УДК 681.7.024; 621.373.826

ОБРАБОТКА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТЕРМОУСАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОПЕРАЦИЯХ СБОРКИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2013 г.
Е. В. Дорофеева; П. Ю. Лобанов; И. С. Мануйлович, канд. физ.-мат. наук; **О. Е. Сидорюк**, канд. физ.-мат. наук

Научно-исследовательский институт “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха, Москва

E-mail: dipole@sumail.ru

Рассмотрены возможности лазерной технологии на операциях сборки оптических элементов с применением термоусадочных материалов. Показано, что подбором параметров излучения в полимерном материале может быть достигнута пространственная локализация тепловыделения, которого достаточно для формообразования, но еще не приводит к нежелательному разогреву монтируемой детали. Описан процесс сборки электрооптического модулятора на базе кристалла DKDP с применением предложенного метода.

Ключевые слова: *лазерное излучение, тепловое воздействие, термоусадочный материал, электрооптический элемент.*

Коды OCIS: 350.3390, 220.4610, 230.2090, 160.2100.

Поступила в редакцию 16.05.2012.

На первых этапах промышленного распространения термоусадочных материалов они стали активно применяться в конструкциях оптических изделий. Например, давно оценены преимущества фиксации линз, фильтров, окон и других оптических элементов с помощью оправ из пластиков, испытывающих термоусадку при нагреве [1]. Особое распространение эти технологии получили с развитием волоконной оптики [2], в том числе в процессах сборки различных типов оптоволоконных датчиков [3, 4]. Для этих целей хорошо подходят применяемые в других областях техники трубки на основе полиолефинов.

Вместе с тем следует отметить и ограничения в использовании термоусадочных материалов для фиксации оптических деталей с повышенной термочувствительностью. Например, особой осторожности при нагреве требует ряд элементов нелинейной оптики и электрооптических изделий на основе водорастворимых кристаллов. В частности, это относится к широко распространенным кристаллам дейтерированного дигидрофосфата калия (DKDP): они имеют фазовый переход, сопряженный с необратимой деградацией материала, вблизи температурного диапазона, характерного для термоусадки традиционных пластиков.

Отчасти задача может быть решена выбором полимеров с предельно низкими параметрами требуемой термообработки и обеспечением жесткого контроля характеристик технологического процесса. Последнее требование особенно существенно в технологиях с кристаллами DKDP, поскольку их чрезмерно быстрый или неравномерный нагрев может вызывать растрескивание материала. В случае элементов с просветляющими покрытиями возможно появление дополнительных ограничений, обусловленных трудностями сохранения при нагреве высокого качества оптических поверхностей и интерференционных пленок на них.

Обозначенные проблемы могут быть преодолены путем использования новых технологических приемов, основанных на обработке крепежных термоусаживаемых деталей лазерным пучком. Подбором параметров излучения в полимерном материале может быть достигнута высокая пространственная локализация процесса тепловыделения, которое достаточно для формообразования, но не приводит к нежелательному разогреву монтируемой детали.

Существенным при этом является выбор длины волны воздействующего излучения из спектральной области поглощения термоусадочного полимера. Необходимо и дополнительное условие: отсутствие поглощения в материале оптического элемента и в других деталях изделия.

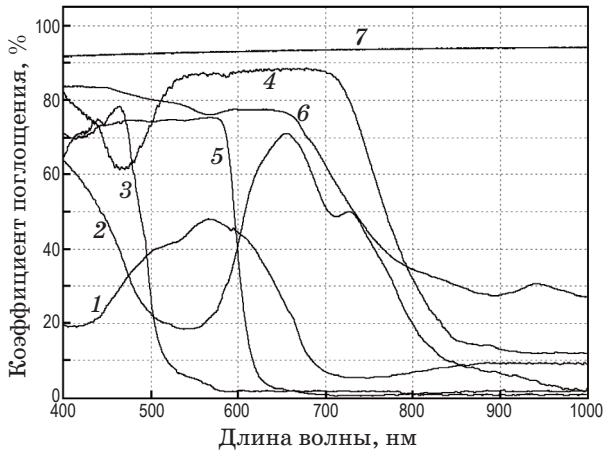

Рис. 1. Спектры поглощения термоусадочных материалов серии PBF толщиной 0,2 мм различных цветов: *1* – фиолетового, *2* – зеленого, *3* – желтого, *4* – синего, *5* – красного, *6* – коричневого, *7* – черного.

