаратов и других обычных оптических устройств.

Среди материалов для микролинз отдельное место отводится полимерам. Прозрачные пластики целесообразны при применении в многомодовых волоконных системах, прежде всего, в силу своей дешевизны и хороших технических параметров, которые обеспечиваются лазерными технологиями формирования микролинз.

Соединительные элементы и конструкции в волоконно-оптических системах

Оптические соединители являются одним из самых критичных узлов пассивных элементов для волоконных оптических систем. От их качества зависят предельные возможности и сроки эксплуатации оптической системы в целом. Такие соединители должны иметь низкие оптические потери, стабильность параметров в процессе эксплуатации, устойчивость к внешним механическим и физико-химическим воздействиям, отличаться простотой сборки, низкой стоимостью, герметичностью. Различие приоритетов конструкторских целей и различие свойств различных источников и волокон привели к множеству решений.

В оптоволоконных системах практикуют непосредственный ввод излучения. Для структуры "оптическое волокно — оптическое волокно" используют соединение встык. Однако такой способ невозможен, когда оптические волокна различаются по форме поперечного сечения, не совпадают по диаметру оптической оболочки, по диаметру сердцевины, когда отсутствует совпадение апертур и когда необходимо обеспечить многократное соединение узлов. В

таких случаях используется линзовая конструкция, состоящая из коллимирующего и фокусирующего элементов. В целом проблема непосредственного соединения волоконных световодов является проблемой того же порядка, как и в случае использования линзовой микрооптики. Последнее замечание касается больше многомодовых систем.

Наиболее важными параметрами микролинз, которые влияют на оптические потери в соединителях, являются числовая апертура, диаметр фокального пятна, спектральная зависимость оптических потерь в материале микролинзы. Для обеспечения низкого уровня оптических потерь числовая апертура микролинзы должна быть больше числовой апертуры соединительных элементов, а диаметр фокального пятна — как можно меньше (2–10 мкм), в то время как оптические потери в материале на заданной длине волны (λ) не должны превышать десятых долей децибела.

Наиболее распространены соединители на основе сферических и градиентных микролинз. Интенсивно разрабатываются трехмерные интегральные микролинзы [1].

Что касается сферических микролинз, то они — короткофокусные, с большей числовой апертурой ($NA > 0,4$) и малым диаметром фокального пятна (8–15 мкм для многомодовых устройств и 2–5 мкм для одномодовых). Выбором соответствующего материала легко обеспечить нужные спектральные характеристики. Простейший способ применения сферических микролинз для оптической связи между волокнами показан на **рис. 1, а**.

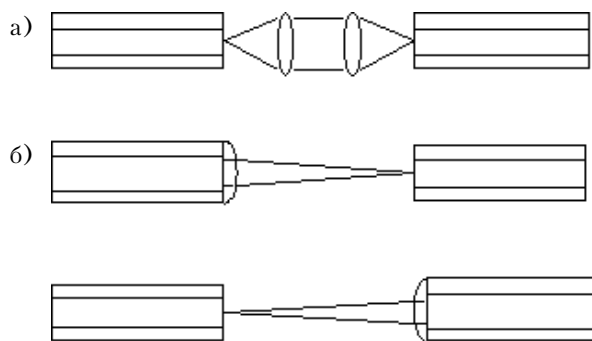


Рис. 1. Способы соединения волокон:
а — с помощью дискретных сферических микролинз; б — с помощью сферической микролинзы, размещенной на торце оптического волокна

Система "оптическое волокно — фокусирующий элемент — коллимирующий элемент — оптическое волокно" очень чувствительна к угловому несогласованию, поэтому выгодна конструкция с фокусирующей линзой, размещенной непосредственно на торце волокна (рис. 1, б). Основное преимущество такого соединителя заложено в низкой зависимости оптических потерь от взаимного разнесения элементов системы [2].

Качество соединителей типа "эмиттер — оптическое волокно" контролируют из условия обеспечения максимальной эффективности ввода оптической мощности, определяемой выражением [3, с. 190]

$$\eta = P_f / P_s \quad (1)$$

где P_f — мощность излучения, введенного в волокно;
 P_s — мощность источника излучения.

Как правило, распределение полей излучения источника по координатам и углам представляет собой диаграмму ламбертовского типа для светодиода и более узкую, но радиально асимметричную, для лазерного диода. Назначение линзовой конструкции — обеспечить жесткое и воспроизводимое крепление волокна относительно источника и преобразовать диаграмму источника в форму, максимально подобную симметричной и ограниченной в пределах числовой апертуры волокна. Обычно диаметр оптического волокна, в которое должно быть введено излучение светоизлучающего диода, меньше диаметра рабочей площадки излучения последнего. При этом никакая оптическая система не сможет повысить значение η , достигаемое при прямом стыковании лучеиспускающей площадки и торца волокна, а напротив, учитывая неминуемые потери на френелевское отражение и на поглощение, только ухудшит эффективность ввода. Единственный выход из этого положения — использование микрофокусирующего устройства, изготовленного непосредственно на поверхности лучеиспускающего участка.

Для примера на рис. 2 показаны схемы сопряжения полупроводникового светодиода с оптическим волокном непосредственно (а) и с использованием сферической фокусирующей микролинзы (б). В случае лазерного диода площадь излучающей площадки меньше площади сердцевинки волокна. Эффективность ввода может быть повышена до 80–95% за счет использования пассивной микрооптики. Типичные оптические схемы волоконных устройств, применяемых в медицине, для обра-

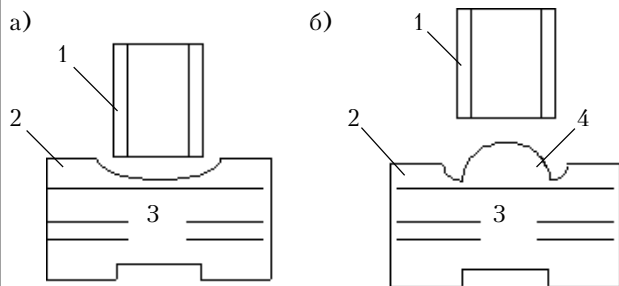


Рис. 2. Введение излучения светодиода в волокно: а — непосредственно; б — с применением микролинзы
 1 — волокно; 2 — светодиод; 3 — активный слой;
 4 — сферическая микролинза

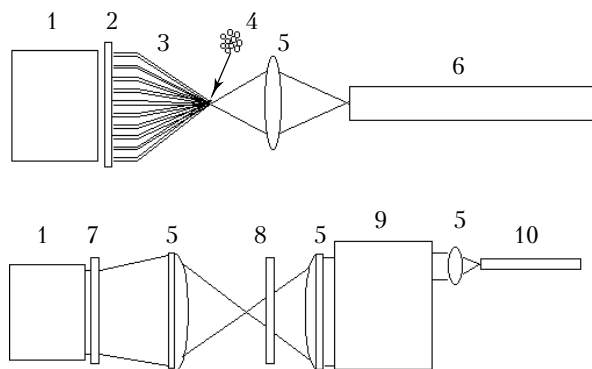


Рис. 3. Типичные схемы введения излучения диодного лазера в многомодовое волокно:

1 — блок-матрица диодных лазеров; 2 — волоконная линза или линзовая матрица; 3 — тонкие многомодовые волокна; 4 — поперечное сечение волоконного жгута; 5 — сферическая линза; 6 — толстое многомодовое волокно; 7 — волоконная линза; 8 — цилиндрическая линза; 9 — формирователь пучка; 10 — многомодовое волокно

ботки материалов и лазерной накачки, представлены на рис. 3.

Поскольку проблема создания соединителей лазерных диодов с одномодовым волокном значительно сложнее, то структуры на основе многомодового волокна, имея ряд преимуществ [4], очень распространены в вышеупомянутых сферах применения. В таких случаях для эффективного ввода лазерного излучения решетки пространственно не связанных диодных источников в многомодовое волокно используют матрицу — растр сферических микролинз.

Система "волокно — фотоприемник" не представляет конструктивных трудностей, т. к. и числовая апертура, и диаметр рабочей светочувствительной площадки у фотоприемника больше, чем соответствующие параметры у волокна.

Для некоторых применений, в частности, для локальных оптических линий и многомодовых волоконных систем, в качестве материалов для изготовления микролинз используют органические стекла [5–8]. По качеству передачи оптического сигнала полимерные детали несколько уступают аналогичным изделиям из неорганического стекла и прозрачных кристаллов. Но полимерные среды — не только дешевая версия стеклянной оптики (хотя стоимость традиционно предопределяет их выбор); пластиковая оптика является предпочтительным вариантом для решения ряда технических задач, связанных с уменьшением массы, улучшением технологичности конструкций оптических деталей, повышением эффективности производства и пр. Они имеют такое важное преимущество, как возможность введения в них любых органических соединений или красителей, которые выполняют функции активных элементов и существенным образом изменяют характеристики полимеров и изделий из них. Например, таким образом варьируют показатель преломления.