На рис. 1 для области 400–1000 нм представлены спектральные зависимости коэффициентов поглощения некоторых термоусадочных материалов из ряда традиционных трубок серии PBF (толщина полимера – 0,2 мм). Спектры получены с помощью двухканального спектрометра на базе линейных матричных датчиков с оптоволоконными входами. Поскольку для образцов характерно высокое рассеяние света, в канале сравнения устанавливался образец полимера той же серии белого цвета. Его параметры, в свою очередь, определялись сравнительными измерениями с прозрачным аналогом.

Очевидно, в связи с рассматриваемыми задачами, основное внимание следует уделять области спектра 800–1000 нм, поскольку именно на этот диапазон приходится излучение наиболее мощных полупроводниковых лазерных излучателей [5]. Анализ полученных данных показывает, что выбор термоусадочных трубок рационально ограничить материалом черного цвета. Применение других образцов (например, коричневых), возможно, но сопряжено с повышением требований к мощности лазерного излучения.

Для технологии лазерной термоусадки в настоящей работе использовали непрерывный полупроводниковый лазер на GaAs с волоконным выводом излучения. Длина волны его составляла $\lambda = 980$ нм, максимальная мощность – 2 Вт. Выход оптоволокна имел сопряжение с микрообъективом градиентной оптики для формирования пучка излучения с диаметром 2,5 мм и расходимостью около 1,5°. Выходные элементы располагались внутри цилиндрического держателя для обеспечения удобства оператору при выполнении в ручном режиме манипуляций, необходимых для лазерной технологии.

На рис. 2а представлена полученная с помощью матричной CCD камеры фотография распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, воздействующего на образец при выполнении технологической операции термоусадки полимерного материала. Для поля излучения, формируемого на выходе многомодового оптоволокна, характерна спекловая структура с относительно высокой локальной неоднородностью (кривая *1*, рис. 2б). Однако понятно, что объемный прогрев облучаемого образца происходит при значительно меньших относительных разбросах температуры в соседних зонах материала. Свое влияние оказывают как внутреннее рассеяние излучения, так и теплопроводность. В первом приближении параметром усреднения может служить величина, сравнимая с толщиной образца. Поскольку она по порядку

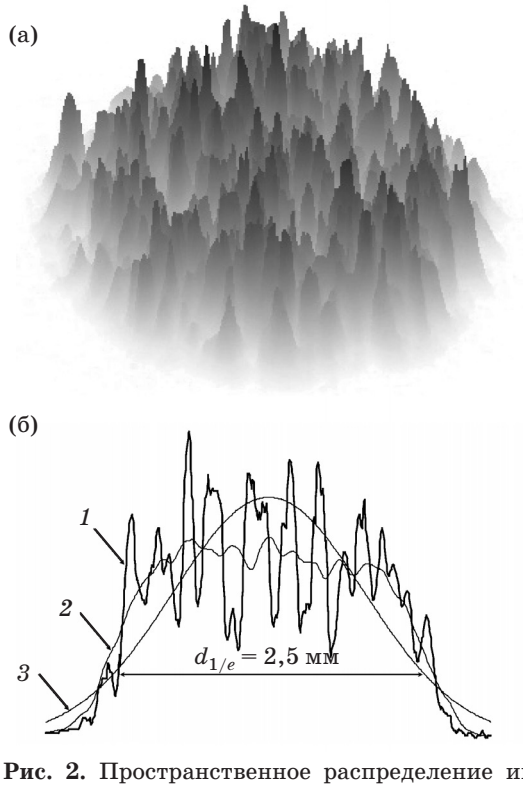

Рис. 2. Пространственное распределение интенсивности многомодового лазерного излучения в поперечном сечении светового пучка, воздействующего на обрабатываемый материал (пояснения в тексте).

величины соответствует масштабу окрестностей горячих точек на выходе многомодового волокна, можно считать используемое лазерное воздействие эквивалентным тому, что оказывает излучение с более равномерным распределением. Примером его оценки является кривая *2* на рис. 2б, представляющая в каждой точке результат усреднения по области окрестности диаметром 0,2 мм.