Современные пластиковые прозрачные компоненты имеют уникальные оптические и физико-механические свойства. Они отличаются прозрачностью и

однородностью, имеют высокую ударопрочность и низкую хрупкость, устойчивы к атмосферным влияниям и, кроме того, сравнительно легко формируются в изделия сложной конфигурации, могут одновременно выступать и оптическими, и монтажными элементами. Среди самых распространенных полимеров, используемых для оптических потребностей, — полиметилметакрилат, полистирол, аллиловые полимеры, поликарбонаты, полиакрилаты и их сополимеры.

Лазерная полимеризация

Одним из современных процессов синтеза полимеров является полимеризация фоточувствительных жидких композиций. Фотоиницированная полимеризация — интенсивно исследуемый процесс, т. к. имеет широкое практическое использование [9, 10]. Применение оптического излучения особенно перспективно с учетом наличия и развития лазерных источников с заданными энергетическими и спектральными характеристиками [11, 12]. Возможность инициирования процесса полимеризации непрерывным и импульсным лазерным излучением изучается теоретически и практически [13], и перспектива такой лазерной технологии не вызывает никакого сомнения.

Монохроматичность, направленность и высокая интенсивность лазерного излучения позволяют осуществлять резонансное влияние на исходные реагенты химических реакций. Это обеспечивает точную локализацию, дозирование, абсолютную стерильность и высокую скорость ввода энергии в химический реактор. Если влияние релаксационных процессов ничтожно, то в результате поглощения молекулами фотонов происходит фотохимическая реакция, приводящая к превращению материала. Так как энергия активации химических реакций большая (порядка нескольких электрон-вольт), то селективное фотохимическое действие наиболее легко наблюдается при возбуждении электронных состояний молекул лазерным излучением видимого и ультрафиолетового диапазонов, причем образуются активные радикалы, способные сшивать отдельные молекулы мономера в гигантскую полиструктуру.

Высокомощные кратковременные импульсы даже при невысокой плотности энергии (10 мДж/см²) дают возможность создавать в полимеризационной среде значительные концентрации радикалов (10⁻⁴ — 10⁻⁶ моль/л). Это приводит к нестационарному процессу, отличному от традиционного [14, с. 39; 15, с. 59]. Поскольку продолжительность лазерных импульсов намного меньше времени присоединения звена мономера к реакционноспособной цепи, то инициирование можно считать мгновенным. Это обстоятельство существенным образом упрощает анализ кинетики полимеризации [16, 17]. Поэтому система уравнений, описывающая рост радикальных цепей, инициированных импульсным излучением, имеет вид [16]

$$\begin{aligned} \frac{dR_0}{dt} &= -(k_p M + k_o R)R_0 + R_0(0)\delta(t-nt); \\ \frac{dR_j}{dt} &= -(k_p M + k_o R)R_j + k_p MR_{j-1}; \\ \frac{dM}{dt} &= -k_p MR, \end{aligned} \tag{2}$$

где R_0 — концентрация радикалов, возникших при иницировании лазерным излучением;
 t — время излучения;
 k_p, k_o — скорости роста и обрыва цепей (которые при невысоких степенях конверсии можно считать постоянными);
 M — концентрация мономера;
 R — суммарная концентрация радикалов;
 δ — дельта-функция, описывающая характер импульсного излучения лазера;
 n — количество импульсов;
 T — период следования импульсов;
 R_j — концентрация радикалов, содержащих j мономерных звеньев ($j=1, 2 \dots$).

Благодаря доминирующей роли коротких радикалов, периодически создаваемых в реакционной среде, вероятность развития гелевого эффекта снижается, и, по-видимому, вышеприведенная система уравнений будет пригодна и для более высоких степеней преобразования.

Использование импульсных лазеров для катализа полимеризации дает возможность управлять свойствами синтезируемых материалов — в частности, за счет регулирования молекулярно-массового распределения (ММР). Действуя излучением, в процессе радикальной полимеризации периодически создают высокие концентрации первичных радикалов. При бирадикальном характере обрыва цепей это приводит к ограничению максимальной длины макромолекулы и к появлению узкодисперсных пиков в ММР.

На рис. 4 показан график функции ММР полимера, выращенного под влиянием импульсного лазерного излучения. Эта функция описывается формулой [16]

$$\omega_l = lP_l(t), \tag{3}$$

где l — длина цепи молекулы;
 $P_l(t)$ — концентрация молекул длиной l , образованных за время экспозиции t .

Распределение характеризуется наличием ряда пиков, положение, число и относительная величина которых зависят от временных и энергетических параметров излучения. Таким образом, создают узкодисперсные материалы с нужными физическими и механическими характеристиками, т. к. для практических целей широкий ММР явным образом не выгоден, потому что большинство полимеров проявляют самые лучшие свойства в строго определенном диапазоне молекулярных масс.

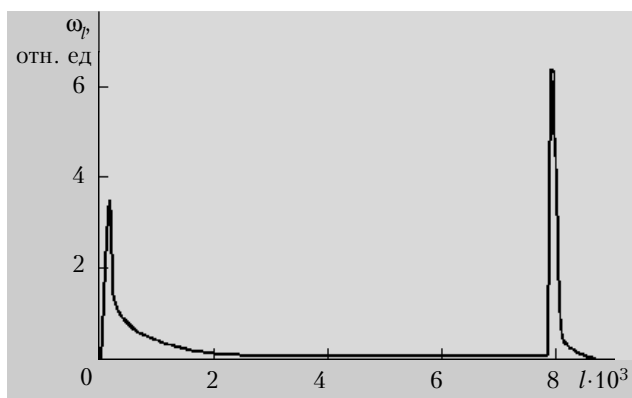


Рис. 4. Функция молекулярно-массового распределения

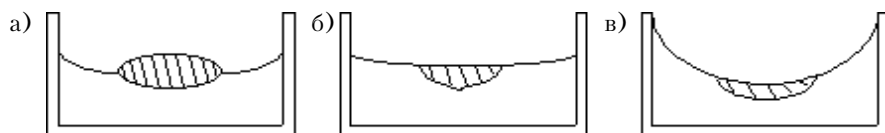


Рис. 5. Формирование микролинз: а — выпуклых; б — плоско-выпуклых; в — менисковых

При возбуждении лазерами ИК-диапазона колебательных уровней атомов, составляющих многоатомную молекулу, существует перспектива раскачки и разрыва связи между атомами, не затрагивая остальных колебаний молекулы. Использование химических радикалов, полученных методом ИК-лазерной фотодиссоциации, в дальнейшем синтезе приводит к более чистым продуктам и увеличивает выход реакции. Благодаря использованию ИК-лазерного излучения для резонансного фотовоздействия на определенные колебательные степени свободы молекул возможно достижение 100%-ной степени полимеризации при высушивании лакокрасочных эмалей [18]. Ни один из известных методов сушки не позволяет получить такую степень полимеризации, даже при длительной выдержке.

Но несмотря на широкий спектр излучения современных лазеров тяжело подобрать линию излучения, удовлетворяющую одновременно двум требованиям — совпадению с частотой колебаний определенной колебательной степени свободы молекулы и достаточному уровню мощности излучения для ее селективного “разогрева”. Как правило, плотность излучения большинства известных лазерных переходов недостаточна для возбуждения колебательных уровней. Поэтому лазерным излучением действуют на химическую среду, предварительно разогретую до определенного уровня любым иным источником энергии. Это обеспечивает начальную раскачку реакционноспособных функциональных групп атомов, а направленные электромагнитные волны содействуют созданию неравновесной населенности на выбранном колебательном уровне. Совместное пиролизическое и фотолитическое влияние снижает требования к уровню энергии кванта лазерного излучения, сохраняя преимущества резонансного фотовоздействия на сложные молекулы.

Следовательно, характер протекания лазерной полимеризации отличается от традиционного. Особое влияние при этом имеет не столько плотность излучения, сколько общий поток мощности, поглощенный полимером. Когерентность излучения не имеет влияния на осуществление химической реакции.

Технология изготовления сферических микролинз

Известно несколько методов получения сферических микролинз. Поскольку полимеризация обеспечивает самые высокие технические параметры формируемых полимерных оптических деталей, то такой процесс используют в производстве с высокими требованиями к однородности и качеству поверхности.

Один из перспективных способов формирования микрофокусирующего устройства на торце волокна состоит в следующем [2]. В один конец оптического волокна вводят излучение He—Ne-лазера ($P_s=0,1\text{ мВт}$). Второй конец погружают в фоторезист, а затем несколько минут подсушивают на воздухе. Потом контролируют способность остатка капли фокусировать пройденный по волокну пучок све-

та. Для этого на некотором расстоянии от торца волокна с микролинзой размещают фотодетектор, который передвигается параллельно плоскости торца волокна и регистрирует изменения интенсивности света, пройденного через микролинзу. Операцию погружения повторяют несколько раз до тех пор, пока результаты контроля, описанные выше, не будут удовлетворять поставленным требованиям. Для конечного затвердевания сформированной линзы ее облучают излучением более мощного (до 40 мВт) He—Ne-лазера при $\lambda=775\text{ нм}$. Такие линзы используют в качестве фокусирующих элементов в устройствах сопряжения одномодовых волокон с планарными волноводами. В данном случае создаваемая микролинза должна обладать высокой адгезией к материалу волокна.