В реальной практике влияние спекловой структуры воздействующего на образец излучения на результаты технологического процесса проявляются еще слабее из-за временного усреднения в условиях не очень жесткого позиционирования при ручном выполнении операции. Кроме того, сама структура многомодового излучения подвержена изменению в силу ряда причин (например, чувствительна к изгибам оптоволокна).

Сравнение кривой усредненного распределения интенсивности излучения (кривая *2*, рис. 2б) с распределением Гаусса, аппроксимирующего те же экспериментальные результаты (кривая *3*, рис. 2б), показывает более пологий ее характер в области высокой интенсивности. Вообще говоря, это является положительным фактором в технологии лазерного нагрева термоусадочных пластиков. Сравнительные испытания, проведенные с использованием одномодового излучения твердотельного лазера на ИАГ:Nd на длине волны 1064 нм показали в сопоставимых условиях для гауссовых пучков наличие более узкого динамического диапазона интенсивностей от начала процесса эффективной термоусадки до появления кратеров, обусловленных деструкцией материала.

В настоящей работе отражены результаты разработки технологии сборки электрооптического элемента фазового модулятора на основе кристалла DKDP с применением полимерных деталей, термоусаживаемых посредством нагрева инфракрасным лазерным излучением. Основное внимание уделено конструкции и вопросам сборки элемента Поккельса на кристалле DKDP для затворов лазеров с модуляцией добротности.

На рис. 3 представлены основные детали конструкции изделия на одном из этапов процесса его сборки. Электрооптический кристалл (*1*) в виде цилиндра диаметром 8 и длиной 12 мм имеет на обоих концах металлические покрытия, играющие роль кольцевых электродов (*2*). В межэлектродном пространстве находится изолятор в виде кольца из силиконовой резины (*3*), плотно надетого на оптический элемент. Электрические контакты (*4*) установлены на основании (*5*) из плексигласа. Они служат опорой в крепеже кристалла (*1*) при помощи термоусаживаемого хомута (*6*). Кольцо пластика фиксируется посредством скобы (*7*), приклеенной к основанию (*5*).

Лазерное излучение воздействует на термоусадочный полимер в области (*8*). Практика

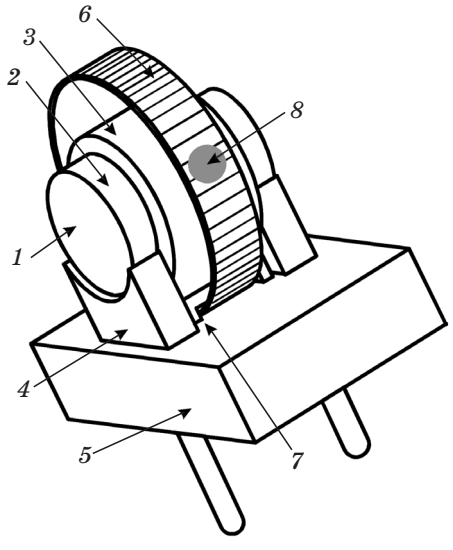

Рис. 3. Эскиз сборки электрооптического модулятора на основе кристалла DKDP. *1* – электрооптический кристалл, *2* – электрод, *3* – силиконовое кольцо, *4* – контакт, *5* – основание, *6* – термоусаживаемый хомут, *7* – скоба, *8* – область воздействия лазерного излучения.

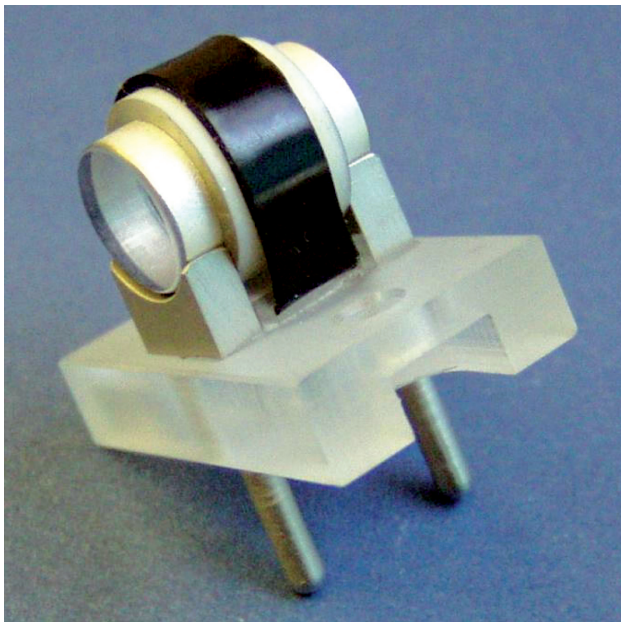

Рис. 4. Внешний вид фазового электрооптического модулятора после сборки.