Рекомендуют, например, создавать на торце стеклянного, кварцевого или полимерного оптического волокна микролинзовую область путем оплавления при локальном нагревании, например, CO_2 -лазером ($P_s=50\text{ Вт}$) [12, с. 186; 19]. При этом граница фаз “расплав — твердое тело” перемещается в глубину волокна. После прекращения действия лазерного импульса расплавленный слой рекристаллизуется. Если окружающая среда имеет низкий, по сравнению с материалом заготовки, коэффициент теплопроводности, то кристаллизация начинается от металлургической границы раздела фаз и фронт рекристаллизации движется к поверхности с конечной скоростью (теплоотвод осуществляется через твердую часть заготовки). Граница фаз “расплав — твердое тело” приобретает выпуклую форму, т. к. максимальная глубина плавления достигается на периферии торца. В период существования расплава количество атомов, осуществляющее процесс присоединения к твердой фазе, большое и, соответственно, большая степень отклонения системы от равновесного состояния. При рекристаллизации расплавленной части заготовки система стремится к минимуму свободной энергии. После рекристаллизации в результате работы сил поверхностного натяжения образовывается сферическая поверхность. Такой метод привлекает простотой.

Дискретные сферические микролинзы формируют следующим образом [20]: каплю реакционноспособной жидкой полимерной композиции, в которой обязательно присутствие инициатора, помещают на поверхность реакционнопассивного жидкого носителя, который не смешивается с фоточувствительной композицией. Облучают каплю УФ-лазерным излучением длиной волны, которая соответствует максимуму поглощения инициатора. Форма геометрической поверхности микролинз зависит от их диаметров, от соотношения плотностей двух жидкостей, но главным образом, от сил поверхностного натяжения. Фиксирование скорости вращения экспериментального столика предоставляет возможность формировать в водовороте жидкости выпуклые, плосковыпуклые и менисковые микролинзы (рис. 5).

Такие методы, по-видимому, не позволяют осуществить изготовление оптических элементов хорошего качества — они требуют полирования, т. к. для описанных процессов затвердения материала характерна химическая усадка.

Популярна еще одна технология изготовления микролинз — техника фоторезистивного переплавления [21]. Кружочки фоторезиста нагревают до температуры выше температуры плавления. В результате действия сил поверхностного натяжения расплав формируется в полусферу. Конечную линзу получают после полного затвердевания такой капли. Исходя из этого предложена новая техника формирования микролинз, которая основывается на переплавлении многослойного фоторезиста.

Для изготовления таких линз используют вязкие вещества. Каждый слой жидкости формируют в правильную полусферу, вращая экспериментальный столик с фиксированной скоростью. Затем осуществляют отжиг, облучают непрерывным потоком соответствующего ультрафиолетового света и высушивают. Процесс высушивания нужен для осуществления отжига следующего слоя. Его проводят при температуре 30–40°C на протяжении продолжительного периода времени (≈ 24 ч). Последний слой фоторезиста облучают через маску.

Если эту структуру расплавить и выдержать при температуре 100°C в течение 4 мин, можно получить типичную грибовидную форму, что подтверждают и эксперименты, и соответствующие расчеты. Такие микролинзы используют в конструкции с излучателями и детекторами лазерного света. Например, при сопряжении со светодиодом грибовидная микролинза задает диаграмму направленности и в 8 раз увеличивает эффективность излучения на выходе. У подобных микролинз больше кривизна поверхности, чем у обычных сферических микролинз. Специфическая особенность грибовидных микролинз состоит в фиксированном расстоянии от поверхности излучения или приема лазерных лучей за счет наличия “ножки”. Вследствие такой стойкой конструкции фокусное расстояние микролинзы контролируемо.

Стереолитография

Способ изготовления полимерных линз на основе процесса стереолитографии (СФЛ) заслуживает особого внимания. Эта технология является базовой для оперативного изготовления копий компьютерных образов трехмерных твердых тел [22, 23]. Основное преимущество лазерной СФЛ — в реализации пространственно ограниченного процесса преобразования мономера в полимер, который протекает благодаря направленности и высокой фокусирующей способности лазерного луча. Изготовление микролинз таким способом осуществляют на открытой поверхности реактивной среды при затвердевании элементарных объемов один за другим до получения целого слоя толщиной e . Далее полимеризация проходит, как показано на **рис. 6**, слой за слоем.

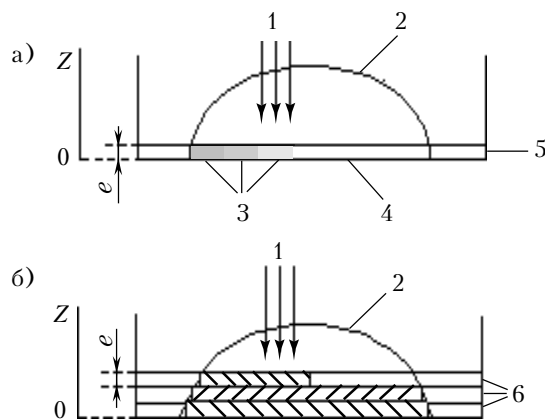


Рис. 6. Схема изготовления микролинз путем полимеризации:

- a* — последовательным созданием элементарных объемов;
- б* — последовательным созданием слоев
- 1 — лазерный пучок; 2 — объект изготовления; 3 — полимеризованные элементарные объемы; 4 — жидкая композиция; 5 — 1-й формируемый слой; 6 — 1-й и 2-й слои (полимер) и 3-й формируемый слой

На сегодняшний день разработаны устройства для лазерной СФЛ (см. **рис. 7**), позволяющие изготавливать микроэталонные и микропрототипы. Однако прямое создание микроэлементов невозможно, поскольку отношение объема твердого полимера V к габаритному объему детали V_0 не равно единице. Главная проблема возникает из-за усадки, т. е. изменения геометрических размеров после реакции фотополимеризации. Основное препятствие в создании микроэлементов состоит в сложности выращивания элементарных объемов микроразмеров, а следовательно, и получения очень тонких слоев.

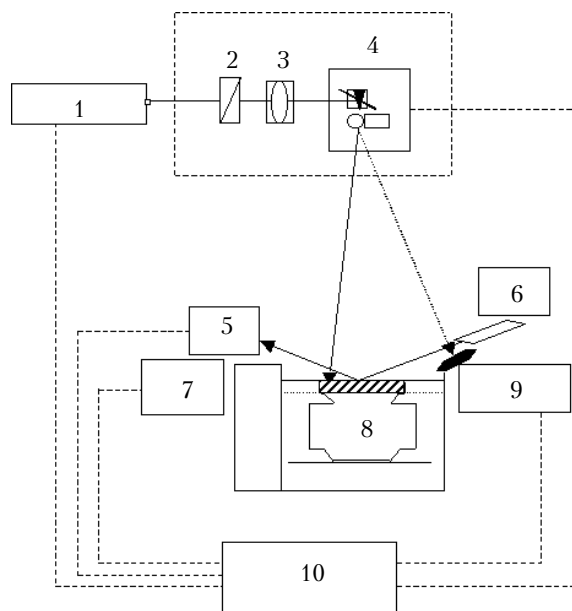


Рис. 7. Устройство для лазерной стереолитографии: 1 — лазер; 2 — поляризатор; 3 — фокусирующая линза; 4 — сканирующие зеркала (X, Y); 5 — датчик высоты; 6 — He-Ne-лазер; 7 — система дискретного перемещения (Z); 8 — объект изготовления; 9 — измеритель мощности; 10 — компьютер

Ведутся поиски путей устранения ограничений. Следует отметить, что акцентируют внимание на подборе фотополимеризующихся материалов, которые должны обладать специфическими характеристиками, такими как твердость, эластичность, термическая устойчивость, низкая усадка, малая токсичность, способность к быстрой полимеризации, медленный эффект старения.

Указанные проблемы связаны также с недостаточной точностью экспериментального устройства. Качество данных систем и числовая апертура лазерных источников позволяют получить пятно диаметром 150 мкм на открытой поверхности полимера. Для повышения точности осуществляют фильтрацию лазерного пучка, пропуская его через пространственный фильтр с использованием одной фокусирующей линзы, увеличивающей числовую апертуру и, как следствие, уменьшающей размер сфокусированного светового пятна до нескольких микрон. С другой стороны, при изготовлении микроэлементов нет потребности в высокой скорости сканирования светового луча. Поэтому гальванометрические зеркала надлежит заменить точными X-Y-Z-преобразователями.

Тонкие слои можно получить вследствие подбора фотохимического инициатора. Дело в том, что в монофотонных процессах важным является оптическая толщина (μ) фотопревращающегося материала [20]

$$\mu = 1 / \sum_i \epsilon_i c_i, \quad (4)$$

где ϵ_i и c_i — соответственно коэффициент молекулярного затухания и концентрация i -го продукта, поглощающего на длине волны λ .