показала, что процесс желаемого формообразования пластика начинается при мощности лазерного излучения P_1 = 0,8 Вт (при плотности мощности W_1 = 16,3 Вт/см^2), если одна и та же область материала подвергается воздействию в течение периода около 3 с. Однако более удачный результат с точки зрения однородности термоусадки и получения ровной поверхности обрабатываемой детали оказывается возможным получить при более высокой мощности лазерного излучения и осуществлении сканирования лазерного пучка по поверхности пластика.

На рис. 4 представлена фотография оптического изделия после окончания операции сборки, когда мощность излучения составляла P_2 = 1,5 Вт (соответственно W_2 = 30,6 Вт/см^2), а скорость сканирования пучка по поверхности термоосаждаемого хомута была около 7 мм/с. Окончательный результат достигался за 3 прохода по всей окружности пластикового кольца.

Для контроля результатов технологического процесса на боковой поверхности кристалла DKDP (под кольцом силиконовой резины) располагалась термопара для контроля температуры элемента. Оказалось, что рост температуры не превысил 3 °С.

Апробированная технология позволяет производить контроль и других параметров, в частности, оптических характеристик используемого кристалла на любых стадиях процесса. Это особенно важно в случае кристаллов DKDP, чувствительных к действию механических напряжений. Полученные при сборке по описанной технологии фазовые электрооптические модуляторы имели коэффициенты эллиптичности и контрастности не менее 500.

Таким образом, в настоящей работе установлена перспективность использования лазерной технологии при сборке термочувствительных оптических изделий с крепежными деталями из термоосаждаемых материалов. Вероятно, эта технология не ограничится в будущем областью лишь электрооптических элементов. В частности, кристаллы DKDP имеют свою нишу в ряду преобразователей частоты лазерного излучения. Являясь гигроскопичными, они требуют защиты от окружающей атмосферы. Описанная технология может оказаться полезной при решении различных вопросов герметизации как DKDP, KDP, так и многих других водорастворимых кристаллов нелинейной оптики. Она может найти свое применение в операциях сборки оптоволоконных датчиков различных конструкций, когда приходится сталкиваться с описанными выше проблемами. Успешному расширению областей приложения метода способствует бурное развитие техники полупроводниковых лазеров [6, 7], сопровождаемое снижением их стоимости.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Zitter R.N., Koster D.F.* Demountable optical windows using heat shrinkable tubing // Review of Scientific Instruments. 1975. V. 46. № 8. P. 1116–1119.
2. *DeCusatis C.* Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking. N.Y.: Academic Press, 2008.
3. *Friebele E.J., Askins C.G., Bosse A.B., Kersey A.D., Patrick H.J., Pogue W.R., Putnam M.A., Simon W.R., Tasker F.A., Vincent W.S., Vohra S.T.* Optical fiber sensors for spacecraft applications // Smart Materials and Structures. 1999. V. 8. № 6. P. 813–838.
4. *Pickrell G., Duan Y., Wang A.* Method and apparatus for packaging optical fiber sensors for harsh environments // Patent USA № 6,928,202 B2. 2005.
5. *Köhler B., Kissel H., Flament M., Wolf P., Brand T., Biesenbach J.* High-power diode laser modules from 410 nm to 2200 nm // Proc. SPIE. 2010. V. 7583. P. 75830F.
6. *Roh S.D., Grasso D.M., Shou N., Pathak R., Cheung G., Schleuning D., Hasenberg T.* Progress in high-brightness diode laser development based on tailored diode laser bars // Proc. SPIE. 2010. V. 7583. P. 758310.
7. *Bonati G.* Prospects for the Diode Laser Market: From Science to Conveyers // Laser Technik Journal. 2010. V. 7. № 2. P. 37–40.