Полимеризационная толщина x является логарифмической функцией времени облучения t элементарного объема после небольшого промежутка, частично необходимого для реакции ингибиторов в полимере. Поэтому для улучшения качества фотопревращения μ и e должны быть примерно одинаковыми. Для этого нужно использовать фотоинициаторы, коэффициенты экстинкции которых ϵ достаточно высокие для уменьшения оптической толщины μ , или же увеличить концентрацию фотоинициатора.

Еще один важный фактор влияния на качество изготовления объекта — это отношение между «точкой удара фотона» на поверхности реактивной среды и точностью результирующего трехмерного элемента. На увеличение такого отношения влияет диффузия, вызванная химической реакцией, что проявляется в возможном растворении полимера в мономере. Последнее принималось как необходимое для затвердения сплошных слоев, т. е. для сшивания отдельных полимеризующихся зон. Этого легко избежать путем использования многофункциональных мономеров или олигомеров, которые ретикулируют (имеют способность передавать диффузией фотозбудитель между двумя потоками).

Второй феномен имеет место при транспортировании вещества вследствие длинной цепной фотополимеризационной реакции. Но при лазерном иници-

ровании среднее число мономерных/олигомерных молекул, которые действуют на фотон, составляет 10^4 , и если их размеры порядка 1 нм, то самый длинный путь будет примерно в несколько микрон, а эта величина имеет такой же порядок, что и оптическая разрешающая способность.

Как известно, разрешающая способность ограничивается длиной волны излучения, т. е. лазерный луч можно сфокусировать в пятно диаметром порядка длины волны излучения [11]. Это ограничение определяется классической формулой для разрешающей способности (R) любого оптического устройства [24, с. 366]:

$$R = \lambda / (2n \sin u), \quad (5)$$

где $n \sin u$ — числовая апертура устройства, причем максимальное значение этой величины равно единице.

Отсюда, теоретическая граница разделительной способности равна $\lambda/2$ [17]. Следовательно, пространственная миграция не является главной причиной размывания границ элементарного объема. Это особенно важно в случае микрообъектов, потому что точность размеров изготавливаемых элементов зависит от уровня локального поглощения фотонов реактивной средой, а это, в свою очередь, определяется в большей степени разделительной способностью возбуждающей лазерной системы, чем качеством и составом жидкой композиции.

Описанные исследования находятся на стадии интенсивных научных поисков. Самые тонкие из полученных слоев имеют порядка 50 мкм. Технология микростереофотолитографии (МСФЛ) обещает сделать возможным непосредственное изготовление оптических элементов без дополнительной механической обработки поверхности.

Несмотря на некоторые недостатки оптического качества органического стекла, связанные с температурной нестабильностью и способностью поглощать влагу, полимерные микролинзы выгоднее использовать в оптических локальных линиях связи и многомодовых волоконных устройствах. Полимерные микролинзы являются решением вопросов, связанных с ценой, компактностью, простотой формирования. Диапазон показателей преломления используемых в оптике прозрачных полимеров значительно уже, чем соответствующая область неорганических стекол, но благодаря гибкости полимерных сред к введению органических примесей имеется возможность варьировать показатель преломления, обеспечивая создание материалов с заранее установленным показателем преломления и спектральной характеристикой.

Так как качество элементов зависит от выбора технологии изготовления, а термическая полимеризация не обеспечивает нужного качества полимерных микролинз, в основу формирования полимерных микролинз положен фотопроект. Особого внимания заслуживают лазерные технологии, которые позволяют получить среды с высокой однодрос-

тью, прозрачностью и заданными механическими характеристиками, определяющими эксплуатационные свойства линз и их долговечность.

Усовершенствование лазерной техники, методик изготовления оптических элементов позволит получать микрогабаритные линзы отличного качества и не требующие дополнительной полировки поверхности. Компьютерное управление процессом делает возможным успешную реализацию технологии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Красюк Б. А., Корнеев Г. И. Оптические системы связи и световодные датчики. Вопросы технологии. — М. : Радио и связь, 1985.
2. Носов Ю. В. Волоконно-оптические линии фотонной связи // Зарубежная радиоэлектроника. — 1975. — № 11. — С. 54—75.
3. Бутусов М. М. Волоконно-оптические системы передачи. — М. : Радио и связь, 1992.
4. Dixon G. J. Fibers turn free space beams into guided waves // Laser Focus World. — November 1997. — P. 115—120.
5. Барашков Н. Н., Сахно Т. В. Оптические прозрачные полимеры и материалы на их основе. — М. : Химия, 1992.
6. Шепурев Э. И. Полимерные оптические материалы. — Л. : ЛДНТП, 1987.
7. Торбин И. Д., Дамидов Ю. Ф. Оптические детали из полимеров // Оптико-мех. пром-сть. — 1974. — № 10. — С. 72—78.
8. Krinchevsky G., Schaefer J. Plastic optics offer unique design freedom // Laser Focus World. — October 1997. — P. 19—24.
9. Roffey C. G. Photopolymerization of surface coatings. — N. Y. : T. Wiley and Sons, 1982.
10. Rabek I. F. Mechanisms of photophysical processes and photochemical reaction in polymers. Theory and application. — N. Y. : T. Wiley and Sons, 1987.
11. Гиллет Дж. Фотофизика и фотохимия полимеров. Введение в изучение фотопроецессов в макромолекулах. — М. : Мир, 1988.

12. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. — М. : Мир, 1986.
13. Foussir I. P., Rabek I. F. Laser in polimer sciece and technology: applications. — Boca Raton, UAS: CRC Press, 1989.
14. Френкель С. Я. Введение в статистическую теорию полимеризации. — М. : Наука, 1965.
15. Багдасарьян Х. С. Теория радикальной полимеризации. — М. : Наука, 1966.
16. Александров А. П., Генкин В. Н., Китай М. С. и др. Кинетика полимеризации и молекулярно-весовое распределение полимера при лазерном инициировании // Квантовая электроника. — 1977. — Т. 40, №5. — С. 976—981.
17. Генкин В. Н., Соколов В. В. Полимеризация при периодическом импульсном инициировании // ДАН СССР. — 1977. — Т. 234, № 1. — С. 94—96.
18. Кальвина И. Н., Москаленко В. Ф., Остапченко Е. П. и др. О резонансном фотовоздействии лазерным излучением на процессы полимеризации // Квантовая электроника. — 1974. — Т. 1, № 10. — С. 2300—2302.
19. А. с. 15439012 СССР. Способ получения сферических микролинз на торце оптического волокна / З. Ю. Готра, Я. В. Бобицкий, И. В. Демкович и др. — Опубл. в Б. И., 1990, № 6.
20. Zissi, Corbel S., Jezequel J.Y. et al. Microstereolithography: a reality or dream for tomorrow? // Microchemistri. Spectroscopy and Chemistri in Small Domains. — 1994. — P. 65—78.
21. Heremans P., Genoe J., Kuik M. et al. Mushroom microlenses: optimized microlenses by reflow of multiple layers of photoresist // IEEE Photonics Technology Letters. — October 1997. — Vol. 9, N 10. — P. 1367—1369.
22. Евсеев А. В., Марков М. А. Послойное изготовление деталей из жидких фотополимеризующихся композиций излучением ХеСl-лазера // Квантовая электроника. — 1994. — Т. 21. — С. 495—498.
23. Евсеев А. В., Марков М. А. Фотоинициированная излучением ХеСl-лазера полимеризация акриловых олигомеров // Там же. — С. 491—494.
24. Бутиков Е.И. Оптика. — М. : Высш. шк., 1986.

ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ В 2000 ГОДУ	
15 сентября	100 лет назад (1900) под руководством А. С. Попова организована Кронштадтская радиомастерская, положившая начало российской радиопромышленности.
13 октября	70 лет со дня организации (1930) Санкт-Петербургского электротехнического института связи имени М. А. Бонч-Бруевича.
23 октября	80 лет со дня рождения (1920) А. Г. Басистова, ученого и конструктора автоматизированных радиолокационных систем информационного обеспечения.
29 октября	120 лет со дня рождения А. Ф. Иоффе (1880—1960), ученого-физика, пионера исследования полупроводников, создателя отечественной школы физиков.
9 ноября	75 лет назад (1925) изобретатели Б. П. Грабовский, В. И. Попов, Н. Г. Пискунов предложили электронную систему телевидения — радиотелефот (заявка на патент № 5592).
15 ноября	40 лет назад (1960) ученому Н. И. Кабанову выдан Диплом № 1 на открытие («Эффект Кабанова»), имеющее важное значение для развития загоризонтной радиолокации.
14 декабря	100 лет со времени создания (1900) немецким физиком М. Планком квантовой теории (в докладе на заседании Немецкого физического общества ученый ввел понятие кванта энергии).
ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ В 2000 ГОДУ